40 AÑOS
ANES
Asociación Nacional de Energía Solar

ISES
International Solar Energy Society

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

PUBLICACIONES DE LA SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR
2016

"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

LA ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR (ANES) JUNTO CON LA SECCIÓN REGIONAL ANES PUEBLA Y OAXACA

Organizan en conjunto la XL Semana Nacional de Energía Solar 2016, a celebrarse del 17 al 21 de octubre en la Ciudad de Puebla de los Ángeles, Puebla.

PONENCIAS TÉCNICAS

A lo largo de esta reunión se presentarán los trabajos de los investigadores, tecnólogos, industriales, profesionistas y estudiantes participantes en la modalidad de ponencia (15 minutos) o sesión de presentación. Habrá también conferencias plenarias, talleres y mesas redondas a cargo de investigadores, autoridades y profesionistas nacionales e internacionales expertos en energías renovables.

EXPOSICIÓN INDUSTRIAL Y DE SERVICIOS

En esta ocasión se contará con una importante área de exposición de empresas dedicadas a la industrialización o prestación de servicios relacionados con las energías renovables.

CONCURSOS

Pintura Infantil.

ASAMBLEA GENERAL

Tendrá lugar el jueves 20 de octubre 2016 y podrán participar todos los socios activos de la Asociación Nacional de Energía Solar AC.

EXPO SOLAR

La Exposición Solar que se llevará a cabo en el marco del congreso nacional de energía solar, marcará el lugar de encuentro entre especialistas, fabricantes, instaladores, funcionarios públicos e interesados en el sector de la energía solar en México.

Contaremos con las más prestigiadas empresas mexicanas e Internacionales que presentarán los avances tecnológicos más relevantes de la Industria.

FOROS

Los Foros facilitan un espacio de diálogo y discusión basado en la experiencia, con el fin de promover y desarrollar a fondo los temas de interés sobre energía solar.

MODERADORES

M.I. Lourdes Angélica Quiñones Juárez

Dr. Iván Martínez Cienfuegos

Dr. Vicente Flores

Ing. Pablo Cuevas Sánchez

Ing. Héctor Hernández L.

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Ing. Francisco Cortés Carreón

Dr. Julio César Morales Mejía

Dr. Bernd Weber

Dra. Estela Cerezo Acevedo

Ing. Daniel Moreno Lawrence

Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez

Dr. Adolfo Finck Pastrana

XVIII CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL 2014 – 2016

Dr. José Alberto Valdés Palacios
Presidente

Lic. Sergio Arnaud Galguera
Vicepresidente

Ing. José de Jesús Celis Alarcón
Secretario General

Dra. Tanya Moreno Coronado
Tesorero

M.I. Lourdes Angélica Quiñones Juárez
Secretario de Organización

Lic. Javier Romero Durand
Secretario de Asuntos Industriales

Dr. Iván Martínez Cienfuegos
Secretario de Vocalías

Dr. Eduardo Rincón Mejía
Secretario de Asuntos Internacionales

Ing. Leoncio López Espinosa
Secretario de Secciones Regionales de ANES

Ing. Héctor Hernández López
Secretario de Convenios y Patrocinios

Dr. Rogelio Mendoza Pérez
Secretario de Publicaciones y Comité editorial

Ing. Francisco Cortés Carreón
Secretario de Asuntos Estudiantiles

Ing. Daniel Moreno Lawrence
Secretario de Normatividad

Ing. Pablo Cuevas Sánchez
Secretario de Capacitación

Ing. Eduardo Salazar Aguayo
Secretaria de Políticas Públicas y Relaciones Institucionales

COMITÉ ORGANIZADOR ANES NACIONAL

Dr. José Alberto Valdés Palacios

Lic. Sergio Arnaud Galguera

M.I. Lourdes Angélica Quiñones Juárez

Ing. José de Jesús Celis Alarcón

Dra. Tanya Moreno Coronado

Ing. Leoncio López Espinosa

COMITÉ ORGANIZADOR ANES SECCIÓN REGIONAL

Ing. Luis Sánchez Stone

Ing. Jesús Antonio Cuéllar Jiménez

Ing. Yehosua Totolhua

BUAP

Arturo Alberto Flores Lucero

Jose Luis Rugerio Palacios

Ing. Jesús Zamora

Ing. David Aponte

Publicaciones de la Semana Nacional de Energía Solar, año 2, No 2, Octubre 2016, es una publicación anual editada por la Asociación Nacional de Energía Solar A.C., Av. Insurgentes Sur, 1748 Desp. 303, Col. Florida, Delegación Álvaro Obregón, D.F. C.P. 01030, Tel. (55) 5661 3787, www.anes.org, dafne.krinis@anes.org. Editor responsable: Dr. José Alberto Valdés Palacios, Reserva de Derechos ante el Instituto de Nacional de Derechos de Autor. Certificado de Reserva al Uso Exclusivo No. 04-2015-082714164300-203, **ISSN: 2448-5543** Presidencia: M. en I. José Alberto Valdés Palacios.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Asociación Nacional de Energía Solar A.C.

OCTUBRE 2016

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016

17 AL 21 DE OCTUBRE

CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO

¡OH TIERRA DEL SOL!

"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

2016

Arquitectura Bioclimática

"ABC"

"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

UNA REVISIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE EDIFICIOS DESARROLLADOS EN MÉXICO Y EL MUNDO

Ivan Oropeza Perez
Departamento de Arquitectura, Universidad de las Américas Puebla, Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, CP 72810, México,
(222) 229 3253, **ivan.oropeza@udlap.mx**

RESUMEN

Este trabajo tiene por objetivo mostrar los diferentes modelos de simulación de edificios que se han desarrollado en México y el mundo en los últimos años y que tienen como fin el garantizar de una manera rápida y económica el correcto desempeño de las edificaciones en términos de su eficiencia energética y confort interior, principalmente. La revisión empieza con los primeros programas de simulación desarrollados en el mundo desde los años sesenta. Continúa con la revisión de los programas mexicanos y termina con una reflexión de dónde se encuentra México en términos de simulación de edificios y cuáles son las prospectivas que se tienen para el futuro. De esta manera, se propone un diagrama esquemático para el desarrollo de un programa de simulación en estado dinámico para las condiciones mexicanas.

ABSTRACT

The objective of this work is to show the different building simulation models that have been developed in both Mexico and the rest of the world during the last years and which have the purpose of making sure the proper performance of buildings in terms of energy and indoor environment in a rapid and affordable manner, mainly. The review gets started with the first simulation programs developed in the world since the sixties decade. It continues with a review of the simulation programs developed in Mexico and it finishes with a reflection of where Mexico is in terms of building simulation and what are the prospective that Mexico has to the future. Thereby, it is proposed a schematic diagram to the development of a simulation program in dynamic state for Mexican conditions.

Palabras claves: Simulación térmica, programas de simulación, simulación dinámica, simulación en México.

INTRODUCCIÓN

Los programas de simulación del desempeño de los edificios son herramientas que han estado ganando popularidad entre los expertos en arquitectura sustentable debido a su relativa facilidad de implementación, la velocidad de respuesta y accesibilidad económica. Estas herramientas están en constante evolución, principalmente por dos razones: la búsqueda de modelos más precisos que simulen las variantes de entrada y de salida lo más cercano a la realidad; y la creciente implementación de nuevos sistemas en los edificios tales como energía solar fotovoltaica, bombas de calor, nuevos sistemas pasivos de climatización etc. que tienen que ser modelados por estos programas.

Los programas, una vez que tienen un correcto funcionamiento, permiten calcular variantes que sirven para encontrar el mejor diseño arquitectónico del edificio y el mejor comportamiento de los usuarios con base a las características climatológicas del lugar.

Así, por ejemplo, en un clima dado, un edificio puede ser diseñado de tal manera que la temperatura interior nunca sobrepase los límites inferior y superior de la temperatura de confort. Un programa de simulación de edificios construye un modelo de simulación que calcule la temperatura interior cambiando la capacidad térmica de la estructura, la orientación de las ventanas, la altura del techo, el color de las paredes etc. (diseño arquitectónico) así también, cambiando el número de ocupantes, el horario de ocupación, la apertura de puertas y ventanas, las ganancias de calor internas etc. (comportamiento de los usuarios) y así calcular la temperatura interior de confort sin la necesidad de utilizar complejos (y muchas veces costosos) modelos experimentales.

Así, existen diferentes modelos de simulación de edificios que calculan el flujo de calor a través de la envolvente hacia o desde el interior del edificio, las ganancias de calor totales a un edificio por conducción y radiación, el comportamiento lumínico del edificio, el flujo de aire (natural y/o mecánico), entre otras funciones. Todos estos programas tienen el objetivo de obtener la mayor cantidad de información para diseñar el edificio siempre pensando en mantener un confort interior adecuado con un uso mínimo de recursos, principalmente energía y agua.

Para efectos de este documento, se revisarán los programas de simulación térmica que se han desarrollado y que tienen como principal objetivo calcular el balance térmico del edificio, determinando la temperatura de aire interior y la carga térmica necesaria para alcanzar el rango de confort térmico.

MARCO TEÓRICO

Desarrollo de los modelos de simulación de edificios

Década de los 60. La historia de la simulación de edificios se puede remitir a principios de la década de los sesentas en Estados Unidos, cuando la Sociedad Americana de Calefacción y Aire Acondicionado (ASHAE, siglas en inglés) se fusiona con la Sociedad Americana de Ingenieros en Refrigeración (ASRE, siglas en inglés) para crear la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, siglas en inglés).

En esta asociación se escriben los primeros trabajos sobre la transferencia de calor a través de las paredes usando Métodos de Factor de Respuesta (RFM, siglas en inglés). Unos años más tarde, las compañías de aire acondicionado empiezan a calcular el flujo dinámico de calor en los edificios para determinar las cargas pico de enfriamiento. Sin embargo, no fue sino el ejército americano el que vio el potencial de usar computadoras para este fin.

El Buró Nacional de Estándares (NBS, siglas en inglés), patrocinado por la milicia estadounidense, desarrolla el primer programa de simulación capaz de predecir el desempeño térmico de un edificio, llamado Determinación de Cargas del Buró Nacional de Estándares (NBSLD, siglas en inglés). El programa era muy básico, calculando sólo una simple habitación. Sin embargo, este fue el primer gran paso para el desarrollo de modelos de simulación de edificios.

En 1967, al mismo tiempo que NBSLD fue desarrollado, Procedimientos Automatizados para Consultores de Ingeniería, Inc. (APEC, siglas en inglés), desarrolla su programa Cálculo de Cargas Pico de Calefacción y Enfriamiento (HCC, siglas en inglés), el cual calcula las cargas horarias y anuales de los sistemas de calefacción y aire acondicionado.

Década de los 70. Mientras la primera conferencia sobre simulación computacional de edificios es llevada a cabo en Maryland, Estados Unidos, y la Oficina Postal de Estados Unidos crea por encargo el Programa de Oficina Postal el cual analiza el uso energético en los edificios postales, el embargo petrolero por parte de los países árabes obliga a Estados Unidos a desarrollar su primera norma de eficiencia energética de edificios. Así, ASHRAE desarrolla la norma ASHRAE Standard 90-75, la primera norma para alcanzar la conservación de energía en edificios del mundo.

A mitad de los setentas el Laboratorio de Investigación de Ingeniería de Construcción del ejército de Estados Unidos (CERL, siglas en inglés) crea el Análisis de Cargas de Edificios y Sistemas Termodinámicos (BLAST, siglas en inglés).

Al mismo tiempo, la Administración de Aeronáutica Nacional y Espacio (NASA, siglas en inglés) retoma el Programa de Oficina Postal y desarrolla el Programa de Análisis de Costos Energéticos (NECAP, siglas en inglés). Después, la Administración de Investigación y Desarrollo Energético (ERDA, siglas en inglés) junto con Comisión Energética de California (CEC, siglas en inglés) perfeccionan NECAP y los renombran CAL-ERDA, convirtiéndose después en DOE-1, y después en DOE-2.

Independiente a estos hechos, la estudiante de doctorado Sandy Klein, de la Universidad de Wisconsin-Madison, desarrolla un programa computacional en base Fortran para predecir el uso energético de un edificio modelo, a este programa lo nombró Programa de Simulación de Sistemas Transitorios (TRNSYS, siglas en inglés).

Década de los 80. La década de los ochentas es caracterizada por la consolidación y actualización de los programas ya existentes. DOE-2 se actualiza a DOE-2.1, mientras BLAST se actualiza hasta alcanzar BLAST-2.0.

Así también, el uso de programas de simulación es cada vez más usado para desarrollar y analizar estándares y códigos de edificios a lo largo del mundo.

Esa misma década la Corporación Carrier desarrolla el programa Estimación de Cargas Comercial v1.0, el cuál es seguido por HAV v1.0, un programa que hace el análisis energético en periodos de una hora.

En 1987 se crea la Asociación Internacional de la Simulación del Desempeño de Edificios (IBPSA, siglas en inglés), organización que tiene por objetivo ser el punto de encuentro de todos los desarrolladores de programas de simulación de edificios alrededor del mundo.

Década de los 90. A principios de los noventas el programa DOE-2.1 es actualizado nuevamente a un programa mucho más gráfico por lo que se desarrolla junto con el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LNBL, siglas en inglés) la versión PowerDOE v1.0. Sin embargo, una disputa entre los creadores de PowerDOE hace que se creen dos programas distintos, PowerDOE y DOE-2.2. Así, PowerDOE no puede continuar con su política de software libre y en pocos años se convierte en eQUEST v1.0, programa que sigue hasta el día de hoy.

Por otra parte, DOE-2.2 se fusiona con BLAST-2.1, el cual ya no era patrocinado por el ejército americano, y con esto se crea en 1996 la primera versión de EnergyPlus, programa de simulación que es dirigido ya por el Departamento de Energía de Estados Unidos.

Otros programas son desarrollados en los noventa como IES Virtual Environment, derivado de ESP+ y Análisis Térmico Apache, que usaban un Sistema de Diseño Integrado al Edificio (BIDS, siglas en inglés). El programa IES es la primera versión comercial de una herramienta de análisis integrado al edificio que usa un modelo común de datos para todo su rango de aplicaciones de análisis.

A finales de la década, Bentley crea un Modelado de Información del Edificio (BIM, siglas en inglés), compatible con los Modelos Energéticos de Edificios (BEM, siglas en inglés). Así, en 2000 se lanza el programa Green Building Studio.

2000 al presente. A principios de este siglo la simulación de edificios tiene un gran desarrollo debido a dos importantes acontecimientos: el crecimiento y multiplicación de los estándares energéticos en los edificios alrededor del mundo y el surgimiento de la certificación energética de edificios.

En 1998, el Consejo de Edificios Verdes de Estados Unidos (USGBC, siglas en inglés) lanza el programa piloto del Liderazgo en Diseño Energético y Ambiental (LEED, siglas en inglés).

Al mismo tiempo, la norma ASHRAE 90.1 obliga a utilizar modelos de simulación energética para verificar la eficiencia de los edificios.

En 2007, LEED introduce un requerimiento mínimo de dos puntos para demostrar la eficiencia energética del edificio y así otorgar la certificación. Alrededor del 90% de los solicitantes usan modelos de simulación para demostrar esto. En 2009, LEED v.3 pone mucho más peso a demostrar el uso eficiente de energía el edificio por lo que casi se asegura el uso de modelos de simulación para obtener la certificación.

Así, para 2010, firmas como Autodesk y Bentley dominan el mercado de la simulación del desempeño de edificios en Estados Unidos, con programas como Ecotect, Hevacomp Simulator, Design Builder, eQUEST y TRNSYS. Mientras que en otros países también se realizan programas como Thermal Analysis Simulation, IES-Virtual Environment y ESP-r en Reino Unido, DeST en China, Doums Procel Edifica en Brasil y BSim en Dinamarca.

Asimismo, se desarrolla a plenitud la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, siglas en inglés), herramienta que no sólo tiene uso en las edificaciones, sino en otros campos como la aeronáutica, la dinámica de automóviles etc. Estos modelos simulan el comportamiento del flujo de aire, transferencia de calor y transferencia de masa de un sistema dado a nivel de micro-escala.

Simulación de edificios en México

En México, por su parte, con la introducción de las normas energéticas NOM-008 (para edificios comerciales y de servicios en 2001) y la NOM-020 (para edificios residenciales en 2011), se comienza la introducción de los modelos de simulación.

La NOM-080 y NOM-020 calculan la ganancia de calor por conducción y radiación de un edificio tomando en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor (U) de la envolvente (para la conducción) y los elementos de control solar y características de las ventanas (para la radiación). De esta norma se desarrolla el programa NOM-008, el cual realiza estos cálculos y determina si el edificio tiene menor ganancia de calor que un edificio de referencia. Si es así, el edificio en proyección cumple con la norma.

En 2012, investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad de Sonora, la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, la Universidad Autónoma de Tamaulipas, la Universidad de Colima y el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico desarrollan el programa Ener-Habitat, herramienta que calcula dinámicamente la transferencia de calor en diferentes componentes de la envolvente, tales como el techo y las paredes, cambiando las características térmicas de los materiales de construcción.

Una característica de este modelo de simulación es la posibilidad de cambiar las capas de los sistemas constructivos en homogéneas y no homogéneas. Otra característica es la evaluación del sistema con aire acondicionado y sin aire acondicionado, respectivamente.

Una desventaja del sistema es que sólo calcula la transferencia de calor por unidad de área de los sistemas constructivos de la envolvente, sin tomar en cuenta factores muy importantes tales como las ventanas, el número de ocupantes, las cargas de calor internas etc.

En 2015, en el Departamento de Arquitectura de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) se desarrolla el programa de posicionamiento solar SolarTiuh v1.0 el cuál calcula la posición del sol con el azimut (ángulo desde el eje imaginario sur-norte hasta la posición del sol sobre el plano horizontal) y la altura solar (ángulo desde el plano horizontal hasta la altura del sol) solicitando solamente la latitud del lugar, el día del año y la hora del día.

Con este programa se espera que los arquitectos y personas vinculadas a la construcción tengan una herramienta adecuada para diseñar sistemas de control solar que permitan optimizar el confort térmico y lumínico del edificio.

PROSPECTIVAS DE LA SIMULACIÓN DE EDIFICIOS EN MÉXICO

Por lo que se puede leer, aún falta mucho por hacer en relación con la simulación de edificios en México. Es por esto que es necesario que en el país se empiecen a desarrollar más modelos de simulación energética, de información de edificios, de iluminación etc.

Esto es debido a que las complicaciones de utilizar modelos de simulación de otros países son varias. La utilización de bases de datos climatológicos impropias para México, el uso de materiales de construcción diferentes a los usados en México, el diferente comportamiento de los usuarios y los métodos de certificación energética de edificios diferentes a las características de México son las más comunes.

Es por eso que se plantea crear un modelo que analicen el contexto mexicano en términos de condiciones climatológicas, diseño arquitectónico y comportamiento de los usuarios para que se garanticen las condiciones de ambiente interior y uso eficiente de los recursos en los edificios ubicados en territorio nacional.

Un avance a este propósito es la instalación de la Sección México de IBPSA, llevada a cabo en enero de 2015 en las instalaciones de la UDLAP por parte de académicos de la Universidad de las Américas Puebla, de la Universidad Nacional Autónoma de México, de la Universidad Autónoma de Chiapas, y de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Con esto se espera que cada vez más universidades e instituciones de investigación en México se sumen al desarrollo de modelos de simulación energéticos, termodinámicos, lumínicos y más.

Programa dinámico de simulación para México

Tendiendo los antecedentes de la simulación de edificios en México, se plantea el desarrollo de un modelo de simulación dinámico que analice el balance térmico del edificio tomando en cuenta tres ejes de datos principales: condiciones climatológicas, comportamiento de los usuarios y diseño del edificio.

El programa empieza con el balance térmico del edificio, considerado en una zona térmica donde el aire está bien mezclado. El modelo matemático es planteado como sigue:

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = E_{Int} + E_{Conv} + E_{Vent} + E_{AC} \qquad (1)$$

Donde $\rho.c_p.V.dT/dt$ es el calor en el aire acumulado o perdido en un determinado periodo de tiempo (dt), E_{int} es el flujo de calor debido a ganancias internas de calor (incluyendo las ganancias solares directas a través de ventanas y otros elementos translúcidos), E_{conv} es el flujo de calor proveniente de la envolvente, E_{vent} es el intercambio de calor entre el aire interior y exterior; y E_{AC} es el flujo de calor expulsado/añadido por un sistema mecánico.

Si se resuelve la Eq. 1, se podrá calcular la temperatura del aire interior en un tiempo determinado en función del flujo de calor total que ocurre en el edificio en el mismo periodo de tiempo. Por otra parte, si se calculan los flujos naturales de calor de la Eq. 1 (E_{int}, E_{conv} y E_{vent}) se puede determinar la carga térmica que se debe expulsar (en el caso de enfriamiento) o añadir (en el caso de calefacción) para alcanzar un nivel de confort térmico.

Cabe destacar que el programa tiene por objetivo calcular la temperatura interior del aire, por lo que la transferencia de calor entre los cuatro términos de la Eq.1 y el aire interior es mediante convección, aunque su transporte la zona del aire interior por otro métdo de transferencia. Así, E_{int} es generalmente a través de radiación, E_{conv} es mediante conducción a través del techo y paredes. Así también, la temperatura calculada no es operativa, ya que no toma en cuenta la ganancia por radiación directa hacia el cuerpo de los ocupantes, solamente considera la temperatura del aire.

El programa propuesto calculará la temperatura interior de una forma horaria con base a las condiciones climatológicas, el comportamiento de los usuarios y del diseño del edificio. Un diagrama esquemático del programa propuesto es mostrado en la Fig.1:

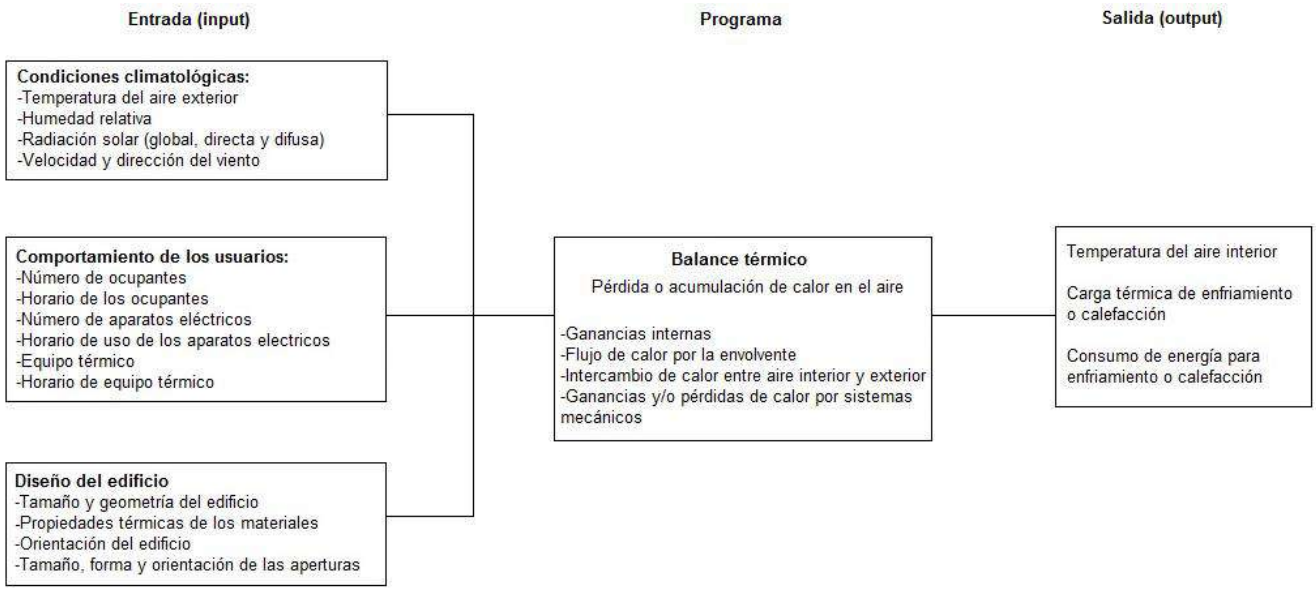


Figura 1. Diagrama esquemático de un programa de simulación térmica de edificios para México

Los tres ejes de datos influyen de diferente manera al programa en la resolución del balance térmico. Las condiciones climatológicas influyen en las tres ganancias/pérdidas naturales de calor (e.g. la radiación solar en las ganancias internas y la transferencia de calor a través de la envolvente; y la temperatura del aire exterior en el intercambio de calor entre el aire interior y exterior). El comportamiento de los usuarios influye generalmente en las ganancias internas de calor. Y El diseño del edificio modifica las ganancias o pérdidas tanto de la envolvente como de intercambio de calor entre el aire exterior e interior.

De esta manera, el programa mostrado en la Fig.1 tratará de ser un programa en función del tiempo (dinámico). Esto es, el balance térmico se calculará cada hora con los flujos de calor presentes en el momento. Por ejemplo, cuando la inercia térmica de la envolvente es alta, se tendrá que tomar en cuenta el calor acumulado en las paredes y techo debido a las constantes ganancias de calor por radiación y convección. Otro ejemplo son las pérdidas por emisión desde la envolvente que se presentan principalmente durante la noche.

CONCLUSIONES

Un repaso de los diferentes modelos de simulación de edificios se ha hecho en este trabajo. El repaso ha sido enfocado principalmente en Estados Unidos, país que abarca un gran porcentaje de estos modelos de simulación.

Un análisis de tres modelos de simulación en México también ha sido llevado a cabo. Y aunque se concluye que en México hace falta mucho para desarrollar modelos de simulación, también se concluye que las bases están dadas, y que con actividades como la creación de IBPSA-México se espera que en un futuro la simulación del desempeño de edificios sea una actividad cotidiana en busca de edificios más sustentables dentro del territorio nacional.

Así pues, se propone un programa de simulación térmica de edificios que tome en cuenta las condiciones climatológicas mexicanas y que sea función de las principales características del comportamiento de los usuarios y del diseño del edificio. Esto con la finalidad de

calcular de una manera dinámica la temperatura del aire interior, analizar si esta se encuentra dentro de un cierto rango de confort térmico y, de ser necesario, calcular el consumo energético destinado al enfriamiento o calefacción del espacio.

Por lo tanto, esta herramienta será de utilidad para analizar los principales factores, interiores, exteriores y de diseño, que afectan la temperatura del aire interior, y que pueden ser modificados con el fin de alcanzar un cierto confort térmico y así prescindir de los sistemas mecánicos obteniendo una eficiencia energética.

REFERENCIAS

ASHRAE Handbook of Fundamentals (2009), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., New York, USA, Chapter 16.

Ayres, J., & Stamper, E. (1995). Historical Development of Building Energy Calculations. http://www.jmayres.com/computersoftwarehistory.pdf

BIM history. (2009). http://www.bimechanics.com/bim-history.htm

Ener-Habitat (2012). Evaluación térmica de la envolvente arquitectónica. http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/

Haberl, J., & Cho, S. (2004). Literature review of uncertainty of analysis methods. Manuscript submitted for publication, Texas Engineering Experiment Station, Texas A&M University, College Station, Texas. http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/2072

Hensen, J. (n.d.). Past, present, and future plans of the international building performance simulation association (IBPSA). Unpublished manuscript, Universiteit Eindhove, Eindhoven, Netherlands. http://www.ibpsanvl.org

Etheridge D. (2012) Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design. 1st ed. John Wiley & Sons Ltd.

History - green building xml. (2010). http://www.gbxml.org/history.php

Hunn, B., & Conover, D. (2010). 35 Years of Standard 90.1. Encyclopedia Britannica. http://media.web.britannica.com/ebsco/pdf/324/48850324.pdf

IBPSA-México (2016). International Building Performance Simulation Association-México. http://reiderrelles.wix.com/ibpsa-mexico

Kusuda, T. (1970). Use of computers for environmental engineering related to buildings. Proceedings of the Procedures of a Symposium sponsored by the National Bureau of Standards, the American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. and the Automated Procedures for Engineering Consultants, Inc., held at NBS, Gaithersburg, Maryland

Malin, N. (2008). Bim companies acquiring energy modeling capabilities. GreenSource. http://greensource.construction.com/news/080403BIMModeling.asp

National Institute of Standards and Technology, (n.d.).Computer program for heating and cooling loads in buildings. http:://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/sp958-lide/266-269.pdf

NOM-008 Norma de Eficiencia Energética para la Envolvente de Edificios no Residenciales. http://www.sener.gob.mx/res/Acerca_de/nom-008ener2001.pdf

Oropeza Perez, Ivan. (2015). Programa de posicionamiento solar Solartiuh v1.0 desarrollado para el diseño del control solar en edificios. XXXIX Semana Nacional de Energía Solar. Campeche, Campeche. 5 al 9 de octubre de 2015.

Oropeza Perez, Ivan. (2016). Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector. Energy Reports. Manuscrito en revisión.

TRNSYS (n. d.) The Transient Energy System Simulation Tool. . http://www.trnsys.com/

Wright, R. N. (2003). Nbs/nist 1975-2000 [NIST BSS 179, Environmental Systems, pp.13-15]. http://www2.bfrl.nist.gov/info/bfrl_history/

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTRATEGIAS BIOCLIMATICAS COMO PROPUESTA DE DESARROLLO EN MÉXICO

Karla J. Valenzuela Sombra, Kinberly Samantha Sillas Sesma
Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas
Blvd. Universitario #100 Tijuana Baja California, Janeth.valenzuela@uab.edu.mx

Ixchel Astrid Camacho Ixta, Miguel Isaac Sahagún Valenzuela
Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas
Blvd. Universitario #100 Tijuana Baja California, ixchel_ixta@hotmail.com

RESUMEN

En la presente investigación se busca identificar las diferentes condiciones climáticas de México, para poder definir los parámetros que se deben considerar al momento de diseñar edificios bioclimáticos, al utilizar como base los antecedentes del país para poder estudiar los proyectos construidos y todo esto con el fin de aumentar el número de construcciones con adecuaciones bioclimáticas que tengan en cuenta los elementos naturales como recorrido del sol, corrientes de vientos, la vegetación, nubosidad y lluvias, con los que cuenta la región. Para generar actividad económica en edificaciones sustentables que sean ecológicamente adecuadas, energéticamente eficientes y poder conseguir confort térmico para los usuarios que habitan en su interior.

En épocas de nuestros antepasados, mediante el uso de un conocimiento empírico se procuraba la adecuación de los edificios a las condiciones climatológicas y así se lograba confort térmico, también en las ciudades modernas dicho conocimiento ha sido olvidado o dejado de lado, generando un déficit económico, energético, y ha provocado un notorio impacto ambiental lo que puede provocar una gran repercusión en el futuro.

Tomando en cuenta la diversidad de condiciones climáticas de México se busca la propuesta de proyectos que se adecuen al clima particular de cada región utilizando estrategias de adecuación que generen un buen envolvente térmico y así minimizar los costos de consumo y mejorar la habitabilidad en dichas regiones, ya que de lo contrario se provoca un gasto excesivo de energía eléctrica debido al uso desmedido de sistemas mecánicos de climatización artificial en busca de confort térmico lo que repercute directamente a la economía del usuario y en el deterioro del medio ambiente .

Al lograr cumplir con los requerimientos ya mencionados para el diseño bioclimático, adecuando el proyecto a la orientación, la geometría, elementos arquitectónicos y la construcción del edificio, se podrá conseguir una armonía entre las edificaciones y el medio ambiente.

ABSTRACT

In this research is to identify the different climatic conditions in Mexico, to define the parameters to be considered when designing bioclimatic buildings, using as a basis the history of the country to study the projects built and all this in order to increase the number of buildings with bioclimatic adjustments that take into account the natural elements like path of the sun, wind currents, vegetation, clouds and rain, with which the region has. To generate economic activity in sustainable buildings that are environmentally sound, energy efficient and to achieve thermal comfort for users who live inside.

In times of our ancestors, using empirical knowledge adapting buildings to weather conditions sought and thus thermal comfort was achieved, also in modern cities such knowledge has been forgotten or neglected, generating an economic deficit , energy, and has caused a noticeable environmental impact which can cause a great impact in the future.

Taking into account the diversity of climatic conditions of Mexico's proposal projects that fit the particular climate of each region using strategies adequacy generating good thermal envelope and minimize consumption costs and improve livability in these regions is sought, because otherwise overspending electricity due to excessive use of artificial mechanical air conditioning systems in search of thermal comfort which directly affects the economy of the user and the environmental damage it causes.

To achieve compliance with the requirements mentioned above for the bioclimatic design, adapting the project to the orientation, geometry, architectural elements and construction of the building, it may achieve a harmony between buildings and the environment.

Palabras clave: Edifico bioclimático, clima en México, Estrategias de adecuación, medio ambiente, sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

La arquitectura bioclimática como se le conoce hoy en día se ha buscado desde tiempos pasados. El mayor objetivo principal que se desea obtener en un edifico es crear un buen confort para los que habitan ahí.

Esta es una búsqueda de una arquitectura que sea eficiente cuyo objetivo final es mejorar la calidad de vida, la concepción bioclimática es una especie de compromiso que para llevar a cabo de sede cumplir con bases, como lo son un programa de arquitectura, un paisaje, una cultura, materiales locales, cierta noción de bienestar y abrigo y cuya síntesis es la envoltura habitable.

(Patrick Vardou y Varoujan Arzumenian. SOL Y ARQUITECTURA)

La postura bioclimática se basa principalmente en la búsqueda del confort, y este se relaciona directamente con la sensación de bienestar. En el confort influyen multitud de factores físicos y psicológicos. En general podemos decir que los aspectos que incorpora la postura bioclimática se desarrollan a partir de una búsqueda del confort físico, psicológico y cultural.

(Asiain, 2003)

JUSTIFICACIÓN

Aquí nos enfocaremos principalmente en el confort físico que se busca a través de la consideración de aspectos biofísicos y constructivos.

Los aspectos biofísicos, abarca Aspectos climático-térmicos hacen referencia a los parámetros de temperatura del aire y temperatura radiante, humedad del aire, ventilación (velocidad del aire), etc.

El confort térmico se produce cuando en ninguna parte del cuerpo se percibe sensación de frio o calor.

Existen diferentes tipos de fuentes naturales y sumideros energéticos renovables, que se pueden utilizar a nuestro favor para poder acondicionar un edificio.

Figura 1: Fuentes naturales bioclimáticas
(Asiain, 2003)

-La radiación solar: es la principal fuente que se incorpora al edificio a través del acristalamiento.

-El aire exterior: siempre que se encuentre a más de 24° C

-El metabolismo interno: engloba el calor tanto de las personas como de los electrodomésticos habituales.

-El espacio: incluso en las peores circunstancias, el edificio siempre trasvasa calor al espacio exterior.

-Siempre que se encuentre por debajo de 24° C, lo cual suele ocurrir en verano de madrugada.

-Superficies húmedas: tanto artificiales como naturales ya que el calor que utilizan para evaporar el agua lo sacan de su entorno inmediato.
(Asiain, 2003)

En los Aspectos constructivos se busca obtener como resultado un buen funcionamiento, economía constructiva y durabilidad. Para esto se necesita tener buenos materiales y sistemas constructivos.
Los materiales constructivos funcionaran de manera diferente según sus características, la eficacia de estos elementos en el control o modificación de las condiciones térmicas, lumínicas y acústicas se definen por la manera en que los materiales empleados absorben transmiten y acumulan energía.

Condiciones climáticas de México

Como ya se mencionó, las características constructivas para crear un edificio bioclimático varían según la región en la que se encuentre, es por eso que a continuación mencionaremos las diferentes condiciones climáticas de México para que tomando en cuenta estos valores y especificaciones se piense cual es la mejor manera de construir y seleccionar el material a utilizar en el edifico a construir.

México posee climas que van desde el tipo frío hasta el tropical. Las diferentes entidades o estados que conforman el territorio mexicano se agrupan en regiones y que cada una de ellas tiene distintas características naturales.
La agrupación de los estados que presentan características similares ya sean de tipo físico, cultural, económico, etc., da origen a la formación de siete regiones, lo cual nos permitirá y facilitará el estudio de nuestro país.

La Región Norte es la más extensa, ya que la superficie que ocupa es superior a los 700,000 km2.
Está formada por los estados de: Chihuahua cuya capital es la ciudad de Chihuahua, Coahuila (cap. Saltillo), Nuevo León (cap. Monterrey), Durango (cap. Durango), San Luis Potosí (cap. San Luis Potosí), Zacatecas (cap. Zacatecas) y Aguascalientes (cap. Aguascalientes); la suma de los territorios de estas entidades en conjunto representa la tercera parte de la superficie del país (726,338 km2).
Climas dominantes:
En la mayor parte seco extremoso, es decir con temperaturas muy altas durante el día y muy bajas por la noche. Así como muy altas en el verano y muy frías en el invierno.
En las zonas altas de algunas cierras el clima es templado.
En las zonas con poca altura y generalmente rodeando al desierto se presenta el clima semiseco.

Región Noroeste también se le conoce como región del Pacífico Norte; al igual que la región Norte, esta zona tiene frontera con los Estados Unidos de América, lo que le ha permitido tener relación comercial con el vecino país.
Está formada por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora; teniendo como capitales: Mexicali, La Paz, Culiacán y Hermosillo respectivamente. Abarca una superficie de aproximadamente 386,816 km2.
Climas dominantes:
Seco desértico en la mayor parte de la península de Baja California y en casi todas las llanuras costeras del norte de Sonora y Sinaloa.
Semiseco al sur de Sinaloa y sureste de Sonora.
Templado al noroeste de Baja California.
Cálido o tropical en el sur de Sinaloa.

Región Occidente está integrada por los estados de Nayarit (cap. Tepic), Jalisco (cap. Guadalajara), Colima (cap. Colima) y Michoacán (cap. Morelia). Tiene una extensión aproximada de 170, 000 km2.
Climas dominantes:
Templado: se localiza al norte de Jalisco, Nayarit y Michoacán.
Cálido: en las llanuras costeras y partes bajas de los estados que integran a la región
Frio: en las partes altas de las sierras.

Región Central está integrada por el Distrito Federal y por 7 estados: Guanajuato (cap. Guanajuato), Hidalgo (cap. Pachuca), México (cap. Toluca), Morelos (cap. Cuernavaca), Puebla (cap. Puebla), Querétaro (cap. Querétaro) y Tlaxcala (cap. Tlaxcala). La extensión que comprende esta zona es aproximadamente de130, 000 km2.
Climas dominantes:
Templado con lluvias en verano; se localiza en la mayor parte de la región.
Semiseco en la parte norte de los estados de Hidalgo y Querétaro; así como en una zona de puebla.
Cálido tropical, se localiza al norte de Hidalgo, en todo el territorio de Morelos y al norte y sur de Puebla.

Región del Golfo comprende los estados de Tamaulipas. Veracruz y Tabasco, con capitales en Ciudad Victoria, Jalapa Villahermosa respectivamente. La superficie que abarca esta región es aproximadamente de 176,000 km2.
Climas dominantes:
En la mayor parte de la región predomina el clima tropical lluvioso. De hecho en esta región se localizan las áreas más lluviosas del territorio nacional: al sur de Veracruz y parte de Tabasco.
En la parte norte hay una franja de clima semiseco con lluvias escasas de verano.
En las partes medias y altas de las sierras el clima es templado.

Región del sur está conformada por los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, con capitales en Chilpancingo, ciudad de Oaxaca y Tuxtla Gutiérrez respectivamente. Su extensión es aproximadamente de 233,045 km2.

Climas dominantes:

Semiseco en la mayor parte de la región.

En gran parte de las zonas costeras y en extensas zonas de Chiapas el clima es tropical con lluvias en verano.

En las partes altas de las serranías y en gran parte de la meseta central Chiapaneca el clima es templado con lluvias en verano.

Región Península de Yucatán la integran los estados de Campeche (cap. Campeche), Yucatán (cap. Mérida) y Quintana Roo (cap. Chetumal). La extensión de la región es de alrededor de los 142,000 km2.

Climas dominantes:

El clima que predomina en la región es el cálido, con periodo de lluvias en verano.

En una pequeña área del norte de Yucatán se presenta el clima semiseco.

(México y sus regiones)

De acuerdo al criterio de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en países afectados por Sequía grave o Desertificación, México cuenta con una superficie de 1, 197,991.08 km2 con déficit de humedad muy severo, severo o moderado durante el año. Lo anterior representa el 61.15% de la República Mexicana, distribuidos en áreas de todos los Estados del país.

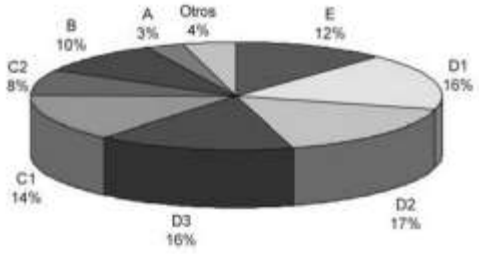
(EL CLIMA DE LA REPÚBLICA MEXICANA)

Tabla 1: Clima República Mexicana.

Superficies por grupo climático para el clima anual de la República Mexicana, bajo Thornthwaite modificado V III.

CLIMA	Superficie %
ARIDOS Y SEMIÁRIDOS	61.15
SUBHÚMEDOS	21.93
HÚMEDOS	9.60
PER HÚMEDO	3.23
OTROS	4.08
TOTAL	100.00

Superficies por tipo de clima para el clima anual de la República Mexicana, bajo Thornthwaite modificado V.III.



(EL CLIMA DE LA REPÚBLICA MEXICANA)

OBJETIVO METODO Y RESULTADOS

Ya que hemos conocidos las distintas regiones de todo el territorio mexicano con sus respectivos estados y características del clima, los siguientes puntos que se presentan son estrategias de construcción para algunos de los distintos tipos de climas que se han mencionado:

- Clima cálido seco:
- Son convenientes ubicaciones que protejan en verano de la radiación solar y de los vientos cálidos: en el interior de bosques (más frescos y húmedos) en áreas geográficas deprimidas (si son zonas muy secas y no tienen problemas de frio y humedad en invierno) y en zonas cercanas a masas de agua, ya que refrescan el ambiente al evaporarse.
- Se intenta reducir la exposición a la radiación solar mediante asentamientos compactos e incluso semienterrados, generando sombras proyectadas de una superficie sobre otras, pintadas de colores claros para reflejar los rayos solares.
- Al producirse una gran oscilación de temperaturas día-noche, se utilizan materiales de gran inercia térmica para retrasar la entrada de calor diurno al interior.
- La inclusión de patios, con presencia de agua y plantas para humidificar el ambiente, facilita el almacenamiento del aire fresco de las noches.
- Es necesario evitar una excesiva permeabilidad al aire caliente diurno en verano. Las aberturas al exterior, pocas, pequeñas y protegidas mediante voladizos, persianas o vegetación, se cierran en las horas de más calor y se abren por las noches al aire fresco.
- Clima cálido húmedo:
- Es necesario una fuerte protección a la radiación directa y difusa: persianas, celosías, voladizos; pero más importante es garantizar una buena ventilación diurna y nocturna que aumente la sensación de bienestar.

- Para aumentar el confort de verano en estos climas se ha de aumentar la velocidad del aire que incide sobre los ocupantes, por su defecto refrigerante directo y por el enfriamiento derivado de una evaporación más rápida del sudor. La disposición de los edificios, alargados y estrechos, con un factor de forma elevado y con aberturas importantes, no debe crear barreras al paso de los vientos suaves.
- Las edificaciones poco asentadas en el terreno favorecen la circulación del aire y en consecuencia la disminución de la humedad.
- Las formas dispersas poco compactas facilitan las posibilidades de ventilación, al mismo tiempo que aumentan la refrigeración nocturna por la mayor superficie de radiación a la bóveda celeste durante la noche.
- Las cubiertas y fachadas sobrepuestas y ventiladas ayudan a ventilar el edificio.
- Es necesario favorecer la circulación del aire mediante huecos de ventilación.
- Las grandes alturas interiores permitirán la estratificación del aire caliente.
- Es conveniente elegir colores claros y superficies rugosas en fachadas y en cubiertas.

▪ Climas templados (templado-cálido-húmedo, con verano seco)

- En climas mediterráneos continentales son aconsejables las aberturas al sur que permitan el aprovechamiento de la energía solar en invierno, siempre que dispongan de protección solar en verano aislamiento por ejemplo contraventanas interiores, para las épocas frías.
- En climas mediterráneos marítimos lo principal es protegerse del frio y la humedad en invierno y el calor en verano. Por lo tanto debe facilitarse la entrada de sol en épocas frías y dificultarlas en épocas de calor (mediante aberturas protegidas al sur), evitando en lo posible las orientaciones este y oeste por el exceso de radiación en verano. Las cubiertas y fachadas sobrepuestas y ventiladas refrigeran el edificio en verano.
- En climas mediterráneos de montaña lo principal es protegerse del frio. Se recomiendan las edificaciones compactadas protegidas de los vientos dominantes y con un buen nivel de aislamiento. Es aconsejable el aprovechamiento de la energía solar mediante ventanales al sur que deban protegerse durante la noche mediante el aislamiento interior.

(Asiain, 2003)

CONCLUSIONES

Las edificaciones bioclimáticas están dirigidas a brindar confort a los usuarios con espacios que sean funcionales. Debido a esto, es fundamental la consideración del uso de estrategias bioclimáticas en el desarrollo de los nuevos diseños que sean elaborados en el país, de esta manera se asegura la construcción de espacios que sean amigables con los ecosistemas de las distintas regiones de México, fomentando el ahorro energético y una conciencia ecológica.

Al obtener un mejor aprovechamiento de estas nuevas herramientas y un mejor conocimiento de las necesidades se pueden enfocar posteriormente a proyectos que reflejen una cultura de concientización ecológica y poder lograr así un desarrollo sustentable, dejando atrás los antiguos paradigmas por los que se guían los proyectos arquitectónicos cotidianos, sin dejar de lado la sociedad y a sus individuos.

REFERENCIAS

Asiain, M. L. (27 de Enero de 2003). Estrategias bioclimaticas en la Arquitectura. Obtenido de https://climacusticaparaarquitectos.files.wordpress.com/2011/09/bioclimatica.pdf

EL CLIMA DE LA REPÚBLICA MEXICANA. (s.f.). Obtenido de http://www.funprover.org/Geomatica/PDFs/CLIMAREPMEX.pdf

México y sus regiones . (s.f.). Obtenido de http://www.conevyt.org.mx/colaboracion/colabora/objetivos/libros_pdf/sso1_u3lecc2.pdf

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CERTIFICADORA MEXICANA DE EDIFICIOS SUSTENTABLES

Francisco Javier Cruz Velasco, Iván Oropeza Pérez
Departamento de Arquitectura. Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir, San Andrés Cholula, Puebla, C.P 72810, México,
Tel. 9512320143, **francisco.cruzvo@udlap.mx**

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla la primera versión de una certificadora de edificios sustentables, o edificios verdes, que se adecúa a las condiciones mexicanas, tales como materiales de construcción, diseño arquitectónico, condiciones climatológicas, comportamiento de los usuarios. Además, la certificadora toma en cuenta las normas oficiales mexicanas NOM, así como el Código de Edificación de Vivienda de la Comisión Nacional de la Vivienda (CONAVI) en su parte de construcciones sustentables y el uso de energías renovables. El objetivo del documento es entonces crear una guía metodológica para certificar las edificaciones con normas de calidad locales y así garantizar los principios básicos de sustentabilidad (económicos, medioambientales, sociales y culturales) de los edificios hechos en México.

ABSTRACT

This paper presents the first version of a certification of sustainable buildings or green buildings, according to the Mexican conditions, such as materials of construction, architectural design, weather conditions, and user's behavior. Furthermore, the certification takes into account the official Mexican NOM standards and the Building Code of the Mexican National Housing Commission (CONAVI, initials in Spanish) in its part of sustainable construction and use of renewable energy. The aim of the document is to create a methodological guide to certify buildings with local quality standards and guarantee the basic principles of sustainability (economic, environmental, social and cultural) of the buildings built in Mexico.

Palabras claves: cambio climático, certificación en México, edificación sustentable, metodología de evaluación

INTRODUCCIÓN

La sustentabilidad ha pasado a ser tema del momento, aún sin estar claro qué implica este concepto y si puede ser aplicado en cualquier ámbito. Lo importante es la toma de conciencia ante estos problemas y cómo la arquitectura puede dar respuestas eficientes en un mundo globalizado. (Hernández 2010)

El cambio climático global es actualmente la mayor amenaza que enfrenta la humanidad porque eleva la temperatura promedio del planeta, la cual afecta el ciclo del agua, principalmente, produciendo así desastres naturales al alterar la frecuencia de los fenómenos climatológicos dañando comunidades, cultivos y ecosistemas, generando por lo tanto un desequilibrio ecológico en la tierra.

De acuerdo al INNEC y con base a diferentes modelos matemáticos se puede asegurar que para el año 2100 la temperatura en México aumentará 4 ºC en la frontera con Estados Unidos y en el resto del país aumentará entre 2.5 y 3.5 ºC.

Es 90% probable que el cambio que se observa actualmente en el clima se deba a las actividades humanas (Centro Mario Molina, 2013). Así pues, el objetivo de este proyecto es desarrollar la primera versión de una certificadora de edificios sustentables, crear una metodología que adecúe los parámetros de evaluación a las condiciones específicas mexicanas, tales como materiales de construcción, diseño arquitectónico, condiciones climatológicas y comportamiento de los usuarios tomando como referencia la norma mexicana del año 2013 que trata de edificación sustentable NMX-AA-164-SCFI-2013, así como el Código de Edificación de Vivienda (CEV) de la Comisión Nacional de la Vivienda (CONAVI) y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) en su parte de construcciones sustentables y el uso de energías renovables, todo esto con el fin de generar un desarrollo más consiente sobre nuestras construcciones en las etapas de vida de estas (planeación, funcionamiento y posible demolición) e incentivar en la sociedad prácticas de sustentabilidad y así ayudar a contrarrestar el cambio climático.

En un contexto global, existen países con sistemas de certificación propia, y algunos hasta con dos o más sistemas, en México se ha incrementado el número de certificaciones de edificios sustentables, sin embargo estas son de otros países que no toman en cuenta las normas mexicanas, las condiciones climatológicas, el contexto de la región donde se proyecta y no existe un seguimiento a las construcciones certificadas que asegure el correcto funcionamiento y los resultados esperados de una certificación.

CEMEDÍS 1.0 se crea como base inicial para el desarrollo de una certificadora mexicana de evaluación de edificios sustentables con base en las normas nacionales existentes y proyectadas y las necesidades para que se puedan actualizar y tomar en cuenta para una certificación integral.

Metodología de evaluación

La metodología de evaluación se basa inicialmente en el análisis de tres aspectos a considerar del proyecto: zonas climáticas de México; en el cual se debe identificar el clima del lugar dentro de las cuatro principales regiones climáticas del país (árido, trópico seco, templado y trópico húmedo). En segundo lugar el uso que se le dará al edificio (vivienda, oficinas, escuelas) y el tercer aspecto es un análisis de los usuarios que habitaran estas construcciones. En la Fig.1, se muestran los aspectos antes mencionados así como los tres rubros que se evaluarán: Eficiencia de los recursos, calidad del ambiente interior e inclusión social que a su vez se subdividen en temas que darán al final un puntaje que se graficará para obtener la evaluación.

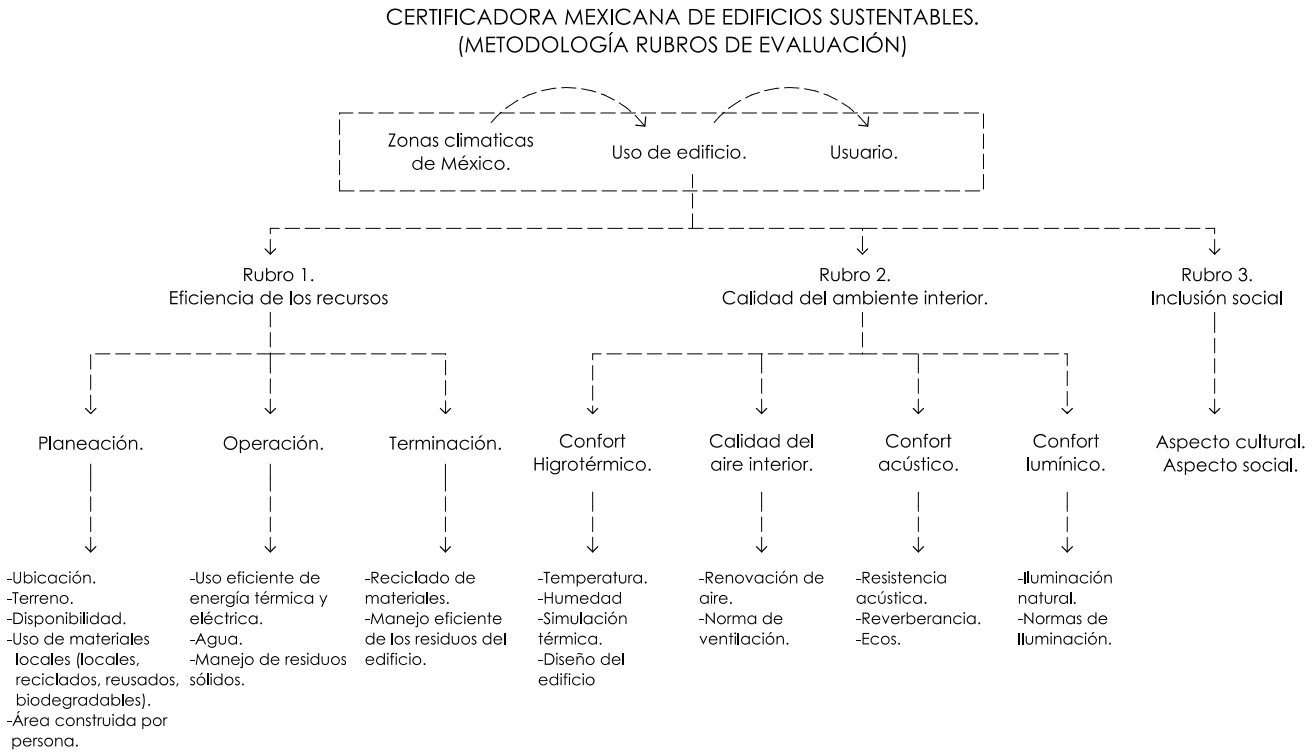


Figura 1. Metodología de evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Eficiencia de los recursos

La energía es un criterio útil para determinar el grado de sustentabilidad de los materiales de construcción elegidos, pero no el único. Hay otros impactos que deben considerarse, como la contaminación del aire y del agua. (Edwards 2010). Este primer rubro trata del manejo eficiente de los recursos, desde la etapa de planeación del proyecto, operación del edificio y terminación del mismo.

En la etapa de planeación y en la de operación con los temas señalados en la Fig. 1 se pueden alcanzar en cada uno hasta treinta y cinco puntos. La ponderación de puntajes por temas se encontrará en el anexo a este artículo que se basa en la NMX-AA-164-SCFI-2013, el CEV y el ONNCCE.

Una gestión de la obra que sea respetuosa con el medio ambiente y la ejecución correcta de ciertos aspectos de trabajo pueden mejorar notablemente el rendimiento del edificio. (Hernández Pezzi, 2014). En la etapa de terminación se pueden obtener hasta treinta puntos.

Calidad del ambiente interior

El confort es esencial para la creación de ambientes humanos saludables. Necesitamos sentirnos cómodos, tener luz suficiente y libre de deslumbramientos y lograr el equilibrio correcto entre humedad y ventilación. Los ambientes saludables suelen basarse en una iluminación, una ventilación y unos materiales naturales (Edwards 2010).

Este segundo rubro se divide en cuatro temas que tienen que ver con este sentido natural del ser humano de sentirse confortable dentro de los espacios construidos: confort térmico, calidad del aire interior, confort acústico y confort lumínico; los requerimientos mínimos que debe existir dentro de los edificios acerca de estos temas y que influyen indiscutiblemente en la salud física y emocional de los usuarios.

El tema de confort higrotérmico (temperatura y humedad relativa) se divide en cuatro requisitos que son: temperatura, humedad, simulación térmica y diseño del edificio puede alcanzar hasta treinta puntos.

La calidad del aire interior viene determinada por la calidad del aire en el exterior del edificio, las emisiones de contaminantes en el interior y el caudal de ventilación, así como por la eficacia de los sistemas de filtración y el grado de mantenimiento de las instalaciones mecánicas o de otro tipo (Hernández Pezzi, 2014).

Es importante siempre procurar una buena calidad del aire interior ya que los efectos de la mala calidad del aire dentro del edificio tiene consecuencias sobre la salud humana provocando malestares y enfermedades sobre todo de las vías respiratorias, este tema puede alcanzar hasta veinte puntos y como requisitos son que exista una renovación de aire dentro los espacios así como una correcta ventilación.

El tercer tema de evaluación trata de la acústica que deben tener las construcciones y que va definido desde las necesidades que se requieren para realizar actividades humanas cotidianas como la concentración, escuchar, conversar, leer, dormir y exigen ciertos niveles de ruido, que mediante el proyecto podemos resolver mediante estándares en los requisitos de resistencia acústica, tiempos de reverberancia; este tema puede alcanzar hasta veinte puntos.
La luz natural es beneficiosa para la salud y su carencia puede causar depresión, enfermedades, y trastornos del sueño y de concentración. (Hernández Pezzi, 2014). El confort lumínico es el último tema de este rubro y donde se analiza el aprovechamiento en los edificios de la máxima iluminación natural posible en los espacios a través de las normas que señalan la cantidad de iluminación que debe existir, este tema puede alcanzar hasta treinta puntos.

Inclusión social.
Este rubro se divide en dos temas que son: aspecto sociocultural, en el cual se podrán obtener hasta diez puntos según si el proyecto aporte un beneficio a su entorno inmediato integrándose al contexto, generando cohesión entre la población, ayudando a los problemas de la comunidad, respetando la cultura local y generando prácticas sustentables. El segundo tema también tiene un alcance de diez puntos y trata de monitorear en años consecuentes a la certificación los resultados y ahorros que generen los edificios sustentables, en la Fig. 2 se muestra la puntuación máxima que se puede obtener por cada uno de los tres rubros a evaluar.

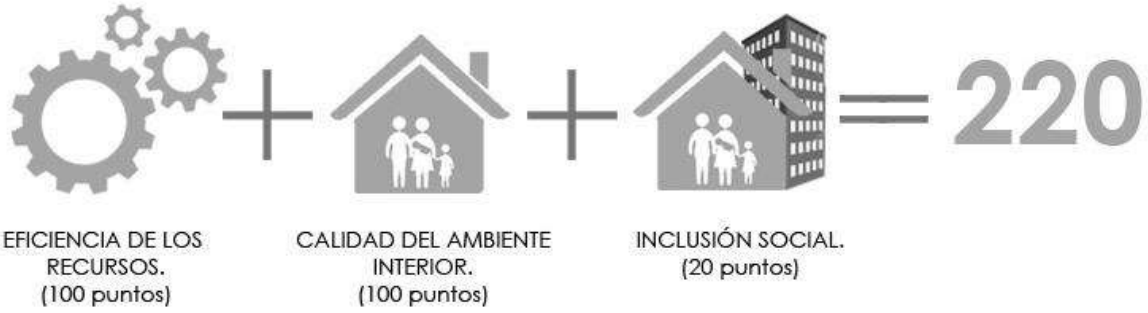


Figura 2. Suma y puntuación máxima por rubro. Fuente: Elaboración propia

Hablar de sustentabilidad comporta utilizar cálculos numéricos, vectores en relación con los objetivos, mediciones que se han de ir actualizando y replanteando continuamente. (Montaner 2015)
Se busca entonces cuantificar la sustentabilidad mediante el proceso de certificación dando como máximas puntuaciones para el rubro de eficiencia energética y calidad del ambiente interior cien puntos, esto con el fin de poder evaluar por separado, graficar y calificar en una escala del 1 al 10 estos dos rubros; para el rubro de inclusión social se podrán contar hasta veinte puntos. En la Fig. 3 se muestran los temas dentro de cada rubro y las puntuaciones máximas que se pueden otorgar.
La arquitectura moderna acabó en la década de 1960 potenciando una cultura de consumo, unos edificios con climatización artificial, unas formas demasiado definidas y un vocabulario abstracto, restringido y simplificado en contradicción con los que, posteriormente, han sido los criterios de una arquitectura versátil y resiliente, acorde con el medio ambiente y que se ha tenido que replantear para ser sustentable. (Montaner 2015). Este replanteamiento en la arquitectura nos ha llevado a certificar las construcciones como aportación al problema global del cambio climático, en la Fig.4 se muestra el resumen general de Cemedís siendo una sociedad civil la institución responsable y encargada de llevar a cabo los procesos de este proyecto: el confort humano, y en algunos casos la supervivencia han dependido de la habilidad con que los edificios y los lugares se han adaptado al medio ambiente climático, la ciudad moderna ha tenido más impacto, en este medioambiente, con respecto a las condiciones de vida y actitudes, que cualquier otra época. (Houng 1995) los tipos de edificio evaluados si son nuevas o construcciones existentes, del tipo residencial, espacios para escuelas u oficinas, los criterios generales de certificación o los tres rubros que se mencionaron anteriormente con sus puntuaciones, así como los niveles de certificación y los tres sellos de certificación: EDÍS I que se obtendrá con un alcance de 105 hasta 140 puntos, EDÍS II de 141 a 175 puntos y EDÍS III de 176 hasta los 220 puntos posibles.
Cada proyecto arquitectónico debe plantear una atmosfera propia para el espacio interior con un entorno bien climatizado y pensado para la existencia y confort humano; y los espacios exteriores deben potencializar relaciones de simbiosis con el contexto, la voluntad final sería la de construir una especie de biosfera desde la que gestionar con eficacia los recursos energéticos nos genere una buena calidad de vida.

RESUMEN DE RUBROS, TEMAS Y PUNTUACIONES MAXIMAS	
	PUNTOS
Rubro 01 EFICIENCIA DE LOS RECURSOS.	100
Ubicación	8
Terreno	6
Disponibilidad	6
Uso de materiales	7
Área proyectada por persona	8
PLANEACION	35
Uso eficiente de energía térmica	9
Uso eficiente de energía	9
Manejo de residuos sólidos	8
Agua	9
OPERACIÓN	35
Reciclado de materiales	15
Manejo eficiente de los residuos	15
TERMINACIÓN	30

	PUNTOS
Rubro 02 CALIDAD DEL AMBIENTE INTERIOR.	100
Temperatura.	8
Humedad	7
Simulación térmica	8
Diseño del edificio.	7
CONFORT TÉRMICO	30
Renovación del aire y ventilación	20
CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	20
Resistencia acústica	20
CONFORT ACÚSTICO	20
iluminación natural	15
Iluminación artificial	15
CONFORT LUMÍNICO	30

	PUNTOS
Rubro 03 INCLUSIÓN SOCIAL.	20
Aspecto Socio Cultural	20

Rubro 01 EFICIENCIA DE LOS RECURSOS.	100
Rubro 02 CALIDAD DEL AMBIENTE INTERIOR.	100
Rubro 03 INCLUSIÓN SOCIAL.	20

Figura 3. Resumen de rubros, temas y puntuaciones máximas.
Fuente: Elaboración propia

Nombre de certificación	Alcance	Institución responsable	Tipos de edificios evaluados	Criterios generales de certificación	Niveles de certificación
CEMEDIS 1.0 (Certificadora Mexicana de edificios Sustentables) CEMEDIS CERTIFICADORA MEXICANA DE EDIFICIOS SUSTENTABLES	México	Sociedad civil.	Nuevas y existentes construcciones del tipo residencial, escuelas, oficinas.	Rubro 1. Eficiencia de los recursos en : -Planeación -Operación -Terminación. Rubro 2. Calidad del ambiente interior. -Confort Higrotérmico -Calidad del aire interior. -Confort acústico. -Confort lumínico Rubro 3. Inclusión social -Aspecto cultural. -Aspecto social.	CEMEDIS utiliza créditos para cada uno de los rubros Con la obtención de los puntos totales se obtendrá la calificación final del 1 al 10 y se graficará cada rubro para conocer la calificación individual de cada rubro. Se identificaran las construcciones con el sello EDIS. EDIS De 105 a 140 puntos EDIS De 141 a 175 puntos EDIS De 176 puntos en adelante.

Figura 4. Resumen de certificación CEMEDÍS.
Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El desarrollo de un país debe ser necesario, generando respuestas a la sociedad en el cumplimiento de sus derechos como ser humano: educación y vida digna, podemos concluir este trabajo como una reflexión hacia un camino consciente de este desarrollo en el que se busca dejar una huella en la arquitectura, una huella no de reconocimientos personales, sino una aportación real hacia nuestras vidas como personas que construimos, habitamos, rodeamos las edificaciones donde pasamos la mayor parte del tiempo, una huella positiva hacia este medio ambiente que se deteriora cada vez más y a la vez generando un desarrollo social y económico.

Esta certificadora busca implementar prácticas sustentables en las construcciones demostrando los beneficios que traen consigo estas, adaptándose a las normas nacionales, a los usuarios y al tipo de edificio para el propósito que será construido, implementando rubros y temas que otras certificadoras no toman en cuenta como el confort acústico y lumínico, el aspecto social contextualizado en México.

Obteniendo como ventajas en el método de certificación de CEMEDIS 1.0 una evaluación a detalle dentro de cada rubro para identificar fácilmente las practicas sustentables que se están utilizando y aprovechando en mayor cantidad y cuales se podrían implementar o reforzar con el fin de alcanzar una mayor sustentabilidad.

Las certificaciones que se realicen deben contar con un monitoreo de los sistemas propuestos tiempo después de ser evaluados y después de tres años se tendrá que recertificar o perderá el sello de la certificadora esto con el fin de alcanzar los beneficios de construir de esta manera y garantizar su correcto funcionamiento que es la etapa de operación la más larga e importante de las tres etapas del ciclo de vida del edificio, su impacto hacia el medio ambiente, hacia la sociedad y hacia la economía del lugar donde se ubique.

REFERENCIAS

Hernández Pezzi Carlos, (2014) Un Vitruvio ecológico, Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Gustavo Gili Barcelona.

D.K, Ching Francis (2014) Arquitectura Ecológica, un manual ilustrado. Gustavo Gili Barcelona.

Código de Edificación de Vivienda (CEV) (2010) de la Comisión Nacional de la Vivienda (CONAVI)

INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2013). Evidencias del cambio climático.

Norma mexicana de edificación sustentable NMX-AA-164-SCFI-2013

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE)

Montaner, Josep María (2015). La condición contemporánea de la arquitectura. Gustavo Gili. Barcelona.

Edwards, Brian (2008) Guía básica de la sostenibilidad. Gustavo Gili Barcelona.

Sergi Costa Duran, Hevia Hernández Guillermo. (2010) Viviendas ecológicas. Reditar Libros España

Montaner, Josep María (2015). Arquitectura y política. Gustavo Gili. Barcelona.

Houng Michael (1995) Naturaleza y ciudad, planificación urbana y procesos ecológicos, Gustavo Gili, Barcelona.

Montaner, Josep María (2015). Sistemas arquitectónicos contemporáneos (2008). Gustavo Gili. Barcelona.

SEDESOL, Secretaria de desarrollo social (2012) Programa HÁBITAT

Molina, Mario (2013) ¿Qué es el cambio climático? URL:http://centromariomolina.org/cambio-climatico/temas/educacion-en-cambio-climatico/ (Consultado: abril 2016.)

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DE EFECTOS DE BLOQUEO EN UN CANAL DE AGUA ABIERTO PARA ESTUDIOS DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICACIONES

Sonny F. Díaz[a,b], J. Antonio Castillo[a] y Guadalupe Huelsz[a]
a) Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México A. P. 34, 62580 Temixco, Mor., México.
Tel/Fax 55+56-22-97-41, **sfdc@ier.unam.mx**, **jacat@ier.unam.mx y ghl@ier.unam.mx**
b) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, A.P. 50, Mérida, Yuc., México.
Tel/Fax 999+ 930-05-50

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio numérico de los efectos de bloqueo en un canal de agua abierto. El modelo numérico fue validado con experimentos realizados en un canal abierto de agua usando una maqueta a escala de una habitación con una ventana y un intercambiador de viento en el techo, reportado previamente. En el estudio numérico se utilizaron dos modelos de la habitación a escala, se usaron las condiciones experimentales en el canal de agua, condiciones numéricas recomendadas con un dominio a una distancia de las paredes laterales 5 veces la altura de la habitación (5h) y un dominio similar con la distancia 10h. Con esto se varía la razón de bloqueo entre 0.8 y 13.8%. Los resultados de velocidad normalizada y flujo volumétrico normalizado a través de la ventana obtenidos en esta investigación indican que podrían existir efectos de bloqueo que son dependientes de otros parámetros y no solo de la razón de bloqueo como se ha reportado en la literatura para cuerpos sólidos sin rotación.

ABSTRACT

This paper presents a numerical study of the blocking effects in an open water channel. The numerical model was validated with experiments in an open water channel using a scale model of a room with a window and a windexchanger on the roof, previously reported. In the numerical study two models of the room scale were used, the experimental conditions used in the water channel, numerical conditions with the recommended domain, having a distance from the side walls with 5 times the height of the room (5h) and a similar domain with distance 10h. With these conditions, the blockage ratio varies reason between 0.8 and 13.8%. The results of the normalized speed and normalized volumetric flow through the window obtained in this investigation indicate that there might be blocking effects that are dependent on other parameters and not only on the blockage ration as reported in the literature for solid bodies without rotation.

Palabras claves: Efectos de bloqueo; Razón de bloqueo; Canal de agua; Ventilación Natural; Intercambiadores de viento; SPIV; CFD.

INTRODUCCIÓN

La ventilación natural se produce por la diferencia de presiones entre las entradas y salidas de aire de una edificación. Estas diferencias pueden generarse por dos mecanismos: por la fuerza del viento, en otras palabras por efecto del flujo del viento, o por diferencia de temperaturas, es decir por efecto térmico (Ghiabaklou, 2010). La ventilación natural por efecto del flujo del viento, estudiada en este trabajo, ocurre cuando el viento incide en una de las caras de la edificación, llamada barlovento, produciendo una presión positiva relativa con respecto a la pared en dirección opuesta, llamada sotavento, provocando que el aire dentro de la edificación fluya (Ghiabaklou, 2010). Experimentalmente se utilizan modelos a escala reducida de edificaciones en zonas de prueba de túneles de viento o canales de agua capaces de reproducir (a pequeña escala) la capa límite atmosférica (CLA). La CLA se define como la zona de influencia de la superficie terrestre sobre la velocidad del viento (Etheridge, 2012).

Los efectos de bloqueo se definen como el incremento de velocidad alrededor de cuerpos sólidos en una zona confinada y se dividen en bloqueo por sólidos (cuerpos rígidos sin rotación) y bloqueo por estelas (rotación de cuerpos rígidos) (Ross y Altman, 2011). En el caso de estudios de ventilación natural por viento en edificios (cuerpos rígidos sin rotación), el efecto de bloqueo por estelas no existe. Los efectos de bloqueo pueden tener un impacto importante en los resultados de estudios experimentales de ventilación natural realizados en túneles de viento o canales de agua; debido a que se puede sobre estimar la magnitud de la velocidad y otros parámetros que dependan de esta. La razón de bloqueo (BR, por sus siglas en inglés) es el parámetro más utilizado en el estudio de los efectos de bloqueo, esta se define como la razón entre las áreas normales al flujo del modelo y de la zona de prueba. En experimentos en túnel de viento, algunos

autores recomiendan un valor máximo de BR=10% para que los efectos de bloqueo sean despreciables (Biswas et al., 2007; Roy y Saha, 2014; Chio y Kwon, 1998), mientras que autores consideran este valor máximo como 5% (Modi y Fernando, 1989; Ross y Altman. 2011; Montazeri y Azizian, 2008). En experimentos en canales de agua, algunos autores recomiendan un valor máximo de BR=10% (Kolekar y Banerjee, 2015; McTavish et al., 2014).

En estudios de efectos de bloqueo para prismas y edificaciones (Choi y Kwon, 1998; Chakrabarty y Brahma, 2007; Tang y Wang, 2013) no se presenta una metodología o correlaciones de corrección para los resultados experimentales. En el estudio de Tang y Wang (2013), el único encontrado sobre efectos de bloqueo en edificaciones y realizado en un túnel de viento, los modelos, aunque tienen una BR<10%, presentan efectos de bloqueo en sus resultados, esto podría deberse a que no se tengan condiciones de similitud dinámica en los experimentos, los autores no especifican este punto. En el presente estudio se analiza numéricamente el efecto de bloqueo variando la razón de bloqueo en una zona de prueba de un canal abierto de agua (CAA), mediante el uso de un modelo numérico validado con resultados experimentales de una habitación con una ventana y un intercambiador de viento (IDV) en el techo (Cruz-Salas et al., 2014; Castillo et al., 2014).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El arreglo experimental se compone de un CAA, los modelos a escala de la habitación y el sistema de medición de velocimetría por imágen de partículas estereoscópico (SPIV, por sus siglas en inglés). El CAA se encuentra en el Laboratorio de Termociencias del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Sus dimensiones son 6.00 m de largo, 0.50 m de altura y 0.315 m de ancho. La zona de prueba tiene un largo de 1.00 m, empezando a los 4.00 m después de la entrada de agua. El CAA tiene un sistema de tuberías para recircular el agua impulsada por una bomba de 4 HP y un depósito con capacidad de 1800 l. La entrada del canal es una caja de sedimentación útil para reducir la turbulencia vertical y transversal al flujo y homogeneizar la velocidad. Una rampa curvada se coloca al final del canal para mantener una profundidad de agua constante de 0.42 m y reducir la influencia en la zona de prueba. Se utilizaron dos modelos de una habitación con ventana y un IDV instalado en el techo. La configuración del IDV se compone de dos aberturas cuadradas perpendiculares a la dirección del viento, sin divisiones internas, modelo B0 en los estudios de Cruz-Salas et al. (2014) y Castillo et al. (2015). El primero con una escala de 1/25 (modelo B25) con BR=13.8% y el segundo de 1/50 (modelo B50) con BR=3.5%. Estos modelos están construidos de acrílico transparente y representan a escala real una habitación con área interna de 3.00 m × 3.00 m y una altura interna de 2.70 m, teniendo una ventana cuadrada de 1.30 m por lado, centrada en el eje vertical y a una altura de 0.90 m desde la base en una de las caras. El IDV en escala real tiene una altura de 1.40 m medido desde el techo y tiene una sección transversal cuadrada de 0.65 m por lado. El sistema SPIV fue utilizado para medir las tres componentes de velocidad en el plano central del flujo en el modelo a escala de la habitación. El sistema está compuesto por una fuente de luz laser de doble pulso tipo Nd-YAG con óptica integrada para la formación del plano de luz en la zona de prueba, dos cámaras digitales de alta definición Nikon AF NIKKOR 50mm 1:1.4 D y el controlador electrónico de alta precisión LaVision VC-ImagePro 2M. Se tomaron un total de 90 campos de velocidad para el modelo B25 y 100 campos de velocidad para el modelo B25, todos con un intervalo de 0.04 s entre pulsos. Se promediaron los campos de velocidad para obtener un campo promedio que represente las estructuras que se forman independientes del tiempo.

Las longitudes de los dos modelos están referidos al mismo edificio en escala real, por lo que tienen similitud geométrica. Dadas las condiciones de cada experimento, en los dos modelos (B25 y B50) se buscó el mismo número de Reynolds, definido como $Re=UL/\nu$, donde U es la velocidad característica del fluido a la longitud característica L, que en estos experimentos es la altura del edificio, y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Para el cálculo de Re correspondiente al modelo se midió la temperatura del agua en el CAA al momento de la toma y así calcular el valor de ν. Se obtuvo una diferencia del 0.34% entre los Re de los dos modelos, por lo que se considera que ambos experimentos tienen similitud dinámica.

Los perfiles de velocidad de flujo como función de la altura, $u(z)$, obtenidos en la zona de prueba del CAA corresponden en la escala real a una CLA de una zona urbana. Para la generación de los perfiles se utilizó una serie de obstáculos verticales colocados desde la entrada del CAA (Cruz-Salas et al., 2014). El ajuste para los datos experimentales está dado por la expresión (Tominaga et al., 2008),

$$u(z) = U_r \left(\frac{z}{h}\right)^{\alpha}, \tag{1}$$

donde z es la altura, U_r es la velocidad de referencia a la altura de referencia h y α es el exponente que puede variar entre 0.30 y 0.40 para un perfil de una zona urbana (Buñuelos-Ruedas et al., 2010). Se obtuvo una diferencia del 5.60% entre los exponentes α de ambos modelos (B25 y B50). Ambos perfiles de velocidad se muestran en la figura 1. El perfil de la intensidad de turbulencia como función de la altura, $I(z)$, está calculado de acuerdo a (Tominaga et al., 2008; Ramponi y Blocken, 2012),

$$I(z) = \frac{k(z)^{1/2}}{u(z)}, k(z) = \frac{1}{2}\left(\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)\right), \tag{2), (3}$$

donde k es la energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés) y σ_u, σ_v y σ_w son las desviaciones estándar de las componentes de la velocidad en las direcciones x, y y z, respectivamente. Los valores de los perfiles de velocidad y número de Reynolds se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los perfiles de velocidad y número de Reynolds.

Modelo	B25	B50	DP[%]
$U_r[m/s]$	0.0360 ± 0.0050	0.0785 ± 0.0140	-
$h[m]$	0.1230	0.0615	-
$\alpha[-]$	0.320 ± 0.003	0.340 ± 0.004	5.60
$R^2[-]$	0.910	0.964	-
$T[°C]$	23.0 ± 0.05	20.0 ± 0.05	-
$\nu[m^2/s]$	9.370×10^{-7}	1.004×10^{-6}	-
$Re_b[-]$	$4.72 \times 10^3 \pm 0.66 \times 10^3$	$4.71 \times 10^3 \pm 0.86 \times 10^3$	0.34

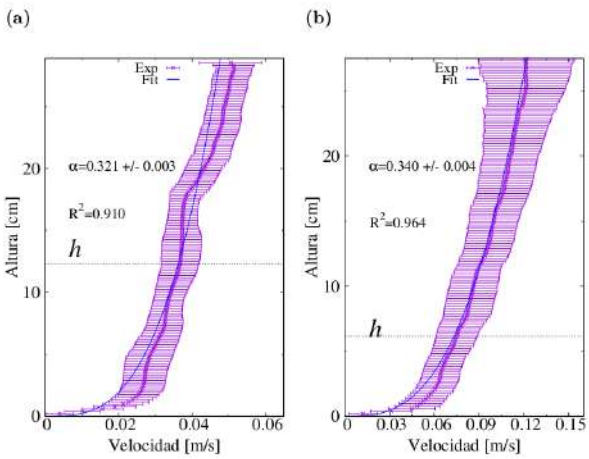


Figura 1. Perfil de velocidades como función de la altura (a) modelo B25 y (b) modelo B50. Donde α es el exponente del perfil y R^2 el coeficiente de correlación de ajuste.

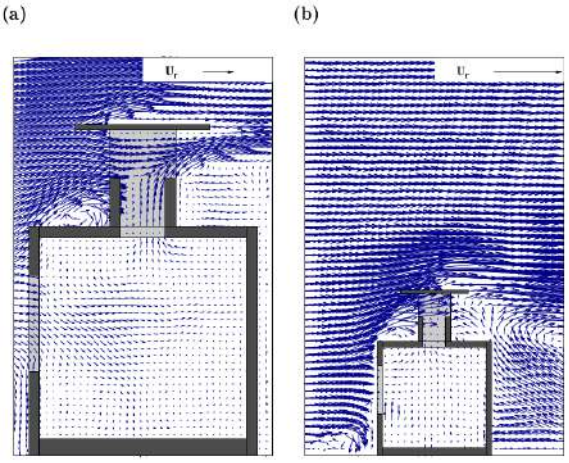


Figura 2. Campo vectorial promedio de velocidades (a) modelo B25 y (b) modelo B50.

Se utilizaron dos parámetros de comparación para el estudio experimental de los efectos de bloqueo en el CAA. El primero es la velocidad a lo largo de la línea horizontal L_h que a escala real se encuentra a 1.55 m (la mitad de la ventana) medido desde el piso. Todas las velocidades fueron normalizadas con la U_r respectiva al modelo. El segundo parámetro es el flujo volumétrico de entrada a través de la ventana Q^*, normalizado con el producto de U_r y el área de la ventana respectivos al modelo. En la figura 2a se muestra el campo de velocidad promedio para el modelo B25. Se observa que el flujo que entra por la ventana se dirige a la parte inferior de la habitación generando dos vórtices en las esquinas, siendo mayor el de la esquina derecha, también se observa que una parte del flujo que entra por la ventana llega hasta la pared contraria, asciende y cambia de dirección para finalmente salir por el IDV. Para el modelo B50, la figura 2b muestra el campo de velocidad promedio. En la parte central del modelo se observan velocidades ascendentes que inician desde zonas muy pegadas al piso. Estas velocidades ascendentes solo se pueden explicar si se considera que la medición no se hizo exactamente en el plano central del modelo y que se está observando el flujo ascendente proveniente de un vórtice que se formó al entrar el flujo por la ventana y chocar con el piso. Posiblemente el modelo B50, que es pequeño, fue desalineado por el flujo del canal en el momento de realizar los experimentos. Con los resultados experimentales no es posible estudiar los efectos de bloqueo, por lo que este estudio se realizó mediante simulaciones numéricas, que fueron validadas con los experimentos del modelo B25.

VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Las simulaciones numéricas con dinámica fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) fueron realizadas con el software comercial COMSOL 5.2, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones en conjunto con el modelo de turbulencia *shear-stress transport* SST *k-ω*. Los parámetros, condiciones de frontera y mallado se tomaron de un trabajo de validación numérica previo (Castillo et al. 2014). Se utilizó un solucionador de GMRES con MULTIGRID-SOR para los términos viscosos de las ecuaciones gobernantes (COMSOL, 2010). Se utilizó un criterio de convergencia de 10^{-4} para los residuales. En las simulaciones se utilizó agua como fluido de trabajo para conservar la similitud dinámica con los experimentos. Para la validación del modelo numérico se generó la capa límite atmosférica tridimensional para el modelo B25, mediante la construcción del dominio del canal con obstáculos sin la presencia de la habitación a escala, tomando como valores de entrada al dominio computacional los perfiles experimentales de *u(z)*, *TKE(z)* y de razón de disipación específica (SDR, por sus siglas en inglés). Se compararon los valores en el plano central de los tres perfiles tridimensionales obtenidos numéricamente en la zona de prueba con el correspondiente perfil experimental. La diferencia entre los valores experimentales y numéricos fue menor al 5% .Una vez obtenida la CLA tridimensional, se generó un dominio computacional corto (DCC) que representa el ancho (W=0.315 m) y el alto (H=0.420 m) de la sección transversal del volumen de agua contenido en el CAA. El largo del DCC se obtuvo siguiendo las recomendaciones de Ramponi y Blocken (2012), esto es, se consideró la distancia de la entrada del dominio a la cara a barlovento de la habitación a escala como 3h, en donde h es la altura externa de la habitación, y se consideró la distancia de la cara a sotavento de la habitación a la salida del dominio como 15h. Por lo que el largo del canal del DCC es 3h + b + 15h, b es el largo de la habitación a escala. En la figura 3 se muestran las dimensiones del DCC y la construcción del mallado base con 527,537 células.

En el DCC generado se tomó como condición de entrada los perfiles tridimensionales de capa límite atmosférica de *u*, *TKE* y *SDR* obtenidos. Se aplicaron las funciones de pared estándar a las caras inferior y laterales del dominio (COMSOL, 2010). A la cara de salida se asignó una presión igual a cero y en la cara superior se aplicó la condición de libre deslizamiento. En la figura 4 se muestra la comparación cualitativa entre los campos vectoriales de velocidad experimental y numérico en el plano central de la habitación. Se observa similitud en los resultados, el resultado numérico reproduce la estructura promedio del flujo. Se observa que una parte del flujo que entra por la ventana desciende hacia el piso de la habitación y asciende al llegar a la pared posterior hasta salir por el IDV. También se observa que otra parte del flujo entrante asciende directo al IDV. En los resultados numéricos no se definen los vórtices en la parte inferior de la habitación observados en el campo vectorial experimental. En la figura 5 se muestra la comparación de la velocidad a lo largo de la línea L_h entre los resultados experimentales y los obtenidos de la simulación. Se observa que los resultados numéricos y los experimentales son similares en la parte exterior a la habitación, cerca de la ventana los valores experimentales no son confiables por los

reflejos en la pared, en la parte interior los resultados numéricos son menores a los experimentales, por lo que el modelo numérico tiende a subestimar los valores de velocidad a lo largo de la habitación.

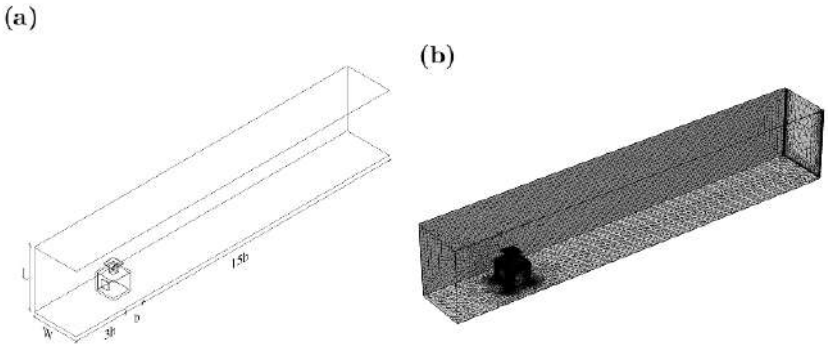


Figura 3. Dominio computacional del modelo B25: (a) vista en perspectiva del dominio; (b) vista en perspectiva del mallado en las caras baja, lateral y trasera (malla base con 527,537 células).

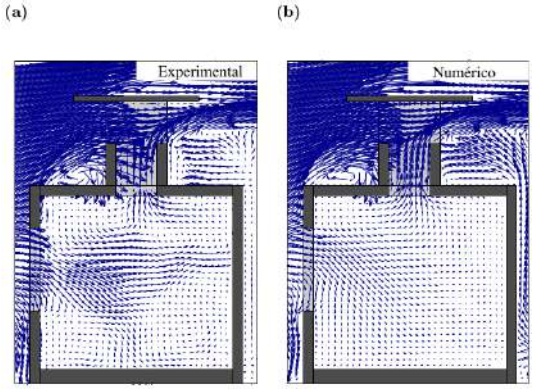


Figura 4. Campos vectoriales de velocidad en el plano central: (a) experimental y (b) numérico.

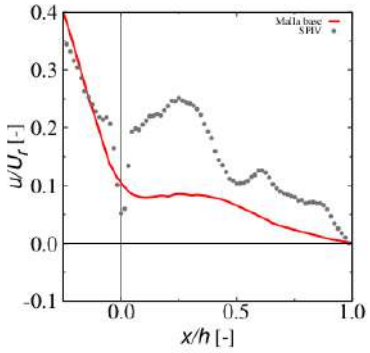


Figura 5. Comparación de resultados numéricos de la malla base con las mediciones experimentales, datos normalizados con U_r y a lo largo de L_h.

ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS EFECTOS DE BLOQUEO

Para este estudio se generaron DCC correspondientes a los experimentos de los modelos B25 y B50 (el del modelo B25 se usó para la validación). También se generaron DCC en los que se varió el ancho pero se mantuvieron la altura (L) y el largo (3h + b + 15h). El ancho del dominio está dado por Fh + b + Fh, donde F es el factor de confinamiento, h es la altura de la habitación y b es el ancho de la habitación. Se utilizó el valor de F=5, que corresponde a la recomendación de Ramponi y Blocken (2012) para obtener resultados libres de los efectos de bloqueo. Para confirmar si esta recomendación es aplicable en el fenómeno estudiado se realizaron las mismas simulaciones con F=10. Esquemas de los dominios computacionales usados se muestran en la figura 6. El modelo B25 con las condiciones experimentales (B25-E) tiene BR=13.8%, con el factor F=5 (B25-5h) BR=3.2% y con F=10 (B25-10h) BR=1.7%. El modelo B50 con las condiciones experimentales (B50-E) tiene BR=3.5%, con F=5 (B50-5h) BR=1.6% y con F=10 (B50-10h) BR=0.8%.

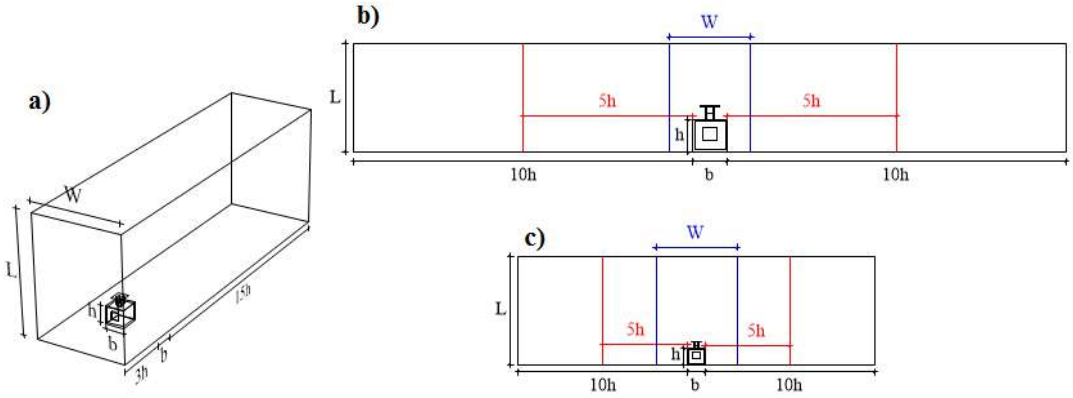


Figura 6. Dominios computacionales cortos generados para el estudio de los efectos de bloqueo. (a) vista en perspectiva del dominio B50-E; (b) corte transversal de los dominios B25 y (c) B50. En azul –E, en rojo -5h y en negro -10h.

Para el análisis de los efectos de bloqueo se realizó la comparación de la velocidad normalizada en la línea horizontal L_h en el plano central de cada uno de los modelo. En la figura 7a se muestra la comparación entre los valores de velocidad obtenidos para el modelo B25, la diferencia promedio entre los dominios B25-E y B25-5h es de 0.0341, entre B25-E y B25-10h es de 0.0300, mientras que la diferencia entre B25-5h y B25-10h es de 0.0040, lo que es un orden de magnitud menor. Para el modelo B50 se realizaron las mismas comparaciones. En la figura 7b se muestra la velocidad normalizada en la línea L_h, la diferencia entre B50-E y B50-5h es de 0.0092, entre B50-E y B50-10h es de 0.0104 y entre B50-5h y B50-10h la diferencia es de 0.0013. Se realizó la misma comparación para dos BR cercanos correspondientes a diferentes modelos, el dominio B25-5h con BR=3.2% y el dominio B50-E con BR=3.5%, presentan una diferencia promedio de 0.0137, la figura 8 muestra esta comparación. La diferencia es significativa comparada con la diferencia obtenida con B50-5h y B50-10h, señalando que BR podría no ser el único parámetro del que dependen los efectos de bloqueo. Para tener una estimación del error en la velocidad normalizada en L_h obtenida con los dominios E y 5h con respecto a la obtenida en el dominio 10h, se realizaron las gráficas presentadas en la figura 9. La pendiente de las líneas rectas que pasan por el origen indica el porcentaje de error. La recta con pendiente igual a uno representa 0% de error y conforme la pendiente aumenta o disminuye porcentualmente los valores de la pendiente, se van obteniendo las cotas del porcentaje de error. Se acotaron errores de 10%, 25%, 50% y 100%. En la figura 9a se muestran los valores para el modelo B25. Se observa que en general a medida que la velocidad disminuye el error aumenta sobrepasando el 100%, mientras que para los mayores valores de velocidad el error disminuye. La mayoría de las velocidades del dominio B25-E sobrepasan el 100%, mientras que las velocidades de B25-5h están más próximas a la recta del 0%. En la figura 9b se muestran los valores para el modelo B50. Se mantiene la tendencia de disminución de error conforme la velocidad aumenta. Los resultados de B50-5h se encuentran prácticamente sobre la recta del 0% de error, por lo que pueden considerarse libre de los efectos de bloqueo. La comparación entre ambas gráficas muestra que los dominios del modelo B25 tienen errores mayores a los del modelo B50. Para la obtención de resultados libres de bloqueo se realizó la comparación entre la velocidad normalizada medida en L_h para los dominios B25-10h y B50-10h, mostrada en la figura 10, las cuales presentan una diferencia promedio de 0.0044. Esta diferencia es mayor a la presentada entre B25-5h y B25-10h y B50-5h y B5010h. De acuerdo con este parámetro solo se puede considerar B50-10h como libre de los efectos de bloqueo. Se realizó un estudio del flujo a través de la ventana para cada uno de los modelos. Se calculó el flujo volumétrico multiplicando el área de la ventana por el promedio en el área de la ventana de la velocidad normal a la ventana. Se reporta el flujo volumétrico normalizado (Q^*), se normaliza con el producto del área de la ventana por U_r. En la figura 11 se muestra Q^* en función de BR. Para el modelo B25, Q^* presenta dependencia con BR para los valores analizados, en cambio para el modelo B50, Q^* no presenta dependencia con BR para los valores analizados. Se observa que valores de BR cercanos correspondientes a diferentes modelos no tienen el mismo valor de Q^*, por ejemplo BR=3.2% obtenido con B25-5h presenta una diferencia del 11.7% con el resultado de BR=3.5% obtenido con B50-E. Esto indica que BR podría no ser el único parámetro del que dependen los efectos de bloqueo. El valor de Q^* libre de los efectos de bloqueo es de 0.0615. El máximo error en Q^* es de 20.4% para BR=13.8% obtenido con B25-E.

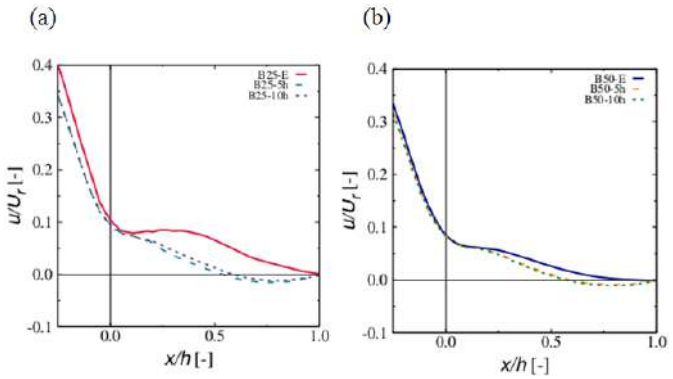


Figura 7. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para: (a) dominios del modelo B25; (b) dominios del modelo B50.

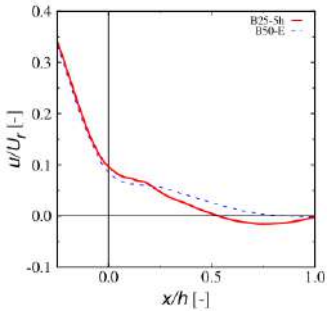


Figura 8. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para los dominios B25-5h (BR=3.2%) y B50-E (BR=3.5%).

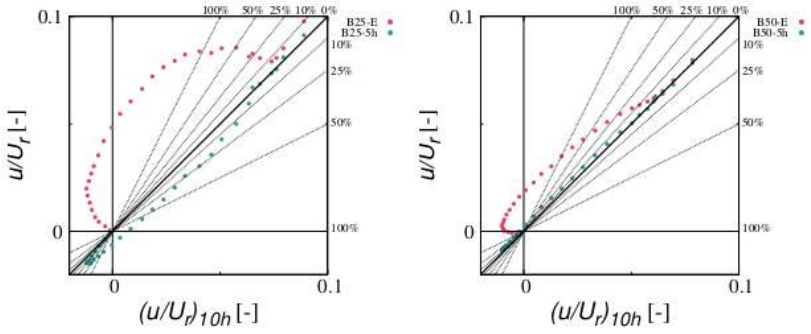


Figura 9. Error en la velocidad normalizada en L_h obtenida con los dominios –E y -5h con respecto a la obtenida en el dominio -10h: (a) modelo B25 y (b) modelo B50.

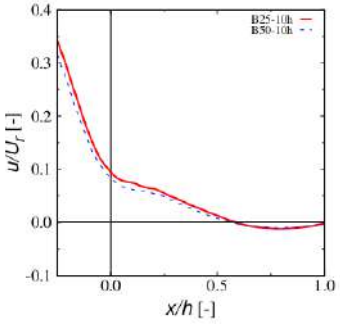


Figura 10. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para los dominios B25-10h y B50-10h.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el estudio de los efectos de bloqueo en un canal de agua abierto utilizado para investigar la ventilación natural por flujo de viento en una habitación a escala con una ventana a barlovento y un intercambiador de viento instalado en el techo. En el estudio se comparó la velocidad normalizada en una línea de interés y el flujo volumétrico normalizado de entrada a través de la ventana. Se utilizaron experimentos a escala de laboratorio y simulaciones numéricas utilizando dos modelos a escala, uno a 1/25 (B25) y uno a 1/50 (B50). De los resultados experimentales, el campo de velocidades medido en el modelo B50 no representa la dinámica del flujo esperado para un plano central, por lo que solo se utilizaron los resultados del modelo B25 para la validación de las simulaciones numéricas. El estudio de los efectos de bloqueo se realizó con las simulaciones numéricas modificando la distancia entre las caras laterales del dominio. La comparación de resultados numéricos de velocidad normalizada en una línea de interés entre dominios B25, B50 y B25-5h presentan errores mayores al 100% con respecto al correspondiente dominio 10h de cada modelo, solo el dominio B50-5h presenta un error menor al 10% en casi toda la línea de interés. La comparación entre los dominios 10h de los dos modelos presenta un error del 20.7%, por lo que solo se considera como resultados libres de bloqueo los obtenidos del dominio y B50-10h. De la comparación del flujo volumétrico normalizado de entrada a través de la ventana (Q^*), para los valores analizados de BR del modelo B25, Q^* presenta dependencia de BR, mientras que para el modelo B50 Q^* es independiente de BR. Los resultados de velocidad y flujo a través de la ventana obtenidos en esta investigación indican que podrían existir efectos de bloqueo que son dependientes de otros parámetros y no solo de la razón de bloqueo como se ha reportado en la literatura para cuerpos sólidos sin rotación. Se recomienda repetir el estudio numérico con un programa de simulación cuyos resultados se acerquen más a los resultados experimentales y determinar si esta dependencia se debe a un problema numérico o efectivamente hay otros parámetros que determinan la existencia de los efectos de bloqueo en cuerpos sólidos sin rotación a demás de la razón de bloqueo.

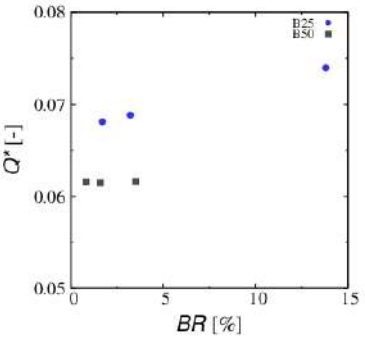


Figura 11. Comparación de flujo volumétrico de entrada a través de la ventana normalizado (Q^*) para los dominios de los modelos B25 y B50, como función de BR.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los proyectos IN114314 y IN103816 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM por la infraestructura experimental y numérica utilizada en esta investigación. S.F. Díaz agradece al proyecto IN103816 PAPIIT-UNAM por la beca escolar.

REFERENCIAS

Biswas, A, Gupta, R y Sharma, K K: (2007) "Experimental investigation of overlap and blockage effects on three-bucket savonius rotors", *Wind Engineering,* **31**, pp363-368.

Buñuelos-Ruedas, F, Angeles-Camacho, C, y Rios-Marcuello, S: (2010) "Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **14**, pp202-213.

Castillo, J A, Huelsz, G, and Cruz, M V: (2014). "Natural ventilation by windcatchers: CFD simulations and experiments", Hamburg, Germany. *CWE 2014, 6th International Symposium on Computational Wind Engineering*.

Castillo, J A, Huelsz, G y Cruz-Salas, M: (2015) "Design guidelines for the use of windexchangers in a building with a window to windward or to leeward", *XXXIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR,* ID 4.

Chakrabarty, D y Brahma, R: (2007) "Effect of wall proximity in fluid flow and heat transfer from a square prism placed inside a wind tunnel", *Thermal Science*, **11(4)**, pp56-78.

Choi, C K y Liou, L R (1998) "Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body", *Wind and Structure*, **1** pp351-364.

COMSOL: (2010) "COMSOL Multiphysics:user guide", COMSOL AB, U.S.

Cruz-Salas, M V, Castillo, J A y Huelsz, G: (2014) "Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers", *Energy and Buildings*, **38**, pp939-948.

Etheridge, D: (2012) "Natural Ventilation in Buildings – Theory, Measurement and Design", *John Wiley and Sons*, Chichester.

Ghiabaklou, Z: (2010) "Natural ventilation as a design strategy for energy saving", *World Academy of Science, Engineering and Technology,* **71**, pp315-320.

Kolekar, N y Banerjee, A: (2015) "Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal cannel under boundary proximity and blockage effects", *Applied Energy*, **148**, pp121-133.

McTavish, S, Feszty, D y Nitzsche, F: (2014) "An experimental and computational assessment of blockage effects on wind turbine wake development", *Wind Energy*, **17**, pp1515-1529.

Modi, V J y Fernando, M S U K: (1989) "On the performance of the savonius wind turbine", *Journal of Solar Energy Engineering*, **111**, pp71-81.

Montazeri, H y Azizian, R: (2008) "Experimental study on natural ventilation performance of one-side wind catcher", *Building and Environment,* **43(12)**, pp2193-2202.

Ramponi, R y Blocken, B: (2012) "CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters", *Building and Environment,* **53**, pp34-48.

Ross, I y Altman, A: (2011) "Wind tunnel blockage corrections: Review and application to savonius vertical-axis wind turbines", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* **99**, pp523-538.

Roy, S y Saha, U K: (2014) "An adapted blockage factor correlation approach in wind tunnel experiments of a savonius-style wind turbine", *Energy Conversion and Management,* **86**, pp418-427.

Tang, H y Wang, L: (2013) "Investigation on wind tunnel blockage effects of high-rise building", *Applied Mechanics and Materials,* **477-478**, pp793-796.

Tominaga, Y, Mochida, A, Yoshie, R, Kataoka, H, Nozu, T y Yoshikaw, M: (2008) "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, pp1749-1761.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DESEMPEÑO TÉRMICO Y MECÁNICO DE MORTEROS ALIGERADOS CON PERLITA MINERAL

Ana C.Borbón Almada[1], Dagoberto Burgos[1], Manuel Ramírez Celaya[1], Cinthya Durán Matas[1] , Samuel Castro[1] y Guadalupe Alpuche Cruz[2].

[1] Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, Tel. (662) 2-59-21-84, acborbon@dicym.uson.mx, dburgos@dicym.uson.mx , mramirez@dicym.uson.mx, cinthyaduraan@gmail.com, sam_2032@dicym.uson.mx .

[2] Departamento de Arquitecura y Diseño, Universidad de Sonora, Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, Tel. (662) 2-59-21-80, mgalpuche@arq.uson.mx

RESUMEN

Las propiedades térmicas de los materiales de construcción son importantes de considerar para el diseño y evaluación en el comportamiento térmico y energético de una vivienda. En el contexto de la vivienda de interés social en México, se requiere conocer experimentalmente y por región las propiedades de los materiales para fabricar muros, losas y recubrimientos considerando su capacidad de aislamiento, pero sin sacrificar la capacidad de resistencia mecánica a las solicitaciones estructurales. Estos requerimientos están siendo exigidos por la normatividad actual con respecto a la resistencia térmica para avanzar hacia la construcción sustentable en el tema de ahorro de energía eléctrica y confort en vivienda.

El presente trabajo describe los resultados de pruebas de laboratorio de las propiedades mecánicas y térmicas de morteros elaborados a base de cemento-arena en proporción 1:4 y sustitución de arena por perlita mineral, desde 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%, utilizando agregados de la región Noroeste de la República Mexicana. Los morteros han sido diseñados y elaborados en base a normas mexicanas para las pruebas en estado fresco y endurecido. Las pruebas térmicas se han realizado con equipos especializados, donde se han obtenido valores de conductividad térmica reducidos hasta en un 30%, debido al aligeramiento de los morteros y se describen algunas aplicaciones.

Palabras clave: Materiales aligerados, conductividad térmica, resistencia a la compresión.

ABSTRACT

The thermal properties of building materials are important to consider for the design and evaluation in the thermal and energy performance of a home. In the context of social housing in Mexico, it requires experimentally and by region know the properties of the materials to build walls, slabs and coatings considering its insulating capacity, but without sacrificing the ability of mechanical resistance to structural stresses. These requirements are being required by current regulations in the field of thermal resistance to move towards sustainable construction on the subject of saving electricity at home.

This paper describes the results of laboratory tests of mechanical and thermal properties of mortars made with cement-sand 1: 4 and replacing sand mineral perlite, in the proportions of 0%, 20%, 40%, 60 %, 80% and 100%. Mortars are designed and manufactured based on Mexican standards for testing fresh and hardened state. Thermal tests were performed with specialized equipment where results have been obtained reduction of thermal conductivity of up to 30%, from these results some applications in use are proposed.

Key words: Lightweight materials, thermal conductivity, compressive strength.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción para elaborar cerramientos en vivienda, no han evolucionado lo suficiente en el transcurso del tiempo en la República Mexicana; nos referimos a la evolución relacionada con características que beneficien tanto a la actividad constructiva en relación a tiempo y costo y fácil manejo, así como a las propiedades térmicas, aspecto que últimamente está siendo más tomado en cuenta por los organismos de vivienda en México, en el sentido de contar con materiales y sistemas constructivos más ligeros, menos densos y menos conductivos, para que de acuerdo a los espesores de los elementos se pueda lograr una mayor resistencia térmica a la transferencia de calor, para subsanar el problema de climas extremos en ciudades de la República Mexicana y para aminorar el uso de climatización artificial así como emisiones de CO_2 a la atmósfera.

La valoración de las propiedades mecánicas y específicamente la resistencia a la compresión de estos morteros, está especificado en la norma mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014, las cuales se deben cumplir dependiendo de su aplicación ya sea para ser utilizados en enjarres, pegado o para la elaboración de paneles no estructurales.

En la valoración de las propiedades térmicas y específicamente la conductividad térmica, existen normas internacionales ASTM C-518, para la medición, de esta variable, sin embrago lo que define su aplicación en la industria de la construcción tiene que ver además de la conductividad térmica, con los espesores de las capas constructivas.

La normatividad acerca de la resistencia térmica de los materiales de construcción, aplica más para materiales aislantes de tipo espumas y placas poliuretanas que para morteros, sin embargo en este trabajo se determinará hasta qué punto puede llegar un mortero aligerado a cumplir o acercarse a los valores que establece esta norma.

En este artículo se muestra un estudio de las propiedades mecánicas y térmicas de una gama de morteros cemento arena 1:4 con diferentes aplicaciones en la construcción. Los cuales han sido aligerados con sustitución de perlita mineral por arena en diferentes proporciones. Par el caso de la resistencia térmica de elementos opacos de las envolventes constructivas, en México se aplica la NMX-C-460-ONNCCE-2009 .

Se han realizado algunos estudios de diseño de mezclas con materiales alternativos de sustitución como los de (Merino, 2005) utilizando sustitución con fibras de vidrio. (Miranda, 2005), desarrolló un proyecto donde utilizó sustitución de arenas puzoláncias tipo zeolita para aligerar y disminuir conductividad térmicas. (Ozkan, 2011), realizó un estudio de los efectos de la perlita expandida en concretos ligeros. (Algara,2012) realizó estudios de suelo estabilizado en la intención de aligerar los componentes y reducir la conductividad térmica. (Arambarri, 2000) Estudió las propiedades térmicas de aislantes a base de perlita y silicato de calcio".

Diseño de las mezclas y pruebas físicas

Se ha diseñado un mortero cemento arena 1: 4 natural, como un mortero base para a partir de ahí diseñar 5 tipos de morteros aligerados sustituyendo la arena en 0%, 20%, 40%, 60% 80% y 100 % con perlita mineral.

La tabla 1 se muestra el diseño del mortero desde la muestra base, hasta las 5 proporciones con sustitución de material aligerante.

Tabla 1.- Diseño de mezclas de mortero cemento- arena 1:4 , con sustitución de perlita mineral.

PROPORCIONAMIENTOS BASE MORTEROS EN volumen absoluto Y FLUIDEZ DE 110 +/- 5 % 1 : 4

Material	MEZCLA DE CONTROL (TEORICA)	MEZCLA DE CONTROL (CORREGIDA)	SUSTITUCIÓN 20% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 40% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 60% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 80% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 100% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 50% PERLITA POR ARENA
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3
Cemento CPC 30 R	419	415	415	415	415	415	415	339
Arena	1430	1415	1132	849	566	283	0	579
Agua	290	305	303	302	300	298	296	298
Perlita mineral	0	0	38	75	113	151	188	77
Daravair 1000	0	0	0	0	0	0	0	1695
M.U.T.	**2138**	**2135**	**1888**	**1641**	**1393**	**1146**	**899**	**1293**

Fabricación de las muestras. A partir del diseño se fabricaron en el laboratorio las mezclas para probar cúbicamente el esfuerzo a la compresión de los morteros, así como de la medición de la conductividad térmica.

Se fabricaron 3 muestras cúbicas de 5 x 5 x5 cm de mortero c-a 1:4 con sustitución de 0% ,20%, 40%, 60% 80% y 100 % (18 muestras) de perlita sintética por arena, para ser probadas a la compresión, así como tres muestras de 15 x 15 x 4 cm para ser medidas en el equipo medidor de conductividad térmica.

Pruebas mecánicas. Se realizaron mediciones de esfuerzo a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado.

Fig.1 Medición de propiedades mecánicas en estado fresco y endurecido de las muestras.

Pruebas térmicas.- Se realizó la medición de la conductividad térmica de los morteros después de los 28 días de fraguado. Se sometieron las muestras a secado en horno durante 24 horas a 100 °C y además un proceso de desecación.

La medición se realizó en el equipo especializado *EP-50 Lambda Meter*, donde se midieron 3 muestras de cada una de las proporciones, para sacar un promedio de conductividad térmica por muestra de mortero aligerado, además de la densidad volumétrica del material.

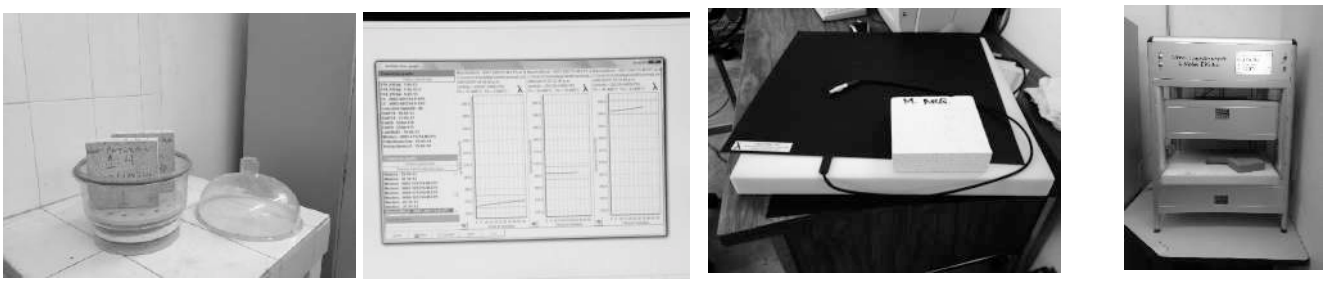


Fig. 2.- Desecación de la muestra y Equipo medidor de conductividad térmica

Resultados de medición

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados de las mediciones de esfuerzos a la compresión para las muestras a los 3 , 7, y 28 días, así como los resultados de las mediciones de conductividad térmica para cada un de las proporciones.

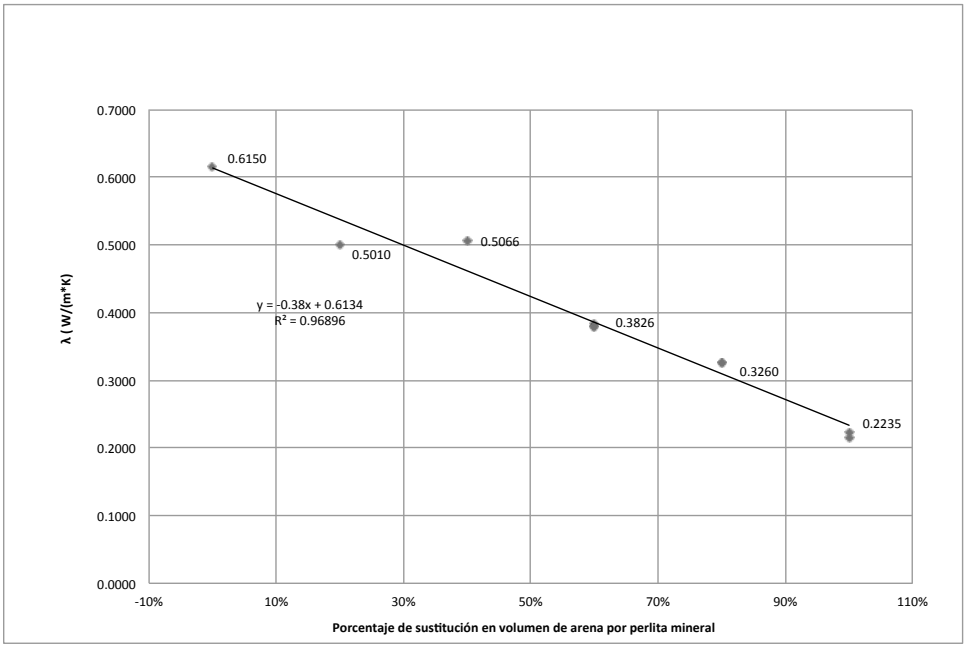
Tabla 1.- Resultado de medición de esfuerzo a la compresión y conductividad térmica

Mezcla	Resistencia f'c			Espesor	Dimensiones (mm)	Peso (gr.)	Densidad Kg/m3	λ W/(m*K)
	3 dias	7 dias	28 dias					
Control	134	156	188	43.42	150 X150	1780	1824	**0.6150**
20%	75	108	146	42.96	150 X150	1600	1655	**0.5010**
40%	79	104	117	40.85	150 X150	1460	1588	**0.5066**
60%	74	86	151	39.75	150 X150	1240	1386	**0.3826**
80%	74	91	113	42.52	150 X150	1100	1150	**0.3262**
100%	82	96	116	39.98	150 X150	940	1045	**0.2235**

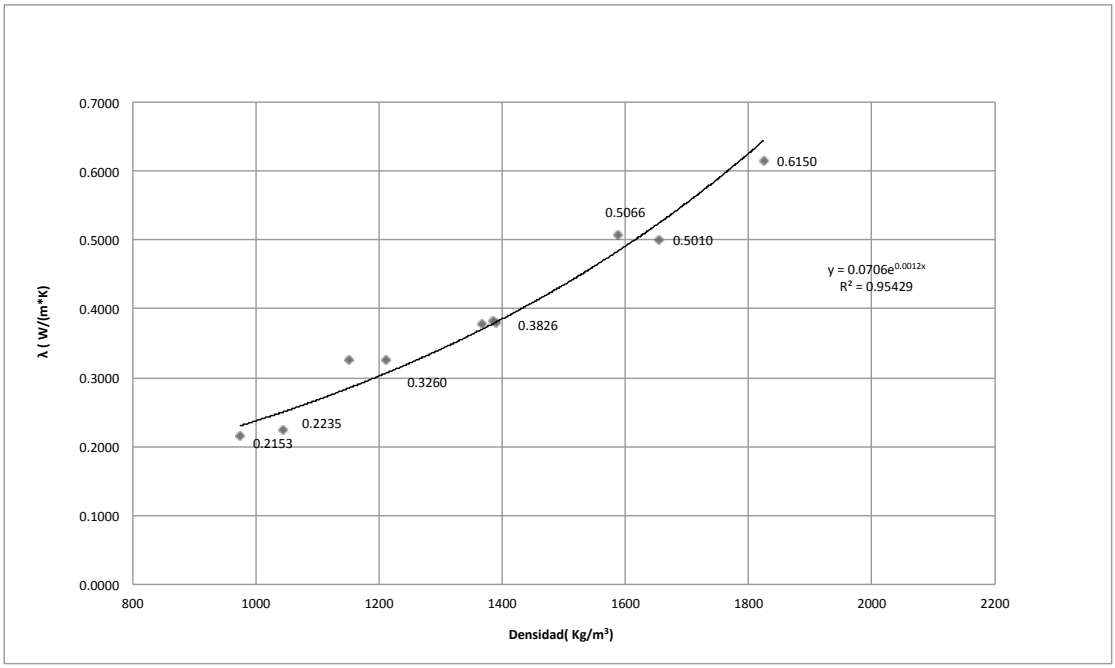
Discusión

Como se puede observar en los resultados de la tabla 1, la resistencia a la compresión de las mezclas disminuye en función del aumento del porcentaje de sustitución de perlita mineral por arena, así como la densidad y la conductividad térmica.

En la grafica 1 se muestra la relación entre la disminución de la conductividad térmica en relación a los aumentos de porcentajes incorporados de material aligerante tipo perlita mineral.



Grafica 1.- Relación entre el porcentaje de sustitución y conductividad térmica del mortero aligerado con perlita mineral.

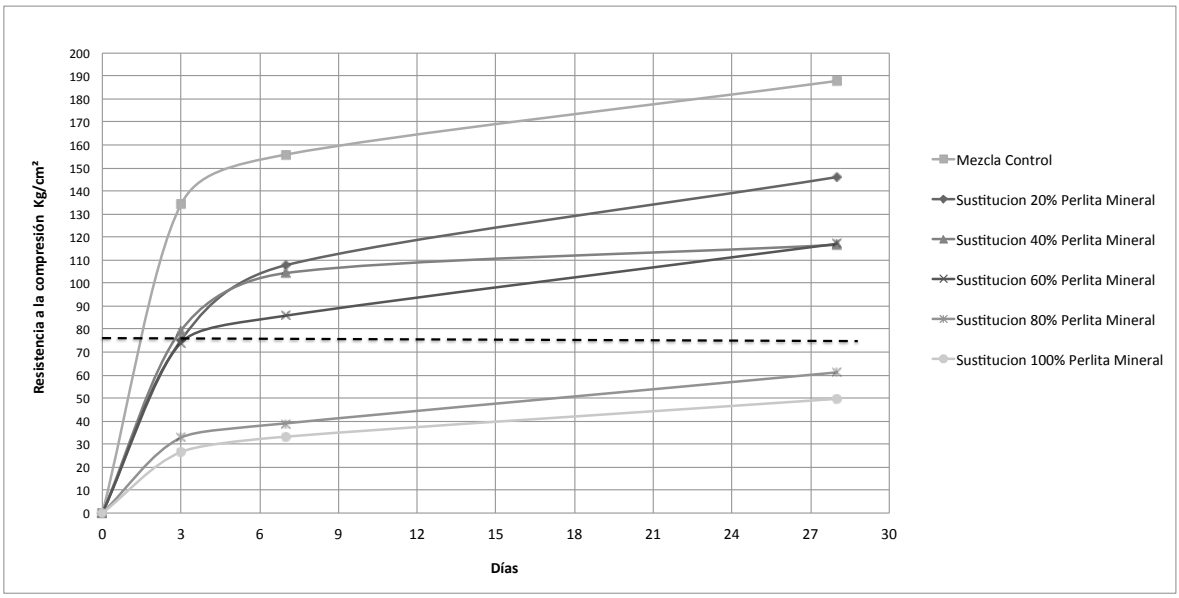


Grafica 2.- Relación entre la densidad volumétrica y conductividad térmica del mortero aligerado con perlita mineral.

En la gráfica 2 se observa la tendencia al aumento de la conductividad térmica en función del aumento de la densidad, con una alta correlación entre variables de 0.95.

Para evaluar el comportamiento de la resistencia térmica en base a la NMX-C-460 se tendría que pensar en una aplicación donde se definiera un sistema constructivo en función de un espesor y definir las característica del entorno climático. Sin embargo con la información antes presentada se destaca el hecho de que los morteros aligerados tienen una conductividad menor que la de un mortero base convencional, y en cualquiera de las aplicaciones de los morteros, a partir del comportamiento de la primera sustitución del 20% hasta el 100% presentarían una ventaja en el aumento de la capacidad de aislamiento, comprado con cualquier mortero convencional sin sustitución.

En la gráfica 3, se muestra la resistencia a la compresión de las distintas muestra aligeradas con perlita mineral que han sido estudiadas, con diferentes porcentajes de sustitución a las edades de 3,7 y 28 días,



Grafica 3.- Comportamiento de las mezclas en relación a lo esfuerzos a la compresión.

De acuerdo a la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014, se establecen los rangos de la Resistencia a la Compresión para tres tipos de morteros: Tipo I, mínima 125 kg/cm^2 y máxima 180 kg/cm^2; Tipo II, de 75 a 110 kg/cm^2 y Tipo III, de 40 a 60 kg/cm^2. Para efecto de una posible aplicación se utilizará la Resistencia a la Compresión mínima del Tipo II, es decir 75 kg/cm^2.

De acuerdo al análisis de estos resultados, se sugiere la utilización de los morteros c-a 1:4 con sustitución de perlita mineral de 0 %, 20%, 40%, y 60% para enjarres y pegados y las de 80% y 100% para encofrados.

Todos los morteros analizados a partir del 20 % de sustitución presentan una mejora en su utilización en cuanto a aumentar la resistencia térmica de sistemas constructivos donde sean utilizados.

Conclusión.

Los resultados de las mediciones de los morteros aligerados , muestran una tendencia a la baja en los valores de conductividad térmica y densidad, en función de aumentar su proporción de sustitución de arena por materiales aligerarte.

Las reducciones en la conductividad térmica son hasta del orden de 30% para los que son más ligeros, esto disminuye significativamente el peso de los materiales constructivos mejorando su manejo y eficiencia en mano de obra, así como de elevar la resistencia térmica en la formación de muros.

De acuerdo a los resultados se resume que los morteros que no cumplen con un resistencia mínima a la compresión de acuerdo a la NMX-C-486 son los de sustitución de 80% y 100%, los cuales podrían ser utilizados para encofrados o relleno de materiales huecos, ya que presentan conductividades muy bajas y servirían como elementos aislantes. Los morteros de menor sustitución como el de 20%, 40% y 60% se pueden utilizar para albañilerías con una resistencia mínima de 75 kg/cm^2, además de beneficiar el aislamiento de los elementos constructivos ya que presenta un conductividad menor a la de 0.63 de los morteros convencionales.

Finalmente se concluye mencionando que se deben realizar mas estudios de mediciones de las propiedades térmicas y mecánicas de diferentes morteros, concretos y mezclas de mamposterías para reforzar el conocimiento y caracterización de los mismos cuya aplicación es en el ámbito de la industria de la construcción, y requieren ser utilizados por los simuladores en base a la exigencia que cada vez será mas real de mejorar los sistemas constructivos de vivienda en México tanto en sus propiedades mecánicas como térmicas.

REFERENCIAS

Del Río Merino Mercedes; Jaime Santa Cruz Astorqui; Mariano González Cortina. "MORTEROS ALIGERADOS CON ARCILLA EXPANDIDA: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y LA ADICIÓN DE FIBRAS DE VIDRIO AR EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO". *Informes de la Construcción,* Vol. 57, nº 497, mayo-junio 2005.

Miranda Pasos I., J. F. García Arvizu, A. C. Borbón Almada, M. R. Ramírez Celaya, D. Burgos Flores, S. Castro Brockman. **"**ESTUDIO DEL IMPACTO TÉCNICO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO POR LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ZEOLITA**"** *Iberoamerican Journal of Project Management*. Vol. 5, Núm. 1 (2014).

Ozkan Sengula, Senem Azizib, Filiz Karaosmanoglub, Mehmet Ali Tasdemira. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete . *Energy and Buildings* 43 (2011) 671–676 .

NMX-C-460-ONNCCE-2009 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AISLAMIENTO TERMICO-VALOR "R"PARA LAS ENVOLVENTES DE VIVIENDA POR ZONA TERMICA PARA LAREPUBLICA MEXICANA-ESPECIFICACIONES Y VERIFICACION

NMX-C-486-ONNCCE-2014. INSUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN, MAMPOSTERÍA. MORTERO PARA USO ETRUCTURAL. ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO.

NOM-018-ENER.1997 NORMA Oficial Mexicana Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba.

Algara M. Siller, Ángel Ismael Cárdenas Martínez, Gerardo Javier Arista González y Jorge Antonio Rodríguez Hernández. "Diseño de bloques de suelo estabilizado para uso urbano en San Luis Potosí. CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN. Celaya, Gto., México, 2012. *Academia Journals* Vol. 4 .No.3.

Arambarri G. y Aglietti E. ; "MATERIALES AISLANTES DE PERLITA Y SILICATO DE CALCIO CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y PROPIEDADES"; Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 941-947. Argentina.

ASTM- Designation: C 518 – 98 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus1.

Aouba Laila , Cécile Bories Marie Coutand , Bernard Perrin , Hervé Lemercier . "Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residue". *Construction and Building Materials* 102 (2016) 7–13.

Costa Del Pozo Antonella., Energía y Medio Ambiente. Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Barcelona 2012. Tesina. Universidad Politécnica de Cataluña. Máster en Arquitectura.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ZONA DE CONFORT PARA CLIMA CÁLIDO SECO: MODELO DE PREDICCIÓN

Irene Marincic Lovriha y J. Manuel Ochoa de la Torre
Depto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México.
Tel. (662) 2592179, **e-mail: imarincic@arq.uson.mx**

J. Antonio del Río Portilla
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
Tel. 777) 3620090

RESUMEN

En México, los fraccionamientos de viviendas frecuentemente se diseñan y construyen de manera ineficiente desde el punto de vista térmico. La optimización del diseño térmico con resultados más eficientes, no sólo favorece el confort de los ocupantes, sino que repercute notablemente en el ahorro de energía destinada a climatización, sobre todo en lugares con condiciones climáticas extremas. En estas regiones, la zona de confort no es necesariamente la misma a la reportada en la normatividad internacional y en la bibliografía clásica, es decir que ésta puede ser distinta para una diversidad de regiones. Por esto, es necesario determinar los límites de las condiciones de confort específicos para la población y clima local, a fin de establecer las condiciones óptimas para la climatización.

En este trabajo se utilizó información obtenida de encuestas de campo en viviendas económicas en la ciudad de Hermosillo, Sonora. El objetivo es obtener una zona de confort específica para el caso estudiado, de clima cálido seco, partiendo de esta encuesta de campo. A partir de mediciones de temperatura y humedad, y votos encuestados sobre las sensaciones térmicas reales de las personas, se plantea un modelo de predicción que permite estimar la sensación térmica con base en la temperatura y la humedad, válido para climas y poblaciones similares al estudio. Se propone una fórmula para los votos, en función de la temperatura y la humedad absoluta. A partir de ésta, se obtiene de forma gráfica la zona de confort.

Conocer las condiciones específicas de confort térmico permite diseñar edificaciones más habitables desde el punto de vista térmico y, por ende, puede mejorar la calidad de vida de las personas. En ambientes climatizados, la selección de las condiciones de temperatura ideales para controlar la temperatura interior favorece no sólo el confort de los ocupantes, sino que también contribuye al ahorro de energía.

ABSTRACT

In Mexico, tract housing developments are often designed and built inefficiently, from the thermal point of view. Optimizing the thermal design for more efficient results, can improve the comfort conditions of the occupants and causes a significant impact on air condition energy savings, especially in locations with extreme climate conditions. In these regions, the comfort zone is not necessarily the same as those reported in international standards and in the classical literature, it can be different for a variety of regions. Therefore, it is necessary to determine the limits of the specific comfort conditions for the population and local climate, in order to determine the optimal conditions for air conditioning.

In this work, information obtained from field surveys in low-cost dwellings in the city of Hermosillo, Sonora, has been analyzed. The aim is to obtain the specific comfort zone for the case studied, which has hot dry climate, using this field survey. Based on temperature and humidity measurements, and on the actual thermal sensation votes of the people, a prediction model is proposed, based on temperature and absolute humidity, to estimate thermal sensations. It is the valid for similar climates and populations. From this formula, we obtain graphically the comfort zone.

The knowledge of the specific conditions of thermal comfort allows designing more habitable buildings, from the thermal point of view, and thus can improve the quality of life of people that inhabit these houses. In air-conditioned environments, selecting the ideal temperature conditions to control the interior temperature favors not only the comfort of the occupants, but also contributes to energy savings.

Palabras claves: confort adaptativo, modelo de predicción, zona de confort.

INTRODUCCIÓN

En México, las viviendas en serie son con frecuencia poco eficientes desde el punto de vista térmico. El inadecuado diseño de viviendas en relación con el clima, provoca que éstas sean incómodas y grandes consumidoras de energía. La optimización del diseño arquitectónico para buscar un comportamiento térmico con resultados más eficientes, no sólo favorece el confort de los ocupantes, sino que repercute notablemente en el ahorro de energía destinada a climatización, sobre todo en lugares donde las condiciones climáticas son extremas. En estas regiones se ha observado que la zona de confort no es necesariamente la misma a la reportada en la normatividad utilizada

internacionalmente (ASHRAE, 2004 e ISO, 2005), y en la bibliografía clásica (Olgyay, 1963 y Givoni, 1969), o sea, que ésta puede ser distinta para una diversidad de regiones a lo largo del planeta. Para climas cálidos, la temperatura de confort o de neutralidad puede ser más elevada, y en particular para climas cálidos secos, que se caracterizan por tener grandes oscilaciones de temperatura, el rango de confort puede ser más amplio. Por esta razón, es necesario determinar los límites de las condiciones de confort específicos para la población y clima local, a fin de establecer las condiciones óptimas para la climatización, y no basarse en estándares obtenidos para otros climas y situaciones.

En este estudio se presenta información obtenida a través de mediciones, y de varias encuestas aplicadas en viviendas económicas en la ciudad de Hermosillo (Romero, R. A. et al., 2009). Dicha investigación incluye características de los usuarios y de las viviendas; mediciones de las condiciones térmicas en el interior y percepción sobre diferentes aspectos de las mismas por parte de los usuarios, particularmente en lo que se refiere a confort térmico en el interior. En este trabajo se obteniene una zona de confort específica para el caso estudiado, de clima cálido seco y población de viviendas económicas, partiendo de una encuesta de campo sobre confort térmico. Con mediciones de temperatura y humedad, y votos encuestados sobre las sensaciones térmicas reales de las personas, se plantea un modelo de predicción que permite estimar la sensación térmica con base en la temperatura y la humedad, válido para climas y poblaciones similares a los de este estudio. A partir de éste, se obtiene de forma gráfica la zona de confort.

ANTECEDENTES

El enfoque adaptativo del confort térmico, introducido por Nicol y Humphreys (2002), toma en consideración las características térmicas del ambiente y la transferencia de calor desde y hacia el cuerpo humano, y la subjetividad del comportamiento de las personas. Este enfoque no sólo tiene en cuenta la interacción física entre el sujeto y el ambiente, sino que también su interacción psicológica y fisiológica a largo plazo, incorporando los efectos de aclimatación y las decisiones que las personas pueden, y de hecho toman, para acercarse a las condiciones de confort. Tanto autores como Brager, deDear, Auliciems y otros referidos por Nicol y Humphreys (2002), han trabajado sobre los modelos adaptativos, que tienen en cuenta las preferencias y expectativas de las personas.

En general, en los estudios de campo sobre confort adaptativo, en espacios interiores naturalmente ventilados, una vez recabados los datos de la encuesta de campo, se calcula la temperatura de neutralidad (que es la temperatura en la que el esfuerzo del cuerpo humano para lograr el confort térmico es mínimo) en función de la temperatura media exterior (Gómez-Azpeitia et al., 2007), para luego aplicar Tn ± 2ºC, obtener un rango de comfort. De este modo, se puede obtener un rango de confort dependiente sólo de la temperatura. Autores como Gómez Azpeitia et al. (2009), mejoran el cálculo de la temperatura de neutralidad para diferentes climas de México y considera las diferentes amplitudes del rango de confort según el clima.

Se han desarrolado también in sinnúmero de índices, expresados como temperaturas de sensación, donde interviene además de la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad de aire interior y la temperatura de globo, entre otros. Éstos se utilizan generalmente para establecer la temperatura ideal en el uso de climatización artificial.

También se han planteado modelos adaptativos para predecir la sensación térmica en espacios exteriores, como Nikolopoulou et al. (2004). y Cheng et al (2012), que obtienen modelos de la sensación térmica en espacios exteriores tomando como variables la temperatura, humedad, radiación solar y viento, que son los parámetros climáticos fundametales que inciden sobre el confort térmico.

En trabajos de Marincic et al. (2012) se toman en cuenta tanto la temperatura como la humedad, para obtener una fórmula de predicción de las sensaciones de confort en espacios interiores naturalmente ventilados, para un clima y población específicas, en los que se efectuó una encuesta. Con esta fórmula, se pueden estimar los porcentajes de personas con diferentes niveles de sensaciones térmicas y determinar qué porcentaje de ellas podría estar en condiciones confortables.

En este estudio se llega más allá en la predicción, determinando en forma gráfica una zona de confort dependiente de la temperatura y la humedad relativa. Esta zona de confort, diferente de la conocida en la bibliografía clásica y los estándares internacionales, tiene en cuenta el clima particular donde se esfectuó el estudio. Obtenida de un modelo de predicción, es una herramienta para visualizar de manera gráfica la zona de confort para el clima y población determinados, pero que puede utilizarse para climas y condiciones similares.

Para abordar un estudio de confort con este enfoque, se realizan encuestas de campo a habitantes de una cierta localidad, y se analizan las sensaciones térmicas de las personas en su propio medio, obteniendo información en el mismo sitio donde viven o trabajan. Para recabar la información necesaria sobre los habitantes y sus viviendas (Romero, R. A. et al., 2009), se realizaron encuestas en conjuntos habitacionales de vivienda económica de la ciudad de Hermosillo, Sonora, durante dos épocas climáticas relevantes del año, una cálida y una más fría (templada). Las mismas se orientaron a recabar la sensación térmica de los usuarios, al mismo tiempo que se registraban las condiciones térmicas en el interior de las viviendas. Se reunió información adicional sobre los residentes, como edad, peso, género, vestimenta, actividad física, etc., y sobre la vivienda (por ejemplo: el tipo de sistema de climatización utilizado en ese momento). La sensación térmica de los usuarios se registró en una escala de 7 puntos, de muy frío a muy cálido (escala ASHRAE de -3 a +3). Simultáneamente se midieron la temperatura del aire (bulbo seco y bulbo húmedo), temperatura de globo, humedad relativa y velocidad del viento. Los cuestionarios y el procedimiento de las encuestas fueron diseñados conforme a las normas ISO 7730 (2005) y 10551 (1995). El equipo de medición cumple con ISO 10551 (1998).

El equipo utilizado para medir las variables interiores es el dispositivo QUESTempº 36, que es un data logger con varios sensores. Los datos meteorológicos exteriores se obtuvieron de la estación meteorológica del Laboratorio de Energía y Medioambiente en Arquitectura de la Universidad de Sonora, ubicada en la misma ciudad. Con estos datos se pretende determinar la zona de confort de la población a la que se le aplicó la encuesta, en función de la temperatura y la humedad. Este tipo de procedimiento corresponde al enfoque adaptativo del modelo de confort.

En las siguientes secciones se describirá cómo se puede obtener, a partir de los datos de las encuestas, un modelo para predecir la sensación térmica de confort para otras condiciones no medidas (por ejemplo, otras estaciones del año), y determinar así la zona de confort para la localidad y población estudiadas. Se desarrolla un modelo (en función de la temperatura y la humedad absoluta) para predecir la sensación térmica de personas que se encuentren en un clima y circunstancias similares a las analizadas.

MÉTODO DE CÁLCULO

En esta sección describimos el método propuesto para estimar la sensación térmica de las personas para un clima y población específicos (Marincic et al., 2012), en función de la temperatura T y la humedad absoluta HA. Se decidió tomar la HA como variable independiente en lugar de la humedad relativa HR, porque de este modo se tiene en cuenta el contenido real de humedad. De las sensaciones térmicas que se calculan, con valores de -3 a +3, se pueden extraer las condiciones higrotérmicas para las cuales la sensación es de confort, es decir, la zona de confort.

Para desarrollar el modelo de la sensación térmica o voto en función de T y HA utilizamos los datos medidos en las encuestas, a los que aplicamos el método de cuadrados mínimos para hallar una línea de regresión entre los datos. Al tener dos variables independientes, fijamos en una primera instancia una de ellas, seleccionando intervalos de valores para los cuales ésta sería constante, permaneciendo la segunda como variable independiente. Como se vio en las encuestas, la población demostró ser menos sensible a la variación de HA que de T, en relación con su sensación térmica, por lo que decidimos elegir intervalos de HA para los cuales se trabajó con su valor promedio como constante.

El procedimiento consiste entonces, en partir de la T como variable independiente para estimar el voto, y analizar posteriormente la influencia de la HA por rangos específicos. Se dividen los pares de datos (T, HA) por rangos de humedad, de modo que abarquen una cantidad similar de datos. Con estos datos se procede a hacer una regresión lineal de los votos con la temperatura, donde la pendiente (m) y ordenada al origen (b) de esta regresión están en función de HA. Se encontró que utilizando este criterio para la elección del intervalo se obtienen funciones más definidas de m(HA) y b(HA) que con otros intervalos. Estas funciones se obtienen por regresión de los pares de valores T y HA=constante por intervalos.

Con este criterio se plantea la siguiente ecuación, en que el voto o sensación térmica V depende de T y de HA:

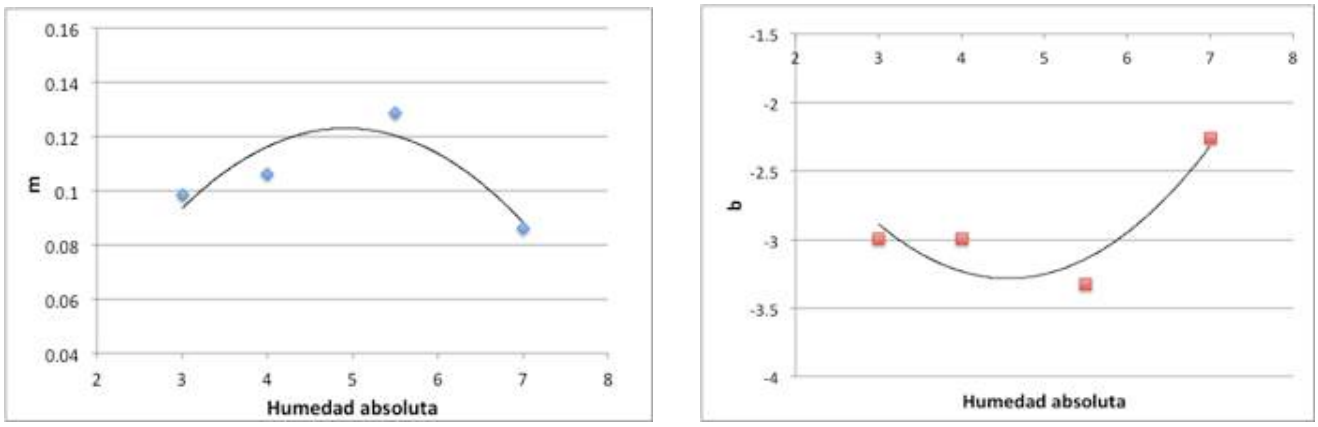
$$V\ (T, HA=cte) = m(HA)\ T + b(HA) \qquad \text{(Ec. 1)}$$

De esta ecuación, es necesario encontrar las funciones m(HR) y b(HR). Mediante un ajuste de mínimos cuadrados se obtienen las siguientes funciones para m y b:

$$m(HA) = a0 + a1\ HA + a2\ HA^2 \quad \text{y} \quad \text{para } b(HA) = c0 + c1HA + c2\ HA^2 \qquad \text{(Ecs. 2)}$$

La calidad de los ajustes de m y b se ven en las siguientes gráficas (Fig. 1). En la Tabla 1 se muestra el valor de los coeficientes a0, a1, a2, c0, c1 y c2 de las Ecs. 2, así como los coeficientes de determinación de ambas regresiones R^2.

Los cálculos se efectuaron para el período invierno, para incluir suficientes votos de confort, de acuerdo con el clima del caso estudiado.



a) b)

Fig. 1. a) función m(HA) y b) función b(HA), obtenidas mediante regresión. Los coeficientes de ambas se pueden ver en la Tabla 1 .

Tabla 1. Coeficientes de regresión para m(HA) y b(HA)

m (HA)	Valor	b (HA)	Valor
a0	-0.0709	c0	0.0955
a1	0.0789	c1	-1.4812
a2	-0.008	c2	0.1623
R^2	0.78879	R^2	0.82916

Se puede obtener entonces, con base en una encuesta de confort y mediciones higrotérmicas como datos, una función para calcular la sensación térmica o voto de las personas V en función de T y HA como variables independientes. Esta función es aplicable para predecir la sensación térmica para poblaciones que se encuentran en climas similares a los del estudio original. Para este caso en particular, la fórmula completa del voto para invierno quedaría de la siguiente manera (reemplazando Ecs. 2 en Ec.1):

$$V(T, HA) = (-0.008\ HA^2 + 0.0789\ HA - 0.0709)\ T + 0.1623\ HA^2 - 1.4812\ HA + 0.0955 \quad \text{(Ec. 3)}$$

De este modo, el resultado de la predicción será una nube de puntos que indicará las condiciones de sensación térmica, entre las cuales se puede extraer para fines específicos, las condiciones de confort (plano: sensación = 0). Se representan las sensaciones de confort calculadas. Para comparar con los datos originales encuestados (temperatura T y humedad relativa HR), se grafican los votos calculados y los encuestados en función de la T y la HR, para la condición de confort, en la Fig. 2.

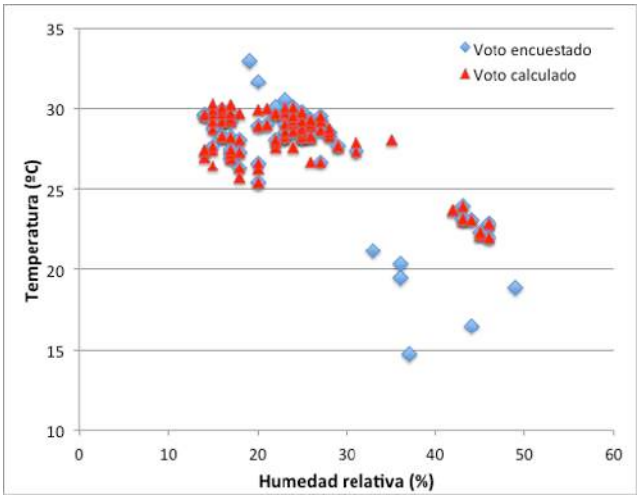


Fig. 2. Plano de confort de las condiciones termohigrométricas para los votos calculados (triángulo rojo) y para los votos encuestados (rombo azul), en función de la temperatura y la humedad relativa.

De esta manera, se puede valorar la habitabilidad de espacios interiores desde el punto de vista térmico, mediante mediciones de temperatura y humedad. Es posible predecir cuáles serían las condiciones de confort de las personas que se encuentran en el mismo entorno, o similar, respecto al utilizado para el estudio, en cuanto a clima, a condiciones a aclimatación de la población y sus expectativas. En cuanto al análisis de la habitabilidad de las viviendas, la principal ventaja de este procedimiento sobre el rango de confort sólo en función de la temperatura (enfoque adaptativo) -y el principal aporte de los autores- es el modelo de predicción de los votos y el modo como se expresan los resultados. Como se mencionó, los votos expresados en función de T y HA (o HR), y no sólo de T, darían a los arquitectos herramientas más claras para elaborar estrategias de diseño basadas en métodos pasivos, ya que se trata de edificios naturalmente ventilados.

RESULTADOS

Teniendo en cuenta la Ec. 3, se plantea una matriz con valores de temperatura y humedad (no necesariamente medidos), dentro de límites razonables de acuerdo con el clima del caso estudiado. Utilizando esta ecuación, se busca obtener las sensaciones térmicas, para así definir los valores de temperatura y humedad que generan los votos de confort. Como la zona de confort está definida con pares de valores de temperatura T y humedad relativa HR, para el cálculo se convierten los valores de HR de la escala a valores de HA, para poder ser usados en la ecuación.

En la Fig. 3, se muestra en amarillo la zona de confort, generada por los pares de valores HR y T cuyo valor de sensación térmica es 0. Este tipo de representación en un plano HR – T es más útil para formular posibles estrategias con la finalidad de mejorar las condiciones interiores a través del diseño pasivo.

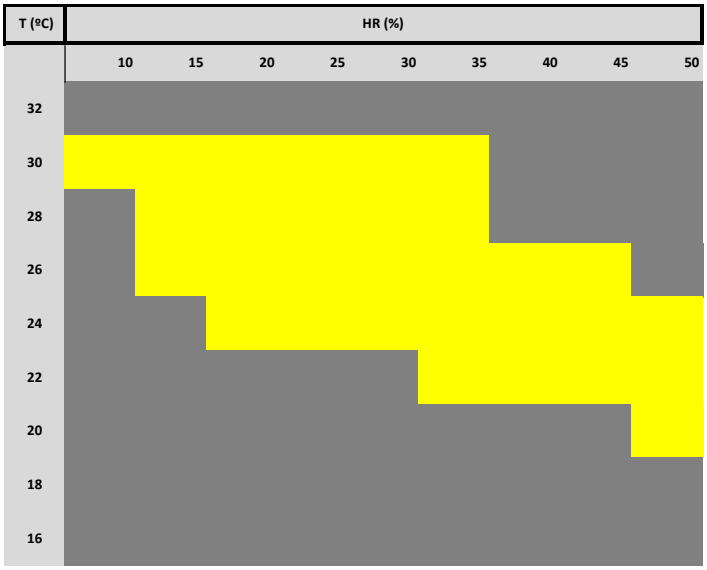


Fig 3: Zona de confort en función de la temperatura T (eje vertical) y la humedad relativa HR (eje horizontal).

Con la ecuación de predicción de las sensaciones térmicas, se obtuvo la zona de confort en función de la T y la HR en forma gráfica. Como se puede observar en la Fig. 3, las condiciones de confort (zona amarilla) varían con ambas variables T y HR, aproximadamente entre 10 y 50 % de humedad y 20 a 32 ºC de temperatura.

Si se compara con la zona de confort de la bibliografía clásica sobre el tema (Olgyay, 1963) para climas templados, se observa que la obtenida se encuentra desplazada hacia temperaturas más altas, tal como era esperable. La amplitud de la misma es más grande que la de Olgyay, lo que corresponde con un clima de gran amplitud en las temperaturas exteriores, tanto diaria como anualmente. En cuanto a la humedad, el rango está más restringido hacia humedades más bajas, debido al clima local árido. Esto indica la importancia de los efectos del tipo de clima sobre los procesos de aclimatación de las personas y, por consiguiente, sobre la determinación de la zona de confort. La comparación de la zona de confort obtenida a través de la encuesta con la conocida zona de confort de ASHRAE no sería adecuada, ya que esta última se utiliza para ambientes climatizados o para clima no extremo.

Las zonas en gris obscuro corresponden a otras sensaciones térmicas que no son las de confort, o bien a condiciones de T y HR que normalmente no se dan para el caso estudiado, por lo que no tiene sentido calcular la sensación térmica para estas condiciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una fórmula para predecir las sensaciones térmicas (votos) de personas aclimatadas las condiciones del caso estudiado, o bien a condiciones térmicas similares y con expectativas parecidas a las analizadas en la encuesta de campo, en función de la temperatura y la humedad absoluta. Los resultados de esta fórmula presentan una buena concordancia estadística con los votos de las encuestas aplicadas. Con el uso de esta fórmula, se obtiene la zona de confort específica para el caso analizado, en forma gráfica, en función de la temperatura y la humedad relativa.

El conocimiento de las condiciones específicas de confort térmico favorece que se puedan diseñar edificaciones más habitables desde el punto de vista térmico y, por ende, que sea posible mejorar la calidad de vida de las personas. En cuanto a los ambientes climatizados, la selección de las condiciones de temperatura preferidas para definir el rango de temperaturasen el interior favorece no sólo el confort de los ocupantes, sino que también contribuye al ahorro de energía.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico de la Universidad de Sonora y de la Universidad Nacional Autónoma de México en el marco de las convocatorias de intercambio académico.

REFERENCIAS

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE 55-2004 (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy. USA.

Brager, G. y De Dear, R (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings, vol. 27, pp. 83-96.

Cheng, V., Ng, E., Chan, C. and Givoni, B. (2012) Outdoor Thermal Comfort Study in sub-Tropical Climate: a longitudinal study based in Hong Kong, International Journal of Biometeorology, Vol. 56, Issue 1, pp.43-56. Springer.

De Dear, R.; Brager, G. y Cooper, D.(1997) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Final Report RP-884. Sidney, Australia.

Givoni, B. (1969) Man, Climate and Architecture. Applied Sciences Publishers.

Gómez-Azpeitia, G. et al.(2009) Comfort Temperatures Inside Low-Cost Housing. En: 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2009, pp. 498-503.

Gómez-Azpeitia et al. (2007). El confort térmico: Dos enfoques teóricos enfrentados. Palapa año/vol. 2 enero-junio, N1 1, Universidad de Colima. Pp. 45-57.

International Organization of Standardization. ISO 7730-2005 (2005) Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPV indices and local thermal comfort criteria.

International Organization of Standardization. ISO 10551:1995 (E) (1995) Ergonomics of the thermal environment – assessment of the influence of thermal environment using subjective judgment scales.

International Organization of Standardization. ISO 7726:1998 (E) (1998) Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities.

-Marincic I, Ochoa JM, Del Rio JA (2012) Confort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad. ACE Architecture, city and environment, Año 7, Nº 20. P. 27-46. España.

Nicol, J. F. y Humphreys, M. A.(2002) Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, Energy and Buildings, vol. 34, Nº 6, pp. 563-572.

Nicol, F. (1993) Thermal comfort. A handbook for field studies toward an adaptive model. University of East London, London.

NIKOLOPOULOU, M., LYKOUDIS, S. Y KIKIRA, M. Thermal Comfort Models for Urban Spaces. En: Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach. Editado por Nikolopoulou, M. del Centre for Renewable Energy Sources, Grecia, 2004, pp. 2-6.

Olgyay, V.(1963) Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton University Press.

Romero, R. A. et al. (2009) Informe técnico final del proyecto CONAFOVI 2004-01-20 Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México: regiones de clima cálido seco y húmedo. México.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

PAUTAS DE DISEÑO SOSTENIBLE PARA BIOCLIMAS SEMIFRÍOS EN EL ESTADO DE OAXACA

Juan de Dios Cruz Elvira
Doctorado en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico, Instituto Tecnológico de Oaxaca,
Calz. Tecnológico No. 125, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, C.P. 68030, México,
Tel. 9512353381, **juko_reto@hotmail.com.**

Rafael Alavéz Ramírez
Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN) Unidad Oaxaca, Oax.,
C.P. 71230, México, **arrafael@yahoo.com.mx.**

Fernando Chiñas Castillo
Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Oaxaca,
Calz. Tecnológico No. 125, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, C.P. 68030, México,
fernandochinas@gmail.com

RESUMEN

Hoy en día se está viendo la necesidad de que la arquitectura adopte criterios de diseño que permitan reducir los impactos negativos al medio ambiente empleando patrones y recomendaciones de **diseño sostenible**. En la presente investigación se determinaron pautas de **diseño bioclimático** para 5 localidades con bioclima semifrío en el estado de Oaxaca. Para tal efecto se utilizaron herramientas de diseño bioclimático tales como: el **diagrama bioclimático**[1], los triángulos de confort[2], las tablas de Mahoney[3] y la carta psicométrica, para el procesamiento de datos climáticos se utilizó el software Bioclimatic Analysis Tool (BAT) desarrollado por profesores de la UAM (Rincon,2013) y para la obtención del diagrama psicométrico se utilizó el software Climate Consultant 5.4 Build Energy Design Tools del software Bioclimatic Analysis Tool que se basa en la norma ASHRAE 2005 con las que es posible mejorar la **eficiencia energética** de los edificios y la planificación en diferentes zonas climáticas. Los resultados de las estrategias bioclimáticas planteadas por distintos autores recomiendan como estrategia principal de estos climas radiación en más del 70% del año. Los resultados de la carta psicométrica indican para los bioclimas semifríos que el porcentaje de **confort** es del 30%, con requerimientos de calentamiento mediante ganancias internas o ganancias solares para alcanzar un 100% de confort, por lo cual es necesario implementar estrategias tales como: orientación de la edificación para que el sol penetre en espacios de uso diurno y construcción bien aislada para generar ganancias internas.

ABSTRACT

Today you are seeing the need for architecture design criteria adopted to reduce the negative environmental impacts using patterns and **design sustainable** recommendations. In this research **bioclimatic design** guidelines for 5 locations were determined in bioclima semicold to the state of Oaxaca For this purpose tools bioclimatic design such as were used: **bioclimatic diagram**, triangles comfort, tables Mahoney and psychometric chart for processing climate data the Bioclimatic Analysis Tool (BAT) software was used and to obtain the psychometric diagram was used the software Consultant Climate 5.4 Build Bioclimatic Energy Design Tools of analysis software tool is based on the 2005 ASHRAE standard with which it is possible to improve the **energy efficiency** of buildings and planning in different climatic zones. The results of the bioclimatic strategies proposed by various authors recommend the preferred strategy of these climates radiation by more than 70% of the year. The results of the psychometric chart showing for bioclimates semicold that the percentage of **comfort** is 30%, with heating requirements through internal gains and solar gains to achieve 100% comfort, which is necessary to implement strategies such as: guidance of the building so that the sun penetrate spaces for daytime use and well insulated construction to generate internal gains.

Palabras claves: diseño sostenible, diseño bioclimático, diagrama bioclimático, eficiencia energética, confort

[1] Olgyay,1992
[2] Evans,2000
[3] Koenigberger OH, Mahoney C, Evans JM.,1970

INTRODUCCIÓN

Adaptar la arquitectura al clima demanda examinar el potencial que ofrece para lograr condiciones de confort térmico al interior de las edificaciones, utilizando estrategias de diseño sustentable para la región de estudio. En los últimos años, el cambio climático supone una grave amenaza para los asentamientos humanos y el rendimiento de los edificios.[4]En México la creciente demanda de energía en edificaciones es alta, el 18.4% del total del consumo de energía eléctrica de nuestro país corresponde a lo que se denomina energía en edificaciones.[5] El agotamiento de los recursos energéticos y el riesgo del calentamiento global están llamando para el desarrollo sostenible en el sector de la construcción basado en las energías renovables y la eficiencia energética.[6]Al analizar el clima de una región es más factible para el diseñador establecer medidas de eficiencia energética una de las maneras más baratas y rentables para reducir las emisiones de carbono en todo el mundo.[7]El interés en el bienestar ambiental del ser humano ha estado presente desde Sócrates y Vitruvio, procurando crear y construir ambientes adecuados en función del clima de la zona, sobre todo por razones de confort y salud.[8]Además de que con un buen diseño bioclimático se pueden llegar a anular los requerimientos de energía para el acondicionamiento higrotérmico como por ejemplo en Maracaibo Venezuela donde se realizó una investigación de una vivienda bioclimática que alcanzo condiciones de confort hasta en un 81%[9]o en Australia donde se examinó el papel de la arquitectura solar pasiva de 8 viviendas logrando niveles de confort aceptables durante un 77 a 97% del año,[10]el establecer estrategias bioclimáticas de diseño en edificaciones ayuda a reducir la demanda energética y las emisiones de contaminantes a la atmósfera, ya que el ámbito de la edificación sustentable "representa una de las oportunidades más inmediatas para lograr reducciones significativas de las emisiones que propician el cambio climático" [11]y reducir el consumo de energía hasta un 30%.[12]

MATERIALES

Para la fase de la clasificación bioclimática se emplearon datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en la sección de normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) donde se encuentran los datos básicos de todas las estaciones climatológicas de la república mexicana. Para el análisis del sitio y análisis climático se realizó el procesamiento de los elementos del clima, graficarlos y definir una caracterización climática. En el análisis paramétrico para determinar estrategias bioclimáticas se utilizó el software Bioclimatic Analysis Tool (BAT) propuesto por profesores de la Universidad Autónoma Metropolitana de la ciudad de México(UAM) (Fuentes y Rincón en el 2013), otra herramienta importante fue la carta psicométrica del software Climate Consultant 5.4 Build Energy Design Tools.El software BAT concentra en una interfaz las diferentes herramientas bioclimáticas que al capturar los datos climáticos de la localidad opera automáticamente desarrollando los gráficos correspondientes para cada parámetro. La carta psicométrica define los requerimientos de climatización pasiva, para tal efecto, se utilizó el modelo adaptativo que indica el Plus ASHRAE Handbook 2005. Dicho modelo es una metodología dinámica[13], que se desarrolló a partir del proceso de adaptación térmica de los usuarios en los que se encuentra la correlación que existen entre el nivel de ropa y la evolución de la temperatura interior, que muestra que la vestimenta representa una medida de adaptación del usuario, lo que permite que estas consideraciones realicen cambios específicos en el confort humano.

MÉTODO

Clasificación bioclimática

El primer paso fue utilizar un estándar mundial para la clasificación del clima, para lo cual se utilizó la clasificación climática de Koppen (CCK),[14] basado en la teoría de que la vida de las plantas nativas se ve directamente afectada por la distribución espacial de elementos climáticos[15].La CCK ha sido uno de los sistemas de clasificación climática más comúnmente usados desde su introducción;[16]fue publicada por primera vez en 1884 por el climatólogo ruso-germano Vladimir Wilhelm Koppen, con varias modificaciones notables en 1918 y 1936. Posteriormente el climatólogo alemán Rudolf Geiger colaboro con Koppen en ulteriores modificaciones, por lo cual algunas veces se le refiere como sistema de clasificación climática Koppen-Geiger.[17]

Para la clasificación bioclimática se recopilaron datos de temperatura máxima, media y mínima; precipitación pluvial total anual, de las 5 localidades, los datos de humedad relativa, máxima, media y mínima en este caso se obtuvieron por medio de la Ec. desarrollada por el Dr. Víctor Fuentes Freixanet, la cual se presenta a continuación en la fórmula 1:

$$HR = (HA/HS)\ x100 \text{ ó, } HR = (HE/HS)\ x\ 100 \qquad (1)$$

Dónde: HR=Humedad relativa,
HA=Humedad absoluta,
HS=Humedad saturada y
HE=Humedad especifica

[4] Crawley,2008
[5] SENER; 2013
[6] Robert A, Kumer M.,2012
[7] McKinsey&Company., 2007
[8] Auliciems A, Szokolay S.,2007
[9] Bravo G, Gonzalez E.,2013
[10] Miller W, Buys L, Bell J,2012
[11] Kennedy,2008
[12] Padilla j.,2010
[13] Dear R, Brager G,2011
[14] Castro MD, Gallardo C, K. J, Tuomenvirta H.,2007
[15] Lohmann U, Sausen R, Bengtsson L, Cubasch U, Perlwitz J, Roeckner E.,1993
[16] Essenwanger OM.,2001
[17] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F.,2006

Para continuar con la clasificación climática se procedió al ordenamiento de los datos en una hoja de excel para su posterior procesamiento de manera numérica y gráfica. En primer lugar se analizó la temperatura promedio máxima, media y mínima durante todo el año; y con ayuda de estos datos establecer la zona de confort (Szokolay, 1998) para determinar el bioclima de cada ciudad. Posteriormente se analizó la humedad que esta íntimamente ligada con la temperatura y el rango de confort higrotérmico que es muy amplio, ya que se encuentra entre 30 y 70% de humedad relativa (Fuentes, 2004). Por último con los datos de la precipitación total se conoció en términos generales el rango definido para una precipitación moderada comprendida entre los 650 y los 1000mm; por debajo de esta cifra la localidad será seca y por arriba será húmeda. [18]

Analisis de sitio (medio natural) análisis climático

Para conocer de una manera clara y precisa el comportamiento del clima en cada localidad se analizaron los siguientes parámetros climáticos: temperatura máxima, media y mínima; humedad relativa, máxima, media y mínima; precipitación pluvial total anual y radiación total, directa y difusa. Mediante el programa BAT se realizó un análisis de la humedad, la precipitación y las temperaturas horarias de todo el año para conocer los requerimientos de bajocalentamiento, confort y sobrecalentamiento de las localidades en estudio.

Analisis paramétrico para determinar estrategias bioclimáticas para las regiones de Oaxaca-México

Se utilizó una metodología de diseño bioclimático que sistematiza el proceso de diseño particularmente en su etapa analítica, ésta metodología se basó en la propuesta de investigadores clásicos como Olgyay, Givoni[19] y Szokolay,[20] también en nuevas aportaciones como las de Yeang. Los pasos que consideró la metodología para determinar estrategias de diseño bioclimático en arquitectura fueron en primer lugar: la obtención de datos de las estaciones climatológicas más cercanas y de características similares al sitio a analizar proporcionados por la CONAGUA en la sección de normales climatológicas; para el análisis de la información se ejecutó un vaciado de los datos de todas las localidades en el software BAT; para la realización del análisis climático paramétrico se utilizaron herramientas bioclimáticas tales como: diagrama bioclimático, los triángulos de confort de Martin Evans y las tablas de Mahoney; por último para la carta psicométrica se utilizó el software Climate Consultant 5.4 Build Energy Design Tools desarrollado por Ligget R., and Milne M. en 2012 de la UCLA Energy Design Tool Group[21] que utiliza la carta psicométrica que define los requerimientos de climatización pasiva, para tal efecto se utilizó el modelo adaptativo que indica el Plus Ashrae Handbook 2005.

RESULTADOS

Resultados de la clasificación bioclimática

En la tabla 1 se establecen las condiciones de las localidades con su respectivo clima según Koppen y bioclima de acuerdo a lo calculado mediante el método de Fuentes (2004), donde se observa que varía la consideración que realiza Koppen García respecto al método de Fuentes por lo que es importante destacar que la clasificación bioclimática es la más adecuada cuando se requieren establecer estrategias de diseño para la confortabilidad de los usuarios.

Tabla 1 Clasificación localidades

Región	Localidad	Latitud	Longitud	Altura(msnm)	Clima (koppen)	Bioclima (fuentes)
Cañada	Santa María chilchotla	18º15´00´´	96º49´00´´	1358	Semicálido isotermal no es tipo ganges no hay canícula	Semifrío húmedo
Cañada	Huautla de Jiménez	18º07´59´´	96º49´59´´	1678	Templado poca oscilación no es tipo ganges canícula	Semifrío húmedo
Mixteca	Tlaxiaco	17º16´00´´	97º40´59´´	2078	Templado isotermal no es tipo ganges canícula	Semifrío
Sierra norte	Tlahuitolpepec	17º05´29´´	96º03´34´´	1223	Templado isotermal no es tipo ganges canícula	Semifrío húmedo
Sierra sur	San José del pacifico	16º10´00´´	96º30´00´´	2485	Templado isotermal no es tipo ganges canícula	Semifrío húmedo

Resultados de sitio (medio natural) análisis climático

Los resultados del análisis climático indicaron que la humedad relativa máxima de todas las localidades rebasan el límite del 70%; para la humedad relativa media, las localidades de Rio Grande y Santa María Chilchotla rebasan también el límite para la zona de confort; por otro lado la humedad relativa mínima de todas las localidades se encuentra dentro de la zona de confort.

Estos valores nos plantean la necesidad de implementar estrategias que consideren las precipitaciones que se presentan en las localidades, especialmente en aquellas localidades donde su humedad relativa media rebasa los límites de confort establecidos.

También se observa que la precipitación total anual de las diferentes ciudades analizadas que rebasan el límite de 1000 mm de precipitación son San José del Pacifico, Huautla de Jiménez, Tlahuitoltepec y Santa María Chilchotla, estos datos nos indican que las localidades que pueden considerarse húmedas y que por lo tanto debe considerarse dicha condición en la etapa de diseño bioclimático.

Gracias a los datos de las temperaturas horarias que imperan en las diferentes ciudades analizadas, se logró conocer los requerimientos de enfriamiento y calentamiento; también la zona de confort de las localidades en todo el año. Se obtuvo para las ciudades con clima semifrío existen valores de bajo calentamiento arriba del 50%, lo cual nos indica la necesidad de considerar estrategias de calentamiento.

[18] Fuentes V.,2004
[19] Givoni B,1976
[20] Szokolay V.,1985
[21] Ligget, R., and Milne, M., 2012.

Resultados del Analisis paramétrico para determinar estrategias bioclimáticas para las regiones de Oaxaca-México

Los resultados del diagrama bioclimático para las localidades con clima semifrío: (Tlaxiaco, Tlahuitoltepec, San José del Pacifico, Huautla de Jiménez y Santa María Chilchotla), nos plantea el uso solamente de la radiación en porcentajes superiores al 70%; esto se puede observar en las figuras 1 y 2 de las localidades de Tlaxiaco y Santa María Tlahuitoltepec con un 72.2% y 70.6% respectivamente.

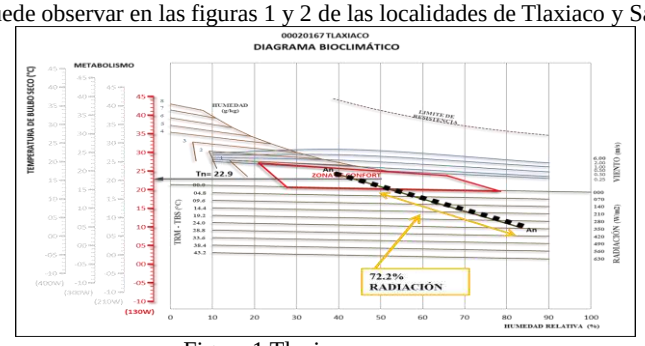


Figura 1 Tlaxiaco

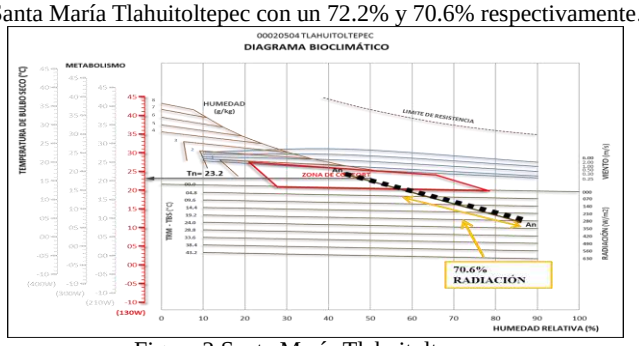


Figura 2 Santa María Tlahuitoltepec

Los resultados de los triángulos de estrategias bioclimáticas de John Martin Evans para las localidades de Tlaxiaco, Santa María Chilchotla, Tlahuitoltepec, Huautla de Jiménez y San José del Pacifico nos sugieren ganancias solares e internas como ejemplo se presentan la figura 3 Santa María Chilchotla y la figura 4 de Huautla de Jiménez donde se puede apreciar estas sugerencias.

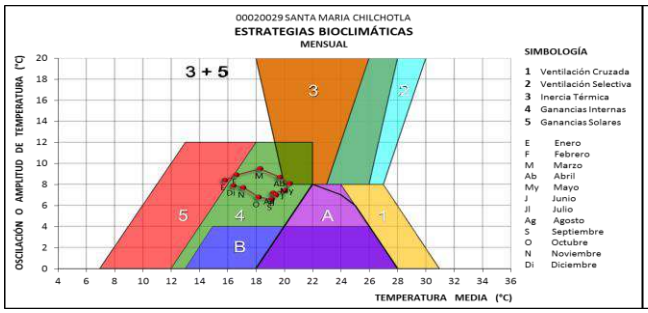


Figura 3 Santa María Chilchotla

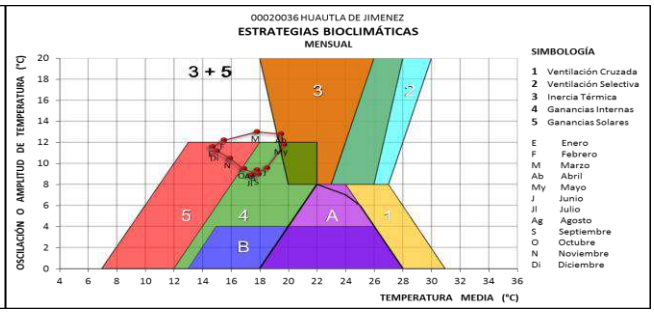


Figura 4 Huautla de Jiménez

El autor Carl Mahoney presenta las recomendaciones de diseño arquitectónico para las edificaciones de acuerdo con las características del clima. Para los climas semifríos en la tabla 2 se recomiendan configuración compacta, retardo térmico por arriba de 8 horas y aberturas pequeñas sombreadas para la lluvia.

Tabla 2 Estrategias localidades Mahoney

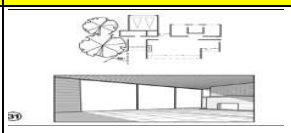
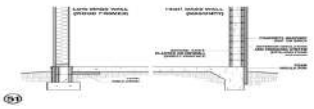
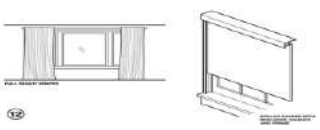
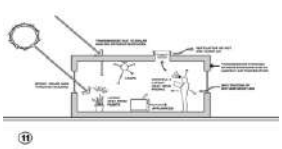
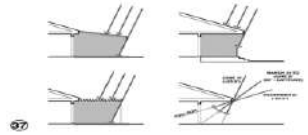
Región	Localidad	Bioclima	Tablas de mahoney (Carl mahoney,1977)	Estrategias bioclimáticas(carta psicométrica)
Mixteca	Tlaxiaco	Semifrío	**Configuración compacta** (patio). Ventilación no requerida retardo térmico masivo arriba de 8 horas (muros, pisos y techumbre) aberturas sombreado total y permanente (pequeñas 10-20%)	 Orientación penetración del sol
Sierra norte	Tlahuitolpepec	Semifrío húmedo	Ventilación temporal. Espaciamiento configuración compacta **Retardo térmico masivo arriba de 8 horas (muros**, pisos y techumbre).sombreado total y permanente (protección contra la lluvia aberturas pequeñas 20-30%).	 Muros alta masividad térmica
Sierra sur	San José del pacifico	Semifrío húmedo	**Concepto de patio compacto**, configuración compacta ventilación no requerida. Retardo térmico masivo por arriba de 8 horas (muros, pisos y techumbre). Aberturas muy pequeñas 10-20% (sombreado total y permanente protección contra la lluvia).	 Aislante en persianas reducción pérdidas de calor
Cañada	Huautla de Jiménez	Semifrío húmedo	**Retardo térmico** masivo por arriba de 8 horas (muros, pisos y techumbre). Espaciamiento configuración compacta. **Sombreado total y permanente** (protección contra la lluvia aberturas pequeñas 20-30%).	 Generación ganancias internas

Tabla 3 Estrategias localidades Mahoney (continuación)

Región	Localidad	Bioclima	Tablas de mahoney (Carl mahoney,1977)	Estrategias bioclimáticas(carta psicométrica)
Cañada	Santa María chilchotla	Semifrío húmedo	Muros, pisos ligeros con capacidad térmica techumbre ligera y bien aislada. **Espaciamiento configuración compacta** sombreado total y permanente (**protección contra la lluvia aberturas grandes** 50-80%).	 Sombrillas operables

Finalmente los resultados de la carta psicométrica del software Climate Consultant 5.4 indican lo siguiente para los climas semifríos y semifríos húmedos de la figura 5 a la 9 las localidades de Tlaxiaco, Tlahuitoltepec, Huautla de Jiménez y Santa María Chilchotla tienen un porcentaje de confort mayor al 30% y pueden alcanzar el 100% planteando estrategias de calentamiento como ganancias solares pasivas alta masividad y ganancias internas, la localidad de San José del pacifico es la única que obtiene un valor muy bajo de confort solo alcanzaría el 90% de confort con las estrategias de calentamiento.

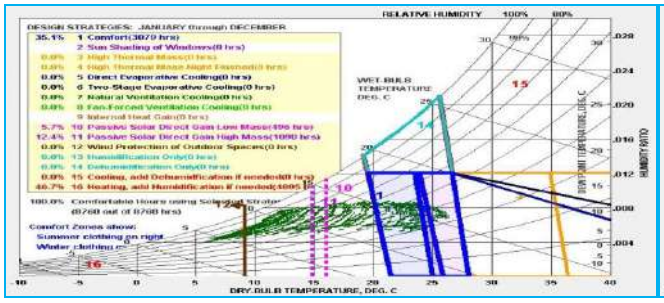


Figura 5 Tlaxiaco

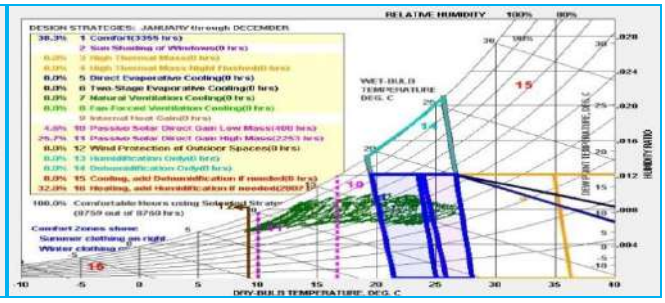


Figura 6 Santa María Tlahuitoltepec

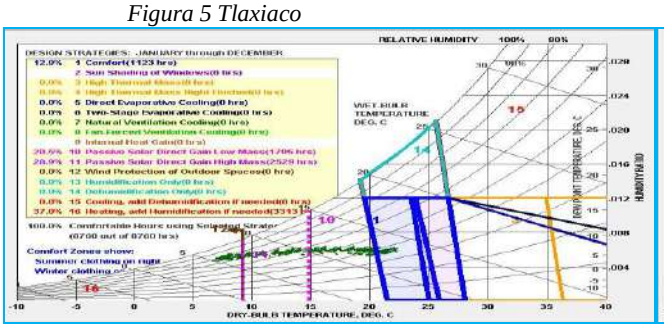


Figura 7 San José del Pacifico

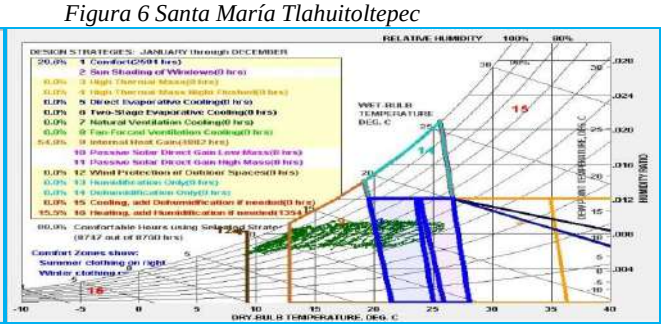


Figura 8 Huautla de Jiménez

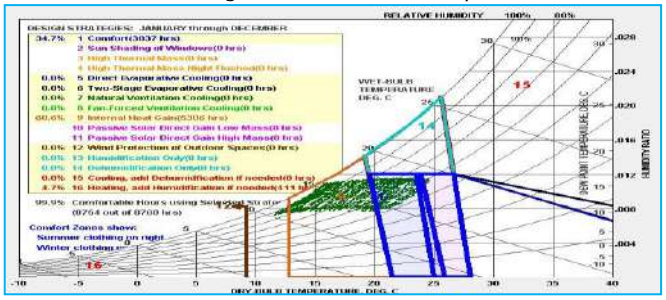


Figura 9 Santa María Chilchotla

PAUTAS DE DISEÑO SOSTENIBLE

En las localidades con bioclima semifrío se plantean como estrategias bioclimáticas las siguientes: a) El aprovechamiento de la energía calorífica del sol sobre todo en la estación de invierno en las horas de bajocalentamieto, para tal efecto se propone que el emplazamiento de la vivienda sea en el sentido largo con eje ESTE-OESTE con vanos hacia el sur (Fig.10). b) Ubicar los garajes o zonas de almacenamiento en el lado del edificio de cara al viento más frío para ayudar a amortiguarlo. c) En casas tradicionales se recomienda que tengan una planta de piso compacta con una fuente de calor central, orientación sur en ventanas y techo a dos aguas para la protección contra el viento (Fig. 11), construcción bien aislada para proporcionar la acumulación de calor rápido en la mañana, las ventanas pueden ser sin sombra y la cara en cualquier dirección, ya que cualquier ganancia solar pasiva es un beneficio y hay poco peligro de sobrecalentamiento.

d) Es importante generar ganancias de calor internas mediante equipos, de esta manera los ocupantes reducirán en gran medida las necesidades de calefacción, así también conviene mantener el hogar compacto y bien aislado; utilizar materiales interiores de alta masividad como pisos de cerámica, muros de alta masividad térmica y chimeneas de piedra para almacenar calor de manera pasiva en la estación de invierno, manteniendo en verano la noche fría (Fig. 12),en las ventanas se debe proporcionar doble acristalamiento de alto rendimiento.

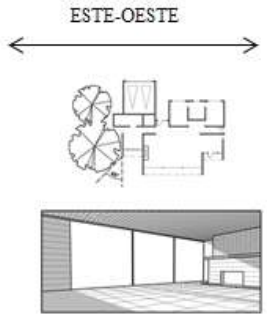


Figura 10

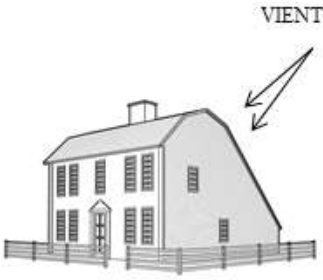


Figura 11

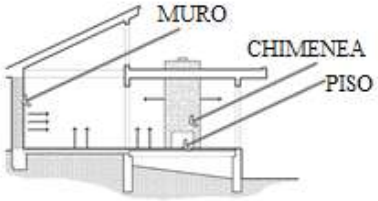


Figura 12

CONCLUSIONES

La clasificación bioclimática para las 5 localidades del estado de Oaxaca dio como resultado 2 tipos de bioclimas: semifrío y semifrío húmedo. Los requerimientos bioclimáticos para estos bioclimas nos arroja valores de bajo calentamiento de más del 50%, con lo que se establece que para alcanzar un ambiente más confortable es necesario implementar estrategias de calentamiento. Las estrategias bioclimáticas que plantean los autores Olgyay, Mahoney y Evans son: radiación solar, ganancias solares y ganancias internas. La carta psicométrica establece estrategias bioclimáticas de: ganancias internas, ganancias solares y masividad térmica. Las recomendaciones de diseño que se plantean para las localidades con bioclima semifrío son: el aprovechamiento de la energía calorífica, se recomienda en casas tradicionales que tengan una planta de piso compacta con una fuente de calor central, orientación sur en ventanas, techo a dos aguas para la protección contra el viento y en las ventanas se debe proporcionar doble acristalamiento de alto rendimiento.

REFERENCIAS

1. Olgyay V.(1992). Design with climate:a bioclimatic aproach to architectural regionalism. New York:Van Nostrand Reinhof.
2. Evans, J M.(2000). Comfort triangles: analysis of temperature variations and design strategies in passive architecture. Proceedings of PLEA on the Architecture, City, Environment, James and James, London. 2000.
3. Koenigberger OH, Mahoney C, Evans JM.(1970). Climate and house design,. United Nations, New York..
4. Crawley DB.(2008). Estimating the impacs of climate change and urbanization on building performance. J.Build. Perform. Simul.: p. 91-115.
5. SENER.(2013). Balance Nacional de Energia Mexico D.F.
6. Robert A, Kumer M.(2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for thepast.. Buil Environ.: p. 150-158.
7. Mckinsey.(2007).Curbing Energy Demand Growth:The Energy Productivity Opportunity. McKinsey&Company.
8. Auliciems A, Szokolay S. (2007).Thermal Comfort. PLEA Note, 3.Recuperado de http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/Document.aspx?p=9&ix=6&pid=4&prcid=40&pp.
9. Bravo G, Gonzalez E.(2013). Thermal Comfort in Naturally Ventilated Spaces and Under Indirect Evaporative Passive Cooling Conditions in Hot: humid climate.. Energy and Building.: p. 79-86.
10. Miller W, Buys L, Bell J. (2012).Performance evaluation of eight contemporary passive solar homes in subtropical Australia. Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland 4001, Australia.
11. Kennedy Wea.(2008). Edificacion Sustentable en America del Norte Montreal (Quebec), Canadá,: Comision para la Cooperacion Ambiental.
12. Padilla j.(2010). Programa de certificación de Edificaciones Sustentables. In 5to Seminario Internacional de Vivienda Sustentable Cambio Climatico.
13. Dear R, Brager G.(2011). developing an adaptive model thermal comfort and preference Int J Biomoteorol; p. 45:100-108.
14. Castro MD, Gallardo C, K. J, Tuomenvirta H.(2007). The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. Climatic Change; p. 329-341.
15. Lohmann U, Sausen R, Bengtsson L, Cubasch U, Perlwitz J, Roeckner E.(1993). The Koppen climate classification as a diagnostic tool for general circulations models. CLIMATE RESEARCH; p. 177-193.
16. Essenwanger OM.(2001). Classification of Climates, World Survey of Climatology 1C. General Climatology, Elsevier, Amsterdam. 2001.
17. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F.(2006). World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. Meterologishe Zeitschrif tvol. 15, no. 3; p. 259-263.
18. Fuentes V.(2004). Arquitectura Bioclimatica. Facultad de Arquitectura dec UAM-Azcapotzalco.
19. Givoni B.(1976)..Climate and Comfort. Elsevier, London.
20. Szokolay V.(1985). Thermal comfort and passive design. In: Boer KW, editor. Advances in solar energy- an annual review of research and development. New York: The American Solar Society vol.2; p. 257-96.
21. Ligget, R., and Milne, M. (2012). “Climate Consultant 5.4 (Build 4).” Software, UCLA Energy Design Tool Group. Accessed February 7, 2013. http://www.energy-design-tools. aud.ucla.edu.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ISLA DE CALOR URBANA DE VERANO Y SU RELACIÓN CON EL ENTORNO URBANO EN HERMOSILLO, SONORA

Laura Mercado Maldonado
División de Humanidades y bellas artes. Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, 83000, México
lawitas@hotmail.com

RESUMEN

En la ciudad de Hermosillo, Sonora en las últimas décadas, ha aumentado la superficie urbana, densidad poblacional, el tránsito vehicular, y con ellos se han generado una serie de cambios en la climatología urbana, como el fenómeno de Isla de Calor Urbana (ICU), definida como una cúpula sobre la ciudad con aire más caliente que a su alrededor y se denomina Perfil de Isla de Calor Urbana (United States Enviromental Protection Agency, 2005) produciendo un impacto climático y ambiental, generando una sensación térmica mayor en los espacios exteriores. Habitando en una zona cálida-seca, es primordial estructurar la ciudad de tal manera que el usuario pueda acercarse en la medida de lo posible al confort térmico exterior y disminuir los consumos de energía por aire acondicionado en los espacios interiores. Por esto, es importante demostrar la existencia de la ICU y morfología en la mancha urbana de la ciudad, por medio de mediciones durante el período cálido con transectos en los principales ejes de la estructura urbana, obteniendo temperaturas superficiales y análisis de la ICU, así como los factores que intervienen en su formación, que permitirá generar estrategias de mitigación de este fenómeno, lo que favorecerá la sustentabilidad de la ciudad.

Palabras claves: Isla de Calor Urbana, Temperatura superficial, Confort térmico exterior, Clima cálido seco, Urbanismo sustentable.

ABSTRACT

Over the last decades, there has been an increment on the urban surface, population density and vehicular traffic density of Hermosillo, Sonora, which has generated a series of changes on the urban climatology, such as the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, which consists in a dome that forms over the city by air that is warmer than the one surrounding it; this dome receives the name of Urban Heat Island Profile (United States Enviromental Protection Agency, 2005) and produces an environmental and climate impact that generates a warmer thermal sensation on outdoor spaces. When living in a zone with hot desert climate, is imperative to structure the city in such a way that enables users to get as close to outdoor thermal comfort as possible, decreasing the energy consumption due to air conditioning indoor spaces. This explains the importance of demonstrating the existence of the UHI and locating it in the urban sprawl, through measurements during the summer, with transects in the main axes of the urban structure, obtaining surface temperatures and analyzing the UHI and the factors that intervene in its formation, which will allows to generate strategies for mitigating this phenomenon, benefiting the city's sustainability.

Key words: Urban Heat Island, Surface temperature, Outdoor thermal comport, hot desert climate, Sustainable urbanism.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad y la capacidad de adaptación de los seres humanos definirá la forma en que nos ajustamos exitosamente a la nueva situación del cambio climático. El proceso de urbanización genera cambios en los usos de suelo, al aumentar las áreas construidas se disminuyen las zonas vegetales por lo que se ve afectado el balance energético, los hábitats naturales y el valor estético del paisaje, así mismo al aumentar el CO2 con el uso de automóviles o sistemas mecánicos de climatización, se contribuye al calentamiento global provocando cambios en el medio ambiente traducidos en un aumento de temperatura y contaminación del aire (Higuera, Cueto, Camacho, & Navarro, 2014).

Dentro de una ciudad se experimentan distintas temperaturas comparadas con el área rural diferenciando Islas de Calor Urbanas (ICU) existiendo distintas capas de estudio dentro de la misma. Según la Agencia de protección ambiental de los estados unidos, EPA (2005) existen dos tipos de ICU, la ICU superficial, se refiere a la capa inmediata del suelo y se caracteriza por ser más intensa durante el día y la ICU atmosférica, que contiene dos capas, la capa urbana o capa dosel (UC) refiriéndose a la capa de aire donde se vive desde el suelo hasta el tope de los edificios, Oke (1987) lo ubica bajo una micro escala y el clima está determinada por la naturaleza inmediata de su alrededor y la capa límite superficial (UBL) se refiere a la capa de aire adyacente a la superficie de los techos de los edificios. Sobre ellos se presentan temperaturas distintas a las del suelo como consecuencia de la interacción entre la atmosfera y la superficie del edificio

(Cueto, 2006). Oke (1976) menciona el término bajo un concepto local refiriéndose a la porción de la atmosfera que se ve afectada por la presencia de área urbana como uso de suelo. El espesor de esta capa no es constante y presenta diferencias diurnas y nocturnas.

Este fenómeno impacta a las comunidades al necesitar un elevado costo de energía para enfriamiento interior y provocar una sensación térmica mayor en exterior, por ello los últimos años se ha mostrado interés en el urbanismo sustentable, buscando el manejo de recursos naturales y urbanos de tal forma que se reduzca el impacto ambiental, gastos energéticos, consumo de agua, entre otros.

En el presente trabajo se estudia la ICU superficial. La energía consumida para enfriar un edificio se traduce en calor emitido hacia el exterior, aumentado la temperatura del aire y en consecuencia, provocando sensaciones térmicas mayores a las climáticas (Givoni, Wiley, & Sons, 1998). Tal es el caso de la ciudad de Hermosillo, Sonora, dónde la cantidad de radiación recibida en el periodo de verano puede superar los 1,000 W/m2, aumentando las temperaturas del suelo donde incide. Por ello el conocer la ubicación y morfología de la ICU superficial en Hermosillo, es relevante en cuanto a planeación urbana, a manera de herramienta de diseño para el análisis y control de la misma, para así acercarnos al confort térmico urbano y disminuir los consumos por aire acondicionado, en busca de una ciudad sustentable.

ESPACIO URBANO

La ciudad es un concepto definido desde hace años atrás por distintas disciplinas de acuerdo a su perspectiva, los puntos de vista son diversos ya que este concepto atraviesa por el escrutinio de la mente de cada individuo el cual percibe la ciudad de manera independiente y autónoma a través de sus ojos. Al hablar de espacios urbanos abiertos, es hablar de espacios contenidos por las superficies y fachadas de los edificios adyacentes donde se percibe su historia y cultura (Schjetnan, Calvillo, & Peniche, 1997) y todo ello influye en la interpretación del espacio urbano donde se observan actividades en un espacio específico.

Hoy en día se vive una pérdida del espacio público ya que se percibe como un lugar de transición donde se percibe inseguridad y no es confortable, ya que no son espacios diseñados para habitarlos lo que provoca un encierro voluntario haciendo todavía mayor el uso de los espacios privados, aumentando el uso de sistemas de climatización y con ello aportando CO2 al medio ambiente. Cuando la zonificación urbana de un lugar no es clara, los usuarios tienen dificultades para su movilidad debido a la inadecuada orientación y múltiples usos de suelo, así mismo no existe una identidad urbana y anudado a esto se ven afectadas los ecosistemas locales provocando un deterioro ambiental (Bazant, 1991). La relación entre los espacios que conforman una ciudad y los edificios genera una secuencia espacial urbana donde la suma de todas ellas da como resultado la estructura urbana (Schjetnan, Calvillo, & Peniche, 1997).

Estructura Urbana

La estructura urbana, se compone de todos aquellos elementos que influyen para hacer funcional una ciudad, comprende: infraestructura (agua, electricidad, drenaje, telefonía, gas, voz y datos) espacios urbanos abiertos (calles, plazas, parques.), comunicación (vialidad y transporte) y accesibilidad (aproximación de elementos) (Schjetnan, Calvillo, & Peniche, 1997).

Las actividades de un sitio influyen en la temperatura superficial urbana y por otro, el grupo de los edificios modifican las condiciones climáticas del sitio por su composición, distribución, color y contaminantes que emiten al exterior anudado a esto los espacios abiertos y áreas verdes son pocos lo cual provoca que la contaminación generada por dichas actividades se concentre en la zona bloqueando la circulación del aire (Wong & Lau, 2013).

Un espacio urbano debe ser legible no solo en la estructura de sus calles y plazas sino en la memoria colectiva y la facilidad de localizar un camino buscado y mejorar el conocimiento por medio de una identidad con el medio urbano (Bazant, 1991).

Para la generación de isla de calor los principales elementos de estructura urbana son las superficies de los suelos y edificios adyacentes, las actividades de la población dentro de una comunidad rural o urbana, volumen de tránsito, uso de suelo y densidad poblacional.

Densidad Poblacional

La población urbana del mundo crece rápidamente desde 1950 aumentando de 746 millones a 3.9 billones hasta el 2014 (Naciones Unidas, 2014), México se sitúa dentro de los países con más de diez millones de habitantes hasta el 2014 llegando a un porcentaje de proporción urbana de 79%. Según el censo realizado al 2010 (INEGI, 2010), México cuenta con 112, 336,538 habitantes teniendo como el estado de Sonora en el lugar núm. 18 del país con 2, 662,480 (imagen 1).

La distribución urbana del municipio comprende de cuatro entidades sobresaliendo con un 91.17% la ciudad de Hermosillo como se muestra en la tabla 1. Así mismo se obtiene la población total hasta el 2010 de 715,061 habitantes.

Imagen 1. Número de habitantes en Sonora

Distribución de habitantes en las entidades del municipio de Hermosillo, Sonora al 2010

Entidad	Habitantes	Porcentaje
Hermosillo	**715,061**	**91.17**
Miguel Alemán	30,869	3.94
Bahía de Kino	6,050	0.77
San Pedro	2,938	0.37
Rural	29,424	3.75
TOTAL	784,342	100.00

Tabla 1. Distribución de entidades en el municipio al 2010.
Fuente: Mercado L. con información de INEGI (2010)

Fuente: Mercado L. con información de COESPO e INEGI (2010)

El impactante crecimiento demográfico que experimentó la ciudad de Hermosillo a lo largo de las décadas, también lo presenta en extensión territorial, el periodo de 1975, fue un parteaguas de un rápido e importante crecimiento territorial y la última década 2000-2010 toma un papel importante a resaltar ya que casi duplica el total de la superficie urbana que posee, teniendo al 2010 17,599.20 hectáreas, impactando de gran manera, el ecosistema del territorio y su medio ambiente.

Superficies Urbanas

El efecto de calentamiento en las superficies depende de varios factores como el color, absorción, emitancia y capacidad de almacenamiento térmico, se planea el diseño del objeto arquitectónico como único y autónomo en el contexto urbano, donde se proponen superficies de color blanco aumentando la luminosidad de las calles, provocando reflexiones no deseadas. En una zona con densidad media la radiación se refleja en los edificios en un 80% y en una zona densa se absorbe totalmente sobre el nivel del suelo inmediato, es decir, en los techos, por lo que es lento el proceso de enfriamiento en el interior, cuando los edificios tienen la misma altura la radiación llega a las superficies urbanas y a los edificios (Givoni, Wiley, & Sons, 1998). El desierto tiene grandes capacidades de transferencia de calor y liberación del mismo por lo que si la temperatura aire se eleva, la superficie en contacto también y viceversa (Oke, 1987).

Dado a lo anterior es importante analizar los siguientes elementos en las superficies urbanas a estudiar: emisividad, absortividad, color, porcentaje de área edificada, porcentaje de áreas verdes, porcentaje de asfalto, porcentaje de lote cubierto, ancho de las calles y su relación con la altura de las construcciones.

La infraestructura urbana ha crecido con mayor rapidez que la demografía ya que cada vez se crean colonias y fraccionamientos en la periferia en la ciudad (IMPLAN, 2006) por ello, el volumen de tránsito, y porcentaje de pavimentación se ha incrementado a través del tiempo como una medida de desarrollo e infraestructura en la ciudad, sin una planeación adecuada de crecimiento urbano, causante de problemas de integración, conexiones y fragmentación de la ciudad, teniendo como consecuencia alrededor de 29 % de lotes baldíos en la ciudad aumentando la temperatura superficial de la misma.

La cobertura del suelo y su uso se ven afectados por las áreas construidas con el crecimiento de la ciudad y provocan una disminución importante en áreas verdes donde se engloban parques y jardines públicos, hasta el 2015 se cuentan con 3, 675,556 m2 de áreas verdes, lo cual representa el 2.08% de la superficie total urbana, traducidas en 5.14 m2 de área verde por habitante, presentando un déficit ya que la OMS establece un mínimo de 9m2 por habitante.

ISLA DE CALOR URBANA

La ICU superficial, se caracteriza por ser más fuerte de día, ya que las superficies del suelo están recibiendo directamente radiación solar, calentando zonas como suelos, pavimentos y techos, con temperaturas que oscilan entre los 27˚C y 50˚C, más altas que la temperatura del aire, las diferencias en la zona rural van de 10 ˚C a 15 ˚C y por la noche de 5 ˚C a 10 ˚C. La magnitud varía con los meses dependiendo de la intensidad del sol durante el año y la cobertura del suelo, por lo que se presenta con mayor amplitud en los meses cálidos (EPA, 2009).

Oke (1976) menciona por primera vez el término capa urbana bajo una micro escala determinada por las superficies inmediatas que la rodea tales como el tipo de terreno, materiales, edificios, superficies y estructura urbana, es la capa de aire contenido entre en suelo de la superficie terrestre y la altura de los edificios los cuales son discontinuos y ausentes en áreas suburbanas o de menor densidad, por otro lado, define la capa limite superficial como un fenómeno a meso escala que se refiere a la altura de la capa de aire adyacente a la superficie de los techos de los edificios no es constante en tiempo y atmosfera que se ve afectada por la presencia de área urbana como uso de suelo o bien por los elementos rugosos de una ciudad que son los edificios los cuales alteran las características climáticas de la capa limite superficial.

MÉTODO

Se busca determinar la ICU superficial con un enfoque cuantitativo, y diseño experimental, haciendo uso de estaciones fijas y móviles para realizar comparativas de ubicación y variables climáticas. Las 8 estaciones fijas, distribuidas en la mancha urbana de la ciudad de Hermosillo y tres ejes para cubrir longitudinalmente y transversalmente la superficie urbana con estaciones móviles con el instrumento Kestrel 3000, el levantamiento de datos se realizó por cada kilómetro sobre los tres ejes (Imagen 2); ya que las temperaturas se ven influenciadas por las superficies urbanas que las rodea, se seleccionaron tres horarios: 8:00 hrs., 13:00 hrs. y 21:00 hrs. El trayecto se realizó en automóvil, el levantamiento de datos fue a nivel banqueta a 1,5 metros de altura sin ningún elemento o edificio adyacente que interfiriera con la medición.

Los datos se depositaron en un instrumento dividido en dos grupos, en el primero se colocan los parámetros climáticos de temperatura, humedad, vientos y radiación y el segundo grupo captura información de la estructura urbana que rodea cada uno de los transectos, como % de vegetación, % de edificación, % pavimentos, % de área cubierta, uso de suelo, ancho de las calles y altura de los edificios.

Las mediciones se realizaron los días 26,29 y 30 de Agosto del 2015, cubriendo el periodo cálido, se eligieron días típicos soleados, despejados y vientos en calma.

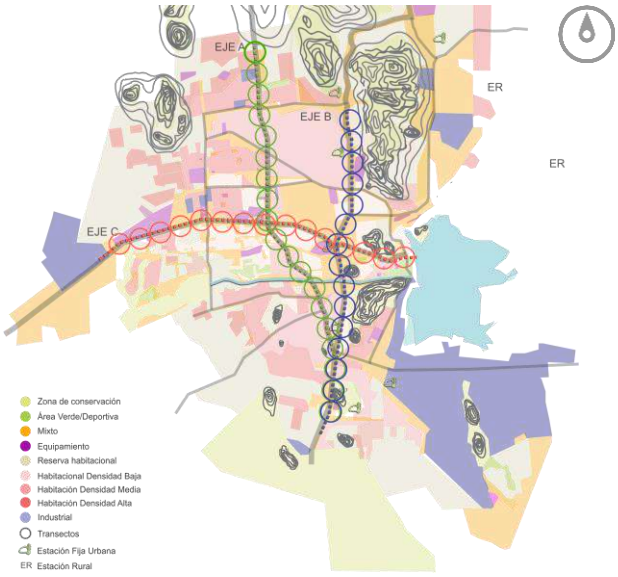


Imagen 2. Número de habitantes en Sonora
Fuente: Mercado L. con información de INEGI (2010)

RESULTADOS

En este trabajo se presentan resultados del período cálido. Los datos reflejadas en la tabla 2, muestra el transecto A, dónde se localiza las temperaturas superficiales más altas con respecto al resto de los ejes, así mismo muestra las diferencias térmicas entre el día y la noche. Por la mañana se tienen las temperaturas más bajas en los tres ejes, analizando el eje A, la temperatura oscila desde los 30,1˚C a los 36˚C, sobre el eje B oscila de los 31˚C a los 34,4˚C y sobre el eje C de 30,6˚C a los 34,7˚C, teniendo mayor amplitud el eje A, se infiere que entre más horas sol se encuentran expuestos los pavimentos y superficies, existe un incremento de las temperaturas superficiales y de la capa urbana.

Por la noche oscilan en el eje A 31,8˚C a los 34˚C, sobre el eje B va desde los 31,4˚C a los 34,2˚C el eje C va desde los 30,7˚C a los 34˚C, obteniendo mayor amplitud por la noche el eje C por causa del albedo de los materiales y la escasa vegetación en dicho transecto.

A medio día se tienen temperaturas desde los 37.6˚C a los 42.7˚C sobre el eje A, el eje B presenta oscilación de entre 38,1˚C a los 42,1˚C y sobre el eje C entre los 38,1˚C a los 41,5˚C, teniendo mayor amplitud el eje A con 5,1˚C, esto a causa de factores como volumen de tránsito, densidad habitacional, uso de suelo y escasa vegetación, es en este horario en donde se generan las ICU superficiales por su tiempo de exposición a la radiación solar incidente.

Analizando el comportamiento a través del día, sobre el transecto C, se observan las mediciones más bajas con respecto al resto de los ejes, por la mañana presenta temperaturas de 30,6 ˚C y a medio día alcanza hasta 41,5 ˚C, teniendo una amplitud de 10,9 ˚C mientras que el transecto A la máxima amplitud es de 11,5 ˚C.

TEMPERATURAS EN TRANSECTOS

Eje A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8-9 hrs	30.1	30.6	33.3	34	34.8	33.8	34.3	34.8	34.4	34.3	34.9	33.7	36	35.2	34	35.5	35.5	36.6	37.1
13-14 hrs	37.6	40.7	38.3	38.8	40.1	40.2	41.2	42.7	42.6	42.7	41.5	41.4	41.2	40.2	41.5	40.4	39.7	39.6	39.8
21-22 hrs	31.8	32.2	32.2	31.8	32.3	32.4	32.2	33	33.5	33.5	33.2	33.4	34	33.7	33.5	33.5	32.9	33.2	32.5

Eje B

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8-9 hrs	31	31.7	33.3	33.2	32.5	33.5	33.4	33.5	33.3	33.6	33.2	33.7	33.7	34.4	34.1	33.3	34.4
13-14 hrs	38.1	40	41.4	40.4	42.1	40.6	40.4	41.3	39.8	40.5	41.1	41.2	40.6	40.5	40.6	39.6	39.2
21-22 hrs	33.9	34.1	33.4	33.3	33.4	33.1	33.2	33.5	33.1	33.2	33.3	34.2	33.7	33.5	33.4	31.8	31.4

Eje C

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8-9 hrs	30.6	30.6	32.8	32.2	31.9	32.4	32.6	32.7	32.7	33.4	34	33.5	33.3	33.6	33.1	33.8	34.7
13-14 hrs	38.4	38.1	39.6	39.5	38.8	39.9	39.4	39.7	39.8	39.3	40.2	39.7	41	41	40.2	39.5	41.5
21-22 hrs	30.7	31.2	31.8	32.6	33	33.4	32.7	33.5	34	33.9	33.7	33	32.7	33.1	33.2	31.9	31.5

Tabla 2.- Temperaturas en transectos
Fuente: Mercado L.

En la Imagen 3, se muestran las temperaturas puntuales, correspondientes a las 8 hrs, 13hrs y 21 hrs.; a las 8 am, el eje A es el que presenta mayores temperaturas en su extremo norte con 37,1℃, mientras que el eje C se mantiene con temperaturas más bajas con respecto a los demás ejes oscilando entre los 30,6℃ – 34.7℃ , las menores temperaturas se presentan en el extremo sur por la baja densidad habitacional del sitio y en el extremo oriente por la proximidad a la presa Abelardo L. Rodríguez ambas por su cercanía a la periferia de la mancha urbana. Con respecto a las 13 hrs. teniendo en cuenta que ya existió un intercambio de energía sobre las superficies, el transecto que presentó mayores temperaturas fue el A con 42,7℃, sobre el transecto 10 elevando la temperatura 8,4˚C con respecto a las 8 a.m. en los puntos 8,9 y 10. Por la noche el transecto A, destaca por su alta temperatura, y aunque lograron descender 9,2˚C con respecto al medio día, la mayoría de los puntos no logran estar a la temperatura de la mañana aunque la mancha urbana tenga una hora de sombra ya que la calle aún no se recupera, aquí es donde el fenómeno de la Isla de Calor Urbana atmosférica se presenta teniendo temperaturas mayores por la noche suprimiendo la capa limite superficial de 100-300 metros, mientras que en el día la capa limite superficial se extiende de 1 kilómetro hasta 40 kilómetros.

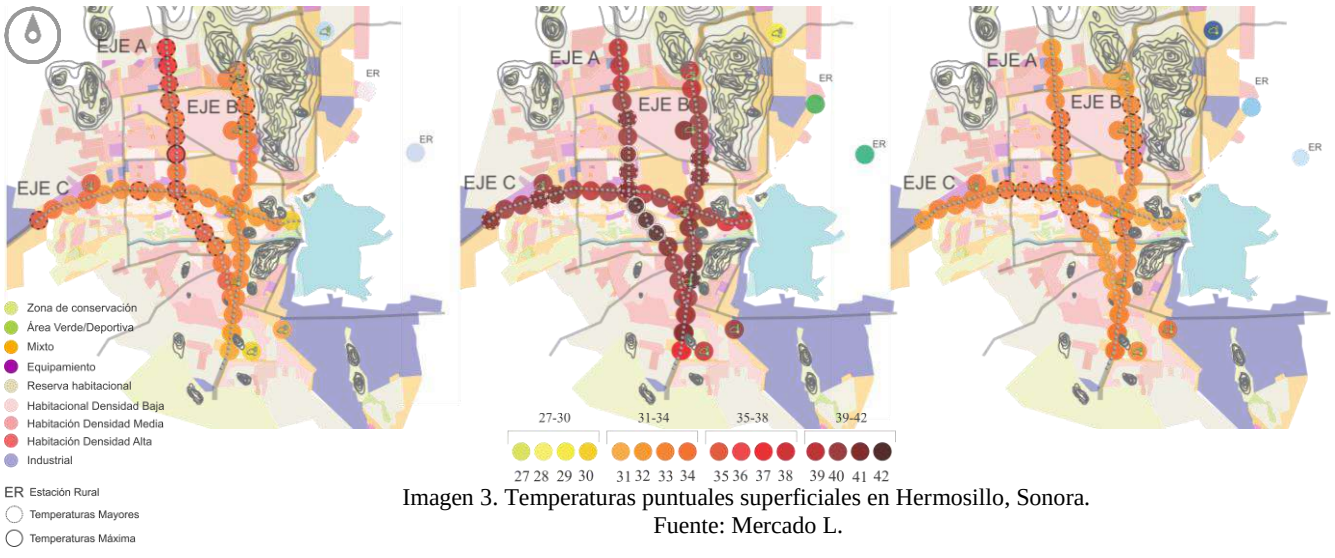


Imagen 3. Temperaturas puntuales superficiales en Hermosillo, Sonora.
Fuente: Mercado L.

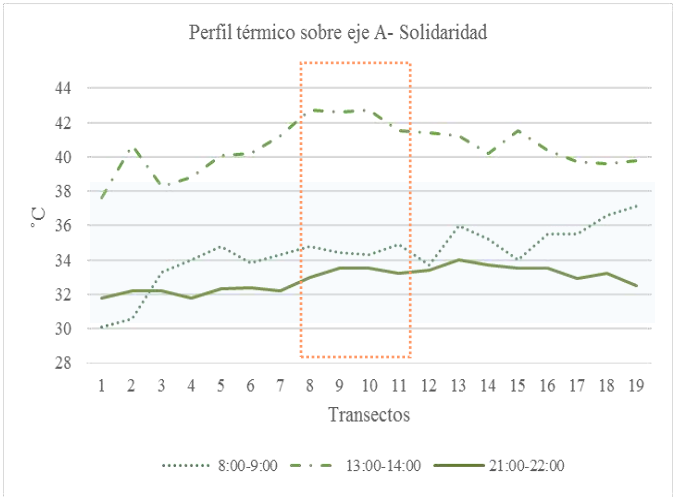
Al ser el eje A-Solidaridad el trayecto con datos destacados y donde se infiere la ubicación de isla de calor superficial, se obtuvo el perfil térmico de los transectos observando que la temperatura de la noche es de 1˚C - 2 ˚C menor que la del día, el aumento de temperaturas en el horario de las 13 hrs. asciende a 42 ˚C con una amplitud de 9.2 ˚C justo en el transecto del centro, entre la calle Domingo Olivares y el bldv. García Morales.

Las causas de la formación de ICU, se da por la estructura urbana y las superficies urbanas, que influencian para el aumento o reducción de las temperaturas superficiales y con ello la capa urbana que al mismo tiempo interactúa con la capa límite superficial. En la tabla 3, se muestran los datos del eje A con los elementos del paisaje urbano registrados en los transectos con las temperaturas mayores que permiten conocer las causas de las intensidades y presencia de la ICU.

Superficies Urbanas en el eje A-Solidaridad

Punto	% Vegetación	% Pavimento	% Edificación	% Área cubierta	Ancho de calles (carriles)	**Altura** edificios (niveles)
8	0	100	100	100	8	2
9	20	100	100	100	8	2 - 5
10	20	100	100	100	8	2
11	0	100	100	60	8	1 – 2

Tabla 3.- Transectos 8, 9,10 y 11 sobre eje A-Solidaridad
Fuente: Mercado L



Gráfica 1. Perfil térmico sobre eje A- Solidaridad
Fuente: Mercado L.

Con lo anterior se infiere una aproximación de la isla de calor superficial, sin embargo considerando que los datos no son en un mismo instante sino en periodos y días distintos, se analizaron y procesaron imágenes satelitales LANDSAT8, tomando las 8 bandas para generar distintos gráficos y obtener los contrastes en uso de suelo y temperaturas, específicamente la banda 10 la cual se refiere a la banda térmica de baja ganancia térmica, utilizando el programa Terrset (Clark University, 2015) para su procesamiento y obtener temperaturas superficiales, realizar comparativas y con esto concluir la presencia de la Isla de Calor Urbana Superficial.

Como se observa en la imagen 4, predominan las temperaturas mayores a 35 ˚C sobre el poniente de la ciudad, destacan con más de 38˚C las zonas rurales, el área industrial, sobre el Blvd. Solidaridad y en algunos puntos dentro de la mancha urbana, lo cual coincide con la toma de datos en campo.

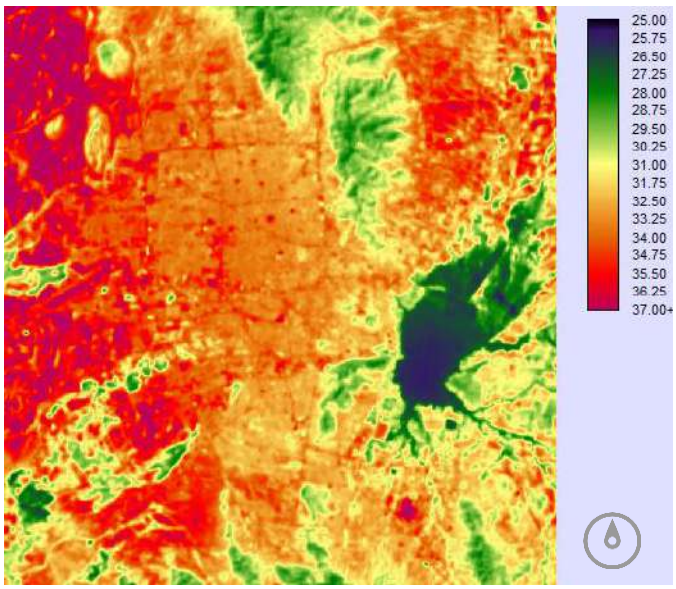


Imagen 4. Temperaturas superficial periodo cálido
Fuente: Mercado L. con información de LANDSAT8, procesada en Terrset

CONCLUSION

La zona conurbana y sur de la mancha urbana registran 38 ˚C, mientras que en la ciudad la más alta se da en 42 ˚C en el Blvd. Luis Encinas y Solidaridad, área que por las horas expuestas de sol de superficies como pavimentos y edificios y una de las arterias principales de la ciudad, surge como el punto crítico de temperatura impactando el tráfico y la vialidad en la distribución de la misma. Dentro de la mancha urbana se observan algunos puntos que destacan por sus altas temperaturas, en ellos se desarrolla industria pesada, industria ligera, corredor comercial o mixto, provocando estos saltos entre un punto y otro.

Con el uso de suelo, volumen de tránsito, distribución de áreas verdes, densidad poblacional y analizando los transectos, careciendo de vegetación y 100% edificada y pavimentada, se predice la morfología de la ICU sobre las temperaturas superficiales del Blvd. Solidaridad en los transectos 8,9 y 10 que corresponden entre calle Olivares y Blvd. Luis Encinas Johnson, ver imagen 5.

La identificación de la ICU en la mancha urbana, permite estudiar factores que intervienen para el incremento de la temperatura en el sitio, al contrastar con los elementos de estructura urbana, permite identificar medidas de mitigación para reducir la intensidad del fenómeno, y contribuir a una ciudad habitable.

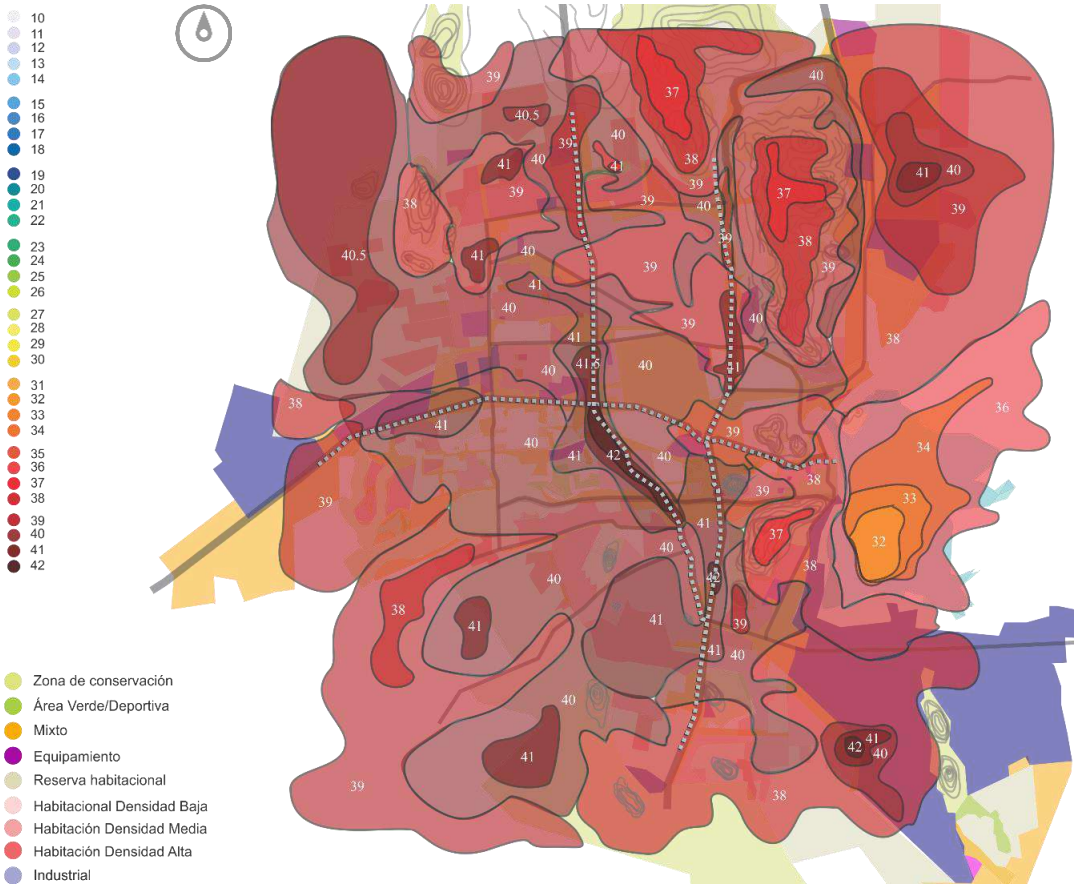


Imagen 4. ICU superficial en Hermosillo, Sonora.
Fuente: Mercado L.

REFERENCIAS

Bazant, J. (1991). Manual de criterios de diseño urbano. México, D.F.: Trillas.

Cueto, O. R. (2006). Balance de energía y capa límite superficiales sobre distintos usos de suelo en la Cd. de Mexicali B.C. Universidad Nacional Autónoma de México.

Givoni, B., Wiley, J., & Sons. (1998). Climate Considerations in Building and Urban Design (1 edición ed.). Nueva York: Wiley.

IMPLAN, Instituto Municpal de Planeación Urbana . (2013-2015). Plan Municipal de Desarollo Urnano. Hermosillo, Sonora.

INEGI. (2010). Instituto nacional de estadística y geografia. Recuperado el 2014, de http://www.inegi.org.mx/.

Naciones Unidas. (2014). World Urbanization.

Oke, T. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. Atmosphere, 14(4), 268-277. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422.

Oke, T. R. (1987). Boundary Layer Climates (Segunda Edición ed.). London Editorial.

Schjetnan, M., Calvillo, J., & Peniche, M. (1997). Principios de diseño urbano ambiental. México, D.F.: arbol editorial.

United States Enviromental Protection Agency. (2005). Smart Growth and Urban Heat Islands. Smart Growth Network, 1.

Wong, J. K., & Lau, L. S.-K. (2013). From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. Habitat International, 39, 25-35.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO Y ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE UNA VIVIENDA TIPO INTERÉS SOCIAL EN LA PAZ, B.C.S.

Alejandra Medrano Gutierrez., Mario Manuel Alan Yee, Federico Poujol Galván, Oscar Resendiz Pacheco
[1]Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al sur km 5.5, La Paz, B.C.S. C.P. 23080, México. Tel (612)1238800 Ext. 6210 y 4614, amedrano@uabcs.mx

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue el diseño óptimo de una vivienda de interés social localizada en La Paz B.C.S. atendiendo al costo total de la misma, el cual incluye costos de construcción y operación. El diseño considera diferentes materiales como el panel W, el cual permite un ahorro en costos de construcción del 10% respecto de materiales tradicionales. Utilizando el programa Design Builder se determinan los costos de operación esperados, por concepto de energía para climatización. Una comparación de los costos totales de las viviendas propuestas, y en particular los tiempos de construcción, las favorece con respecto a viviendas convencionales.

Palabras claves; Diseño, ahorro, clima, sistemas constructivos, ahorro energético.

ABSTRACT

Optimal design of social housing located in La Paz B.C.S. considering total cost of the same, which includes construction and operating costs was the aim of the present work. The design takes into account different materials such as W panel, which allows savings in construction costs of 10% compared to traditional materials. DesignBuilder software is used to obtain expected operating costs, specifically those for air conditioning. A comparison of the total cost of the proposed homes, and specially construction time favors them against conventional homes.

Key Words: Design, savings cost, clime, construction system, savings energy

INTRODUCCIÓN

Baja California Sur es un estado con clima cálido seco, en el cual se alcanzan temperaturas promedio en el verano por arriba de los 42°C, por lo que en se periodo se incrementa la demanda de energía eléctrica al utilizarse los acondicionadores de aire para mantenerse en confort térmico. Por lo anterior, quedan ampliamente justificados esfuerzos por realizar estudios de confort térmico y ahorro de energía, así como propuestas de nuevas casas con estrategias bioclimáticas, las cuales dan como resultado casas con mejor desempeño térmico, es decir menos dependientes de la energía convencional.

Entre diversos autores que se ocupado del tema se encuentran Jiménez E. (2008), quien analiza viviendas de ladrillo. Saldaña (2015) evalúa mediante simulación el efecto de recubrimientos en viviendas de interés social. Orozco y Duque (2000) utilizaron Energy Plus para hacer recomendaciones en cuanto a los materiales que se podrían utilizar en la construcción del inmueble.

En el presente trabajo se emplearan materiales con distintas características que nos ayudaran a comparar la eficiencia térmica de los materiales que actualmente se utilizan en los sistemas tradicionales de vivienda. En particular se propone el sistema constructivo de Paneles W de poliestireno, losa de cimentación a base de concreto premezclado y el uso mixto de castillos armados de concreto para el reforzamiento de las paredes y soporte de cargas muertas (losa).

Con base en un diseño y sistemas constructivos comunes se evalúan el material propuesto y el material convencional en la región (block de concreto) con ayuda del Software Design-Builder, el cual permitirá calcular el comportamiento térmico de las viviendas y su consumo de energía para climatización artificial.

Fig.1.- Vista exterior de la vivienda.

La propuesta de vivienda está pensada para situarse dentro de la localidad de la Paz BCS, donde predomina un clima seco (92%). Principalmente se encontrara situada en una orientación hacia el Noreste, aprovechando así la iluminación natural para que la vivienda sea objeto de un ahorro.

METODOLOGÍA

El terreno propuesto para el prototipo de vivienda consta de 8.00 m de frente por 24.00 m de fondo con un total de 192.00 m², con una construcción de vivienda de 49.00 m².

Elementos constructivos de la vivienda.

Para la vivienda los materiales propuestos son el sistema constructivo de Panel W como elemento térmico para los muros con un espesor de 12 cm y una losa a base de Panel W y trabes de soporte con un espesor de 15 cm ambos con recubrimiento de mortero cemento – arena (exterior e interior). Para las ventanas se empleará un vidrio normal de 3 mm y para las puertas se emplearán puertas de tambor para una mayor resistencia térmica. Se proponen estos materiales ya que son producidos en la región, su bajo costo en el mercado, su fácil manejo de traslado y la rapidez en la construcción al usarlos.

El panel W, consiste en paneles de poliestireno y mallas de alambre de acero que enjaulan al panel. Por la parte externa se le aplicara una base de concreto y cemento -arena por la parte interna formando un solo elemento constructivo resistente. Los muros y losas son similares, pero con diferentes espesores.

En la propuesta de vivienda se propone un estilo arquitectónico popular el cual está basado en las propuestas construidas por la Dependencia de INFONAVIT.

Orientación.

La vivienda propone la orientación Noreste para las zonas que deben ser más frescas. Esto se hizo para poder captar la luz natural. También se tomó en cuenta la orientación de las ventanas para tener acceso a esta luz en ciertas temporadas como en invierno y verano para su mayor confort. Así mismo se tomó en cuenta en la orientación que en verano debe haber un acceso de luz limitado para que la radiación no caliente la vivienda en esta temporada. Para la orientación se consideró también facilitar la entrada de radiación en invierno para que caliente y haya un confort térmico en esa temporada.

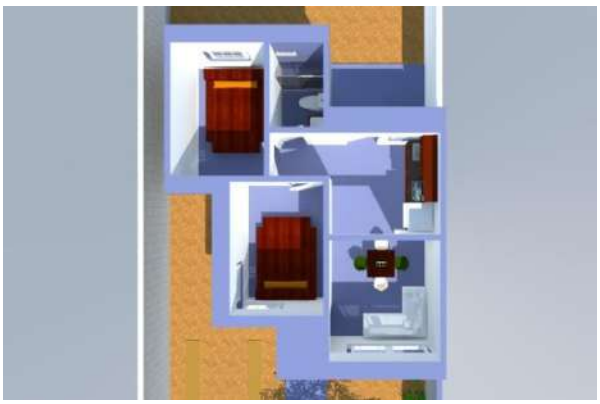


Fig. 2.- Vista interior de la vivienda

Software de simulación e información de entrada

Se utilizó software **Desing Builder** para calcular temperaturas del interior y el consumo de electricidad para climatizar suponiendo un equipo con COP de 1.8, de capacidad ajustable a la demanda, especificando horarios de uso de acuerdo a ocupación del espacio, según su función (p. ej. Uso nocturno para dormitorios). Se utilizó una base meteorológica de datos de la Paz, B.CS. La geometría, propiedades y espesores de la vivienda se especifican más adelante. La estrategia de ventilación, en el caso de la simulación en condiciones de ventilación natural fue ventilar en la noche, con ingreso de aire exterior de menor temperatura al del interior.

Características de la vivienda.

- Casa de interés social con dos recámaras, baño, sala, comedor y cocina.
- Superficie de construcción de aproximadamente 49.00 m².

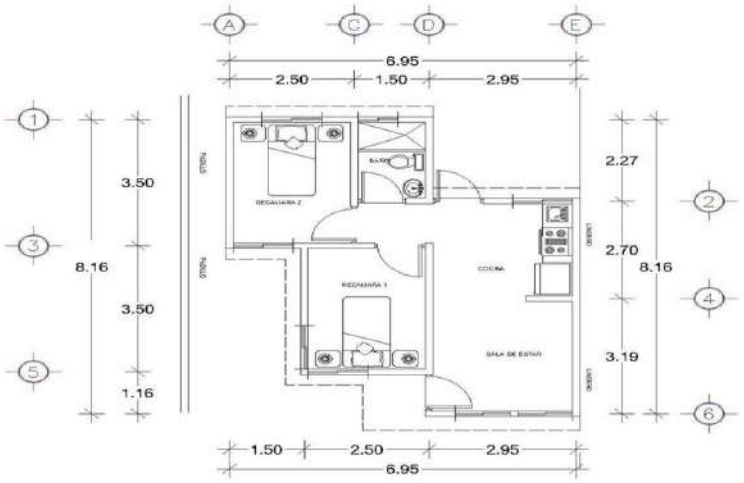


Fig.3.- Planta arquitectónica

Tabla 1.- Características térmicas de los materiales. Vivienda de panel W

	Materiales	Densidad (kg/m^3)	Calor especifico (J/kgK)	Conductividad (W/mK)	Espesor (cm)
MUROS DE CARGA	Cemento (Hormigón)	1,900	1,000	0.58	2
	Acero de refuerzo (Malla Electro soldada) (como puente térmico al 5% del área)	7850	480	58	1
	Poliestireno (Expandido)	10	1400	0.046	12
LOSA	Cemento (Hormigón)	1,900	1,000	0.58	2
	Poliestireno (Expandido)	10	1400	0.046	15
	Acero de refuerzo (Malla Electro soldada, como puente térmico al 5 %)	7850	480	58	1
	Yeso Color Blanco	800	0.58	1090	1

Para la vivienda de block se especificó usa losa con capa de compresión de 10 cm de concreto, y una capa de losa aligerada de 20 cm de casetón de poliestireno con 30% de puentes térmicos de concreto. Se utilizaron las propiedades de las bases de datos del programa. Para los muros internos y externos se especificó block hueco de bajo peso con propiedades de la base de datos del programa. En ambas viviendas el material del piso fue loza de 10 cm de espesor, con temperaturas de suelo similares a las del archivo meteorológico.

RESULTADOS

Costos de construcción.

La comparación de costos de construcción, se llevó a cabo mediante el análisis de los presupuestos de dos materiales distintos uno de block y el otro con panel W (Tabla 1). En el análisis se determinó que desde el punto de vista económico de ambos materiales, el costo de la vivienda del prototipo con sistemas de muro utilizando panel W fue de un 7% más económico que el costo de construcción utilizando block. Esta variación podría considerarse poco significativa en términos de porcentajes, refiriéndose al costo de solo una vivienda. Pero puede ser una gran variación cuando la cantidad de casas o unidades de vivienda se amplia. Por lo tanto esta cantidad de diferencia en el costo llegaría a representar una gran diferencia económica en el momento de planear un proyecto de viviendas de interés social.

Tabla. 2- Costos totales del presupuesto utilizando los dos tipos de material a simular.

Material utilizado	Costo total del presupuesto
Panel W	$266,322.56
Block	$284,854.06

Simulación y Costos operativos.

Se aprecia en la Fig 4, el comportamiento térmico simulado de la casa de bloque en el mes de julio, el cual muestra cierto amortiguamiento de la temperatura exterior el 21 de julio, sin lograr condiciones de confort.

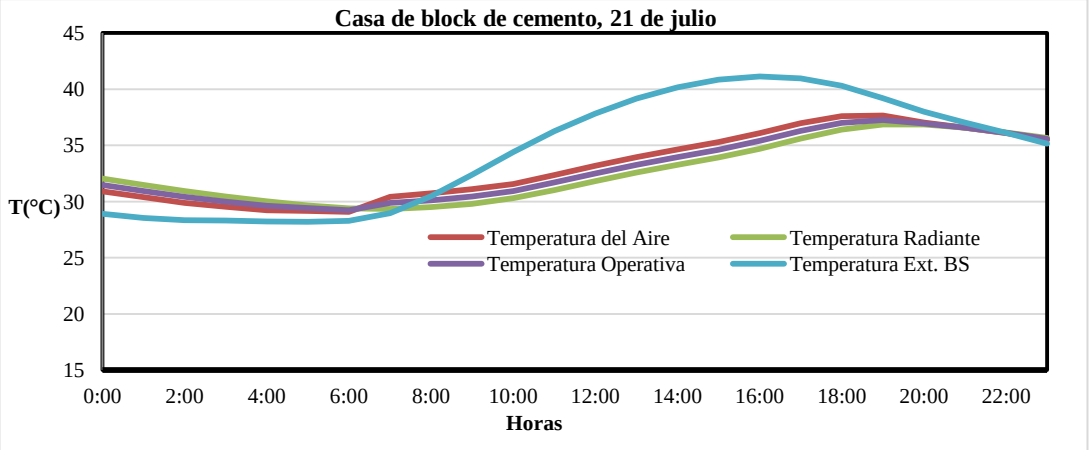


Fig. 4. Temperaturas en el interior de la vivienda a base block de cemento en un día del mes de julio, en condiciones de ventilación natural.

El comportamiento de la casa de panel W ventilada naturalmente es bastante similar a la de bloque en julio con similares amortiguamientos en julio. (Fig 5)

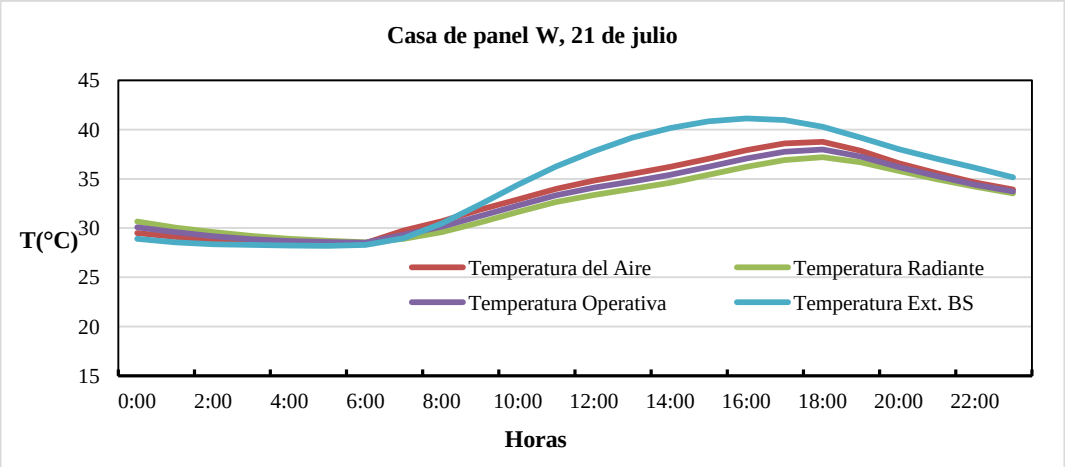


Fig. 5. Temperaturas en el interior de la vivienda a base de panel W, en un día de julio, en condiciones de ventilación natural.

Se realizó otra simulación de una casa a base de paneles W, pero sustituyendo las paredes que quedaban al sureste por paredes material de block (Fig.6).

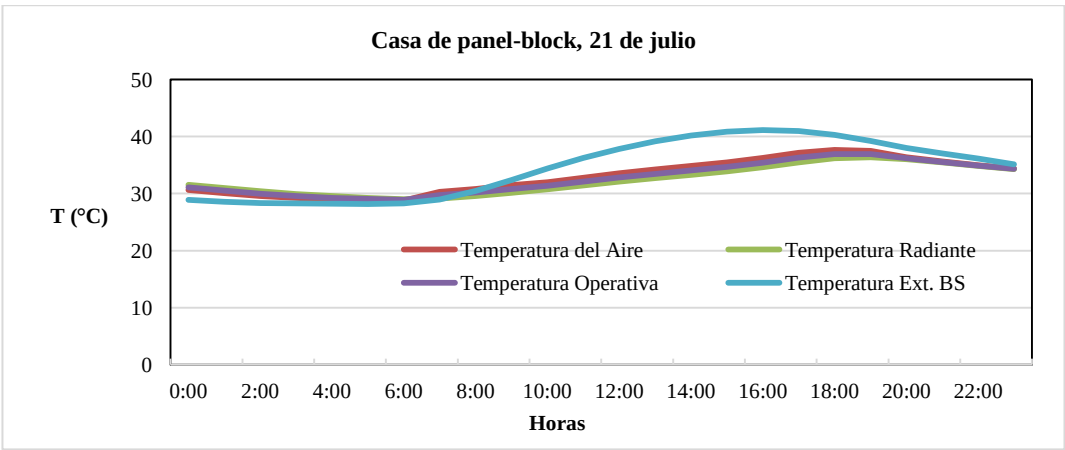


Fig. 6. Temperaturas en el interior de la vivienda a base de panel W y block, en un día de julio, en condiciones de ventilación natural.

En cuanto al gasto de energía para mantener condiciones de confort en los espacios, comedor, cocina y dormitorios, durante la temporada de verano se obtiene casi un 15% de ahorro en el consumo en las casas a base de panel W, con respecto a las casas a base de block, como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3.- Comparación de gastos en refrigeración (electricidad) durante la temporada de verano (de abril a noviembre)

Gasto de refrigeración durante el verano (kWh)		
Panel W	Block	Panel y Block en paredes sur
4142.6585	4914.318	4569.2534

.CONCLUSION

Además del comportamiento térmico ligeramente superior de las viviendas propuestas respecto de las convencionales, es importante tener en cuenta la mano de obra en proyectos de construcción de viviendas de interés social. Las viviendas construidas con paneles W tienen la ventaja de poder ser viviendas prefabricadas, que se ensambla con rapidez, sin costos de equipos y una vez cubiertas con concreto son perfectas para climas fríos o con altas temperaturas. Utilizar paneles W ayudaría a reducir el tiempo de construcción con respecto a los sistemas tradicionales ya que es de fácil colocación de instalaciones eléctricas, sanitarias e hidráulicas.

REFERENCIAS

INFONAVIT, (2001) "Programa Nacional de Vivienda Económica", http:infonavit.gob.mx, México.
INEGI (2010) "Clima de Baja California Sur", http://www.cuentame.inegi.org.mx, México
DESIGNBUILDER SOFTWARE LIMITED. (2016). "DesignBuilder Software", http://www.designbuilder.co.uk/
CEMIC, (2015- 16) "Vivienda 2015-16, Catalogo de costos directos", México
JIMÉNEZ TORRES EDGAR (2008), Estrategias De Diseño Para Brindar Confort Térmico En Vivienda EN La Ciudad De Loja , Universidad Técnica Particular De Loja Escuela De Arquitectura , Loja , Ecuador , 2008 .
Resendiz Pacheco Ocar, Saldaña Juan Ramón, De la Cruz Galindo Madelein, Luna León Anibal. (2015) "Comparación del Comportamiento Térmico de Viviendas recubiertas con compuesto de celulosa y viviendas con acabado externo simple de sólo mortero y arena en la paz b.c.s mediante el programa Energy Plus". XXXIX Semana Nacional de Energía Solar. Campeche
Orozco Alvarado C. y Duque J.(2000). Simulación Térmica de un Edificio con Fines de Ahorro Energético. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Colombia. 9 p.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece apoyo al proyecto CONAVI 14- 235832

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SU EFECTO EN LAS ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVO PARA EDIFICIOS

José A. Soto Ruíz; Juan R. Mayorga Cervantes

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco, Instituto Politécnico Nacional, Fuente de los Leones 28, Naucalpan de Juárez, Estado de México. CP 53760. 57296000 ext. 68020. E mail. oni31@hotmail.com

RESUMEN.

La contaminación atmosférica es el resultado de la intromisión de sustancias químicas en la composición natural de la atmosfera, ésta puede darse de forma antropogénica o natural. El desarrollo urbano, es una de las principales causas humanas de ésta problemática a nivel mundial. La contaminación es producida por la emisión de gases originados por procesos químicos, que a su vez se generan por la combustión incompleta de recursos fósiles como derivados del petróleo, carbón y leña. Una característica de la contaminación atmosférica, es su comportamiento derivado de fenómenos fotoquímicos como la absorción y la dispersión de la luz, causantes de nubes rojizas o grises, acuñando el término de "smog fotoquímico" que disminuye la calidad visual. Con base en este concepto se establece entonces que existe una alteración en el paso del espectro lumínico por la contaminación atmosférica, mermando el confort lumínico, y así, la eficiencia energética de edificios, tema toral en las estrategias de diseño pasivos. Con el objetivo de obtener un patrón de comportamiento lumínico en ciudades con problemas de calidad del aire, se realizaron mediciones lumínicas in situ durante un periodo de 45 días correspondiente al Otoño en la ciudad de Santiago de Chile, y en Ciudad de México, obteniendo como resultado, indicadores de afectación lumínica causada por contaminación atmosférica.

ABSTRACT.

The atmospheric pollution is produced by meddling of contaminants and it can come naturally of anthropogenic. Urban processes are the most important cause worldwide. Air pollution is caused by the emission of gases produced by incomplete chemical reactions of fossil fuels like oil, firewood or coal. A typical characteristic of the air pollution, is the photochemical behavior that creates reddish clouds and light scattering that lessens the visual quality in urban environments. Based on this concept it is determined that air pollution causing decrease in visual comfort and energy efficiecy of buildings. To determine a pattern of behavior lighting, natural light levels were measured in two cities with air pollution problems: Santiago de Chile and Mexico City for 45 days. With these measurements the first indicators of behavior of natural light were obtained.

Palabras clave: contaminación, atmosfera, smog fotoquímico, confort lumínico.

ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVO PARA EDIFICIOS.

La luz natural es un elemento básico para determinar la eficiencia energética de las edificaciones, el LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) establece que el aprovechamiento de la luz natural, precisa el uso eficiente de energía eléctrica por concepto de iluminación en las edificaciones, dicho indicador forma parte del diseño de espacios basados en las estrategias de diseño pasivas (USGBC, 2015). En conjunto, todos los indicadores integran a la edificación como eficiente o sustentable. El hecho de establecer estrategias de diseño pasivas, tienen como objetivo determinar con base a las condiciones ambientales las recomendaciones y las herramientas de calculo que permiten aprovechar los recursos de cada sitio para hacer eficientemente confortable un edificio, incluyendo la luz natural (Alrubaih et al, 2013).

Por este motivo resulta imprescindible considerar todas las condiciones medio ambientales que cada sitio tiene, incluyendo las de origen antropogénico, como la morfología propia de las ciudades y sus fenómenos incluyentes como la contaminación atmosférica. La centralización de la economía en las ciudades, incrementa el desarrollo de las actividades humanas, lo que propicia un crecimiento urbano dando origen a conflictos citadinos como la movilidad en tráfico rodado y la contaminación del aire, tal es el caso de la Ciudad de México y Santiago de Chile. Esto ha ocasionado un impacto en la composición natural de

la primera capa de la atmosfera terrestre, la troposfera, cuyo desequilibrio químico produce alteraciones en la visibilidad, la salud y la degradación de los materiales. Las afectaciones derivadas de la calidad del aire en construcciones emplazadas en las ciudades, como Ciudad de México y Santiago, van desde las que corresponden directamente a alteraciones en las propiedades físicas o químicas de las construcciones, hasta las afectaciones colaterales aparentemente imperceptibles, como las estrategias de diseño pasivas, por ejemplo el comportamiento lumínico.

La atmósfera terrestre.

El espacio habitable para el ser humano, es el espacio físico en el que existe una persona y está integrado por la parte construida, psicológica, social y natural. Ésta última se refiere al entorno que lo rodea y que no ha sido modificado por el hombre. Así como el espacio habitable construido tiene límites físicos, en el medio natural, la vegetación, la tierra, el agua y el aire son los elementos que limitan el espacio habitable de forma natural, entendiéndolo como el espacio que determina el bienestar del hombre. Éstos elementos naturales, el hombre los percibe mediante los sentidos, en el caso del aire para determinar la zona de bienestar de lo habitable, se establece que es donde se compromete las funciones vitales, debido a que las condiciones atmosféricas cambian en función del aumento de la altura pues la cantidad de oxígeno y temperatura decrecen mientras la presión aumenta, provocando que el aire no produzca bienestar en las personas, generado por la composición de la atmosfera terrestre. La atmosfera urbana por su parte, es el resultado de la combinación de productos químicos liberados por una serie de complejos procesos químicos con los que se interfieren en los sistemas gaseosos naturales desequilibrando la composición original de los fluidos (McDonald, 2012).

Composición de la atmósfera terrestre. La atmosfera terrestre es un sistema complejo de gases con flujo dinámico de masas (Bohren, 2006) que ante la evidencia de la existencia y permanencia de la contaminación fotoquímica, se detona la presencia de trazas atmosféricas, como las de los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y monóxido de carbono (Crutzen, 1995), desequilibrando la composición gaseosa en la tropósfera (primera capa de la atmosfera).

La capa Tropósfera atmosférica, es la primera de cuatro capas generales de la atmósfera que se encuentra desde la Tierra hasta poco más de 10Km de altura, dependiendo del emplazamiento del sitio, pues en los polos esta distancia promedio es menor. Posteriormente, existen 3 capas más de la atmosfera terrestre, que se limitan de forma invisible por condicionantes climáticas, como la presión, la temperatura y la radiación (Liou, 2002).

Lo que hace que la primera capa de la atmosfera sea habitable, es su constante aumento en equilibrio de las 3 variables antes mencionadas temperatura, altura y presión, como se puede observar en la ilustración 1, pues si se compara el comportamiento de las variables en las otras tres capas, podemos observar un inconstante modelo de crecimiento en relación a la altura.

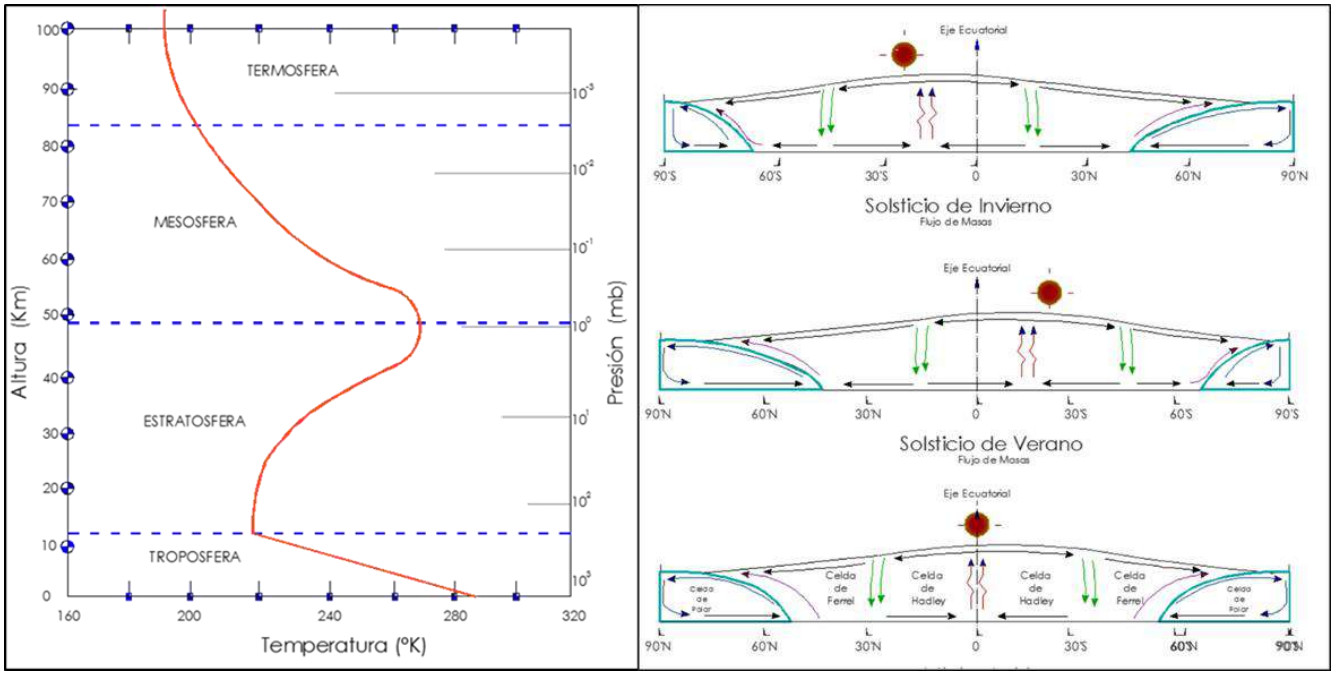


Ilustración 1. Izquierda, muestra gráficamente la relación entre temperatura, altura y presión así como las capas de la atmosfera. Derecha, muestra corte esquemático del movimiento de masas en el planeta Tierra. Elaboración propia, 2016 basado en Liou, 2002.

La constante en el equilibrio, está determinada por el movimiento de masas proveniente de las corrientes en polos y el Ecuador, la cual se modifica de forma periódica durante las estaciones del año, con base al movimiento del planeta alrededor del sol, esto puede comprenderse de mejor manera en la ilustración 1, lado derecho que muestra un corte esquemático del movimiento de masas.

El sistema de gases que presenta hoy la atmosfera, es el mismo sistema que existía hace dos mil años, derivado de múltiples cambios que para alcanzar la composición que hoy tiene, pasaron millones de años e innumerables procesos climáticos (Liou, 2002) sin embargo, la intromisión de gases a la atmosfera, derivado de las actividades antrópicas han modificado en las últimas décadas la proporción natural de sustancias gaseosas principalmente CO2, provocando una alteración en la atmosfera en todo el mundo (Wu et. al, 2016).

La contaminación atmosférica en zonas urbanas (sitios de aplicación de las mediciones: Ciudad de México Santiago de Chile).

Se dice que se encuentra contaminado cuando distintos elementos moleculares alteran el orden de la estructura primigenia de la distribución original de aire (Molina. 2000). La contaminación atmosférica o del aire, es la intromisión de gases nocivos a la salud en cantidades superiores a las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los cuales están ligados a la cantidad de moléculas nocivas en una cantidad de aire establecida, en conjunto a la capacidad natural que tiene la atmosfera para limpiarse de forma natural. La contaminación del aire se debe a reacciones químicas incompletas de productos derivados del petróleo como gasolinas, gases combustibles, así como leña y carbón que al ser emitidos al ambiente y sometidos a una interacción con la luz natural y la temperatura, provocan dos tipos de contaminantes: los contaminantes primarios y los contaminantes secundarios (Vega et. al, 2011). Los del primer tipo, son los que se emiten directamente a la atmosfera como el dióxido de azufre (SO2), mientras que los del segundo grupo los integran los que se generan por procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios como el ácido sulfúrico (H2SO4) que se forma por la oxidación de SO2 o el NO2 producto de la oxidación del NO y el ozono (O3) que se genera a partir del O2 (Martínez, 2005).

Del producto de estas reacciones químicas, se genera el llamado “smog” que proviene de las palabras *smoke* y *fog* es decir humo y niebla. Existe el tipo de smog fotoquímico que proviene de las reacciones entre el SO2, NO2, O3 y el rango de luz ultravioleta, produciendo una nube rojiza o gris, dependiendo de las condiciones climáticas obstruyendo el paso del resto del espectro electromagnético.

La contaminación en áreas urbanas se ha estudiado principalmente en naciones desarrolladas como E.U.A. y Unión Europea, y se ha llegado a concluir que uno de los fenómenos de mayor importancia que ha incidido en la calidad del aire, es la transición de áreas rurales a urbanas por la deforestación y las implicaciones climáticas que esto conlleva (Raga et. al, 2001).

Sin embargo en los emplazamientos urbanos denominados “*mega-ciudades*” como la ciudad de México y Santiago de Chile, son ciudades en desarrollo en las cuales no necesariamente las implicaciones de la transición del suelo rural a urbano ha tenido un impacto tan significativo en la calidad del aire, pero sí en términos de movilidad en tráfico rodado. Por su parte, la ubicación geográfica juega un papel primordial para incidir en las condiciones adversas de la calidad del aire, puesto que las ciudades en desarrollo con los mayores índices de contaminación se encuentran en latitudes subtropicales y tropicales donde la radiación solar es mayor y los vientos son ligeros en comparación con otras latitudes, lo que sumado a la deficiente infraestructura y crecimiento exponencial de la densidad ocupacional produce emisiones de PM2.5 y PM10nm (Raga et. al, 2001).

Cifras del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), señalan una tendencia de crecimiento de las áreas urbanas, dado que con base a que en el año 2000 se calculó que el 47% de la población vivía en estas zonas, se prospectó que para el 2050 se espera que sea del 65%, lo que en consecuencia proyecta un alza en las emisiones de gases contaminantes precursores del ozono (PNUMA, 2002).

En Ciudad de México, estudios de la comisión de medio ambiente y el centro Mario Molina realizados en 1998, demostraron que una de las causas de mayor significancia para la mala calidad del aire es la cantidad de vehículos automotores a gasolina, ya que son los generadores del 40% de hidrocarburos, el 98% de monóxido de carbono y el 81% del total de NOX, por tal motivo la inclusión de normas que restringen el uso de vehículos sin catalizadores y en mal estado, demostró una tendencia deprimida en los niveles de emisiones de gases contaminantes (Schifter, et al., 2005).

La discusión de si la calidad de los motores y las gasolinas son la principal causa de la mala calidad del aire en la ciudad de México, reinició en 2016, derivado de una temporada de alto índice de ozono atípica en el periodo de Abril a Junio del mismo año, como resultado de cambios en la temperatura y humedad que no han favorecido al movimiento de masas térmicas, por lo que los vientos no son suficientes para drenar la atmósfera (SIMAT, 2016).

Por su parte en la ciudad de Santiago de Chile una normativa similar se aplica y limita el tránsito de automóviles según las políticas de transporte público, que incluyen el mejoramiento del metro y buses en la ciudad. Por su parte se inició la restricción del uso de vehículos privados por medio del sello verde, que limita el uso de automóviles sin convertidores catalíticos, aunado a una segunda restricción durante las pre emergencias declaradas por las autoridades con base a las mediciones de calidad del aire (de Grange, 2011).

Modelos de cálculo de Iluminación Natural.

Los modelos de cálculo de iluminación natural tienen por objetivo, encontrar los valores lumínicos idóneos para los espacios construidos, considerando el entorno y las necesidades de los espacios. Para esto, los modelos existentes, generan mediante variables, una serie de procesos que consideran, el espectro electromagnético en su rango de luz visible, la atmosfera causante del coeficiente de cielo y las reflexiones provocadas por el exterior y por el interior. Al mismo tiempo, se considera como atenuantes, el emplazamiento del sitio y el clima, principalmente la nubosidad, ya que el agua en vapor provoca dispersión de la luz natural.

En tal caso, los modelos calculan la incidencia lumínica para aprovechar el recurso natural y disminuir la huella de carbono que cada edificio deja por concepto de iluminación artificial. Se puede determinar la cantidad de la luz natural mediante el uso de modelos matemáticos que considera cada variable como atenuante de la iluminación, así como las dimensiones de los espacios, y se ha demostrado que con la correcta utilización elementos pasivos como las ventanas colocados con base a un sistema cuantitativo, se mejora la eficiencia lumínica de los espacios, siempre y cuando se consideren la mayor cantidad de variables posibles (Mangkuto, 2016).

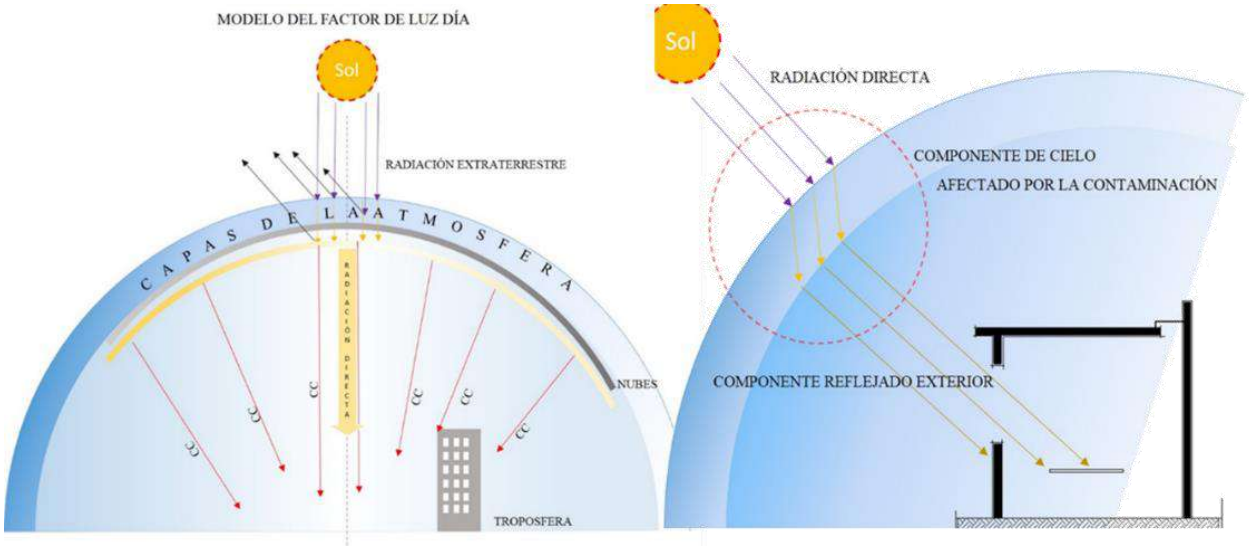
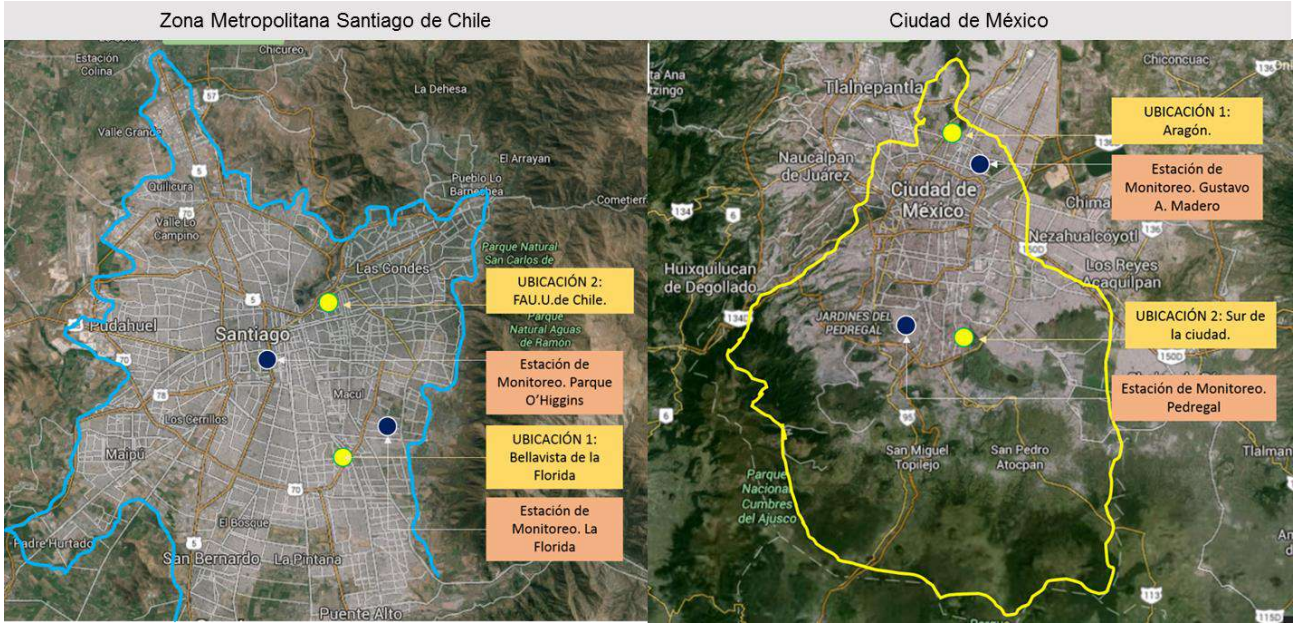


Ilustración 2. Muestra sistema general de variables que integran un modelo de cálculo de iluminación natural para espacios arquitectónicos. Elaboración propia, 2016.

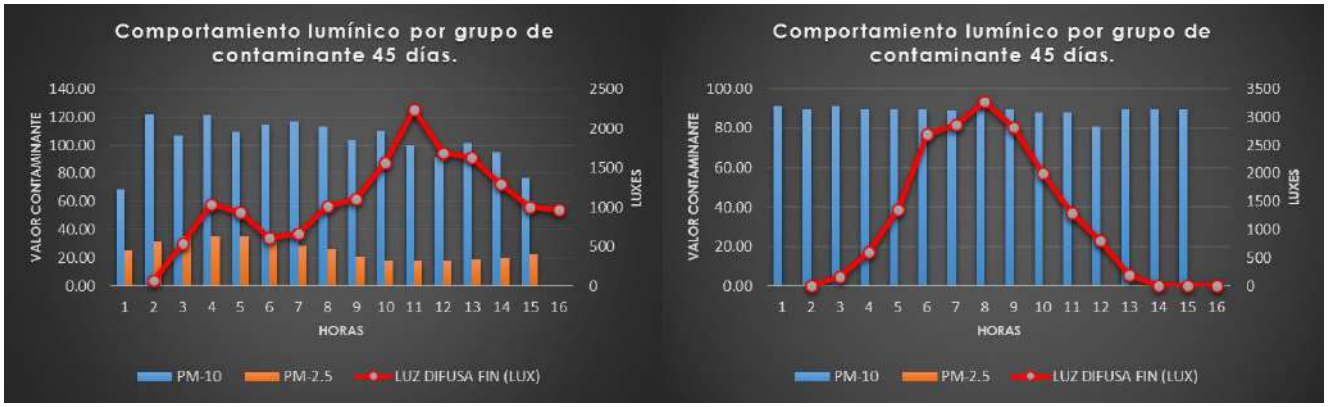
Emplazamientos urbanos, Santiago de Chile y Ciudad de México.

Dentro de las zonas metropolitanas de la ciudad de Santiago y la ciudad de México, se establecieron dos puntos para realizar mediciones de luz natural relacionados con el comportamiento de la calidad del aire, en el siguiente mapa se muestran las dos ubicaciones dentro las dos zonas metropolitanas, así como las estaciones del Ministerio de Medio Ambiente y el SIMAT



Mapa 1. Muestra en el plano de la zona metropolitana de Santiago de Chile la ubicación de los sitios de aplicación de las mediciones y las estaciones de monitoreo atmosférico. Elaboración propia, fuente: Google Earth, 2016.

Se midió durante un periodo de 45 días, los valores lumínicos en espacios confinados orientados al Sur en Santiago de Chile y al Norte en la ciudad de México, con la finalidad de tener únicamente valores de luz difusa sin luz directa. De esta manera, las variaciones entre cada registro será causado por los elementos contaminantes o de nubosidad, para los cuales los días con alta nubosidad o lluvia fueron descartados para no alterar los resultados. De esta forma se analizaron los valores y se graficaron en dos grupos, clasificados por la escala de medición de los contaminantes obteniendo el siguiente gráfico.



Gráfica 1 Muestra comportamiento lumínico en dos situaciones diferentes. Izquierda muestra con comportamiento contaminante sin patron constante. Derecha muestra un sistema contaminante constante. Elaboración propia, 2016.

En las gráficas anteriores, puede observarse que cuando el sistema contaminante es constante, la luz natural responde al sistema gaussiano (gráfica derecha), mientras que cuando los contaminantes no tienen un comportamiento constante, la luz natural tiene variabilidad en los registros de valores como puede verse en la gráfica izquierda, por ejemplo cuando el contaminante PM10 baja su registro en la hora 11 (16:00hrs) el registro lumínico sube a mas de 2000 luxes, lo que se interpreta como la correlación inversa entre contaminante-luz.

Los cuatro sitios de aplicación de las mediciones, denotan un comportamiento lumínico encaminado a un sistema gaussiano, sin embargo en los cuatro sitios el comportamiento se ve alterado a razón del comportamiento contaminante. Por ejemplo, en el primer sitio de aplicación, en Santiago de Chile, ubicado cerca de la periferia, se nota un comportamiento ascendente en las primeras horas del día lo que resulta normal en cualquier sitio, pero es de notar que en las horas en que la cantidad de luz debería disminuir por la posición del sol, muestra picos ascendentes a razón de que la contaminación disminuye en determinadas horas del día.

Con base al comportamiento de la gráfica anterior, se determina que existe una relación directa lineal entre el contaminante y la luz, así que se calculó esta correlación mediante la correlación de Pearson, (ecuación 1) utilizando los valores de la luz natural y cada contaminante.

$$R_{XY} = \frac{\frac{\sum XY}{N} - \overline{XY}}{S_x * S_Y}$$

Ecuación 1. Ecuación general de correlación de Pearson.

TABLA DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN POR CONTAMINANTE

	SO2	CO	NOX	O3	PM10
SANTIAGO. LA FLORIDA	0.872	-0.067	-0.481	-0.546	-0.117
SANTIAGO. FAU	0.796	0.422	-0.305	-0.071	0.465
CDMX. ARAGÓN	0.232	0.759	0.714	-0.074	0.253
CDMX. SUR	0.276	0.801	0.867	-0.082	0.259

Ilustración 3. Izquierda, muestra tabla de correlación de Pearson en las cuatro ubicaciones resumiendo los valores obtenidos en la ecuación 1. Derecha, gráfica que representa el comportamiento de correlación lineal. Elaboración propia, 2016.

Con la correlación de Pearson 1 a 1, se demuestra que para O3, Y PM10, se tiene una fuerte relación inversamente proporcional con la luz, pues a razón del aumento de la contaminación se registra una disminución en la iluminación.

Los coeficientes de correlación determinan matemáticamente la relación entre los valores de luz y el comportamiento de la contaminación atmosférica. En la tabla anterior, se puede notar como cada contaminante interactúa de forma diferente en la iluminación de los espacios.

Se concluye que, cada contaminante altera en mayor o menor medida la cantidad de luz que incide en un espacio arquitectónico. Esto puede notarse mediante los valores positivos y negativos, que significan una correlación directa o inversamente proporcional según cada caso.

Cuando el coeficiente de correlación es cercano a 1, la variabilidad será menor, es decir que no tendrá impacto el contaminante sobre la iluminación. Sin en cambio cuando el valor del coeficiente es menor a 1, la correlación tendrá impacto directo en la iluminación.

Se concluye también que, el ozono y las PM10, son los contaminantes que alteran en mayor medida el comportamiento lumínico en el otoño. Pues en las cuatro ubicaciones, ambos contaminantes mostraron un comportamiento correlativo a la luz natural constante.

Para el caso de la ciudad de México, los contaminantes con mayor efecto en la iluminación, son el SO2 y PM10 derivado de la combustión incompleta de gasolinas y procedentes del petróleo. A diferencia de la ciudad de Santiago que muestra un comportamiento menos constante, y esto se atribuye a que los niveles de contaminación son menores en comparación a los que presenta la ciudad de México, logrando sanearse con mayor efectividad por la marcada existencia de horas pico.

REFERENCIAS

Alrubaih M.S., Zain M., Alghoul M., Ibrahim N., Shameri M., Elayeb O., (2013). Research and development on aspects of daylighting fundamentals. Renewable and susteinable energy reviews 21, 494-505.

Bohren, Q., (2006). Fundamentals of atmospheric radiation, John Wiley and sons.

Crutzen, P., (1995). Ozone in the troposphere, in "Composition, chemistry and climate of atmosphere" H. Singh, Van Nostrand Reinold Publ.

De Grange L., Troncoso R., (2011). Impacts of vehicle restrictions on urban transport flows: The case of Santiago, Chile. Transport Policy 18, 862-869.

Liou, K.N., (2002). An introduction to atmospheric radiation, International geophysics series volumen 84, Renata Dmowska, James.

Mangkuto R., Rohmah M. Asri A., (2016). Design optimisation for Windows size, orientation, and reflectance with regard to various daylighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. Applied Energy 164, 211-219.

Mcdonald K., (2012). Air pollution in the urban atmosphere: sources and consequences. Woodhead Publishing Limited. Concordia University College of Alberta Canada ch. 11.

Molina M., (2000). Proyecto para el diseño de una estrategia integral de gestión de la calidad del aire en el Valle de México; http//eaps.mit.edu/megacities/reports.html.

Raga G.B., Baumgardner D., Castro T., Martínez-Arroyo A., Navarro-Gonzalez R. (2001). Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). Atmospheric Environment 35 4041-4058.

SIMAT, Sistema de Monitoreo Atmosférico (2013). Informe completo 2013 sobre la calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México.

SIMAT, Sistema de Monitoreo Atmosférico (2016). Reporte histórico sobre calidad del aire en la ciudad de México.

SINCA. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (2016). Ministerio de medio Ambiente. Chile.

Schifter I., Díaz L., Mugica V., López-Salinas E., (2005). Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan área of Mexico city. Atmospheric Environment 39, 931-940.

Vega E., Ruíz H., Escalona S., Cervantes A., López-veneroni D., Gonzalez-Avalos E., Sanchez-Reyna G., (2011). Chemical composition of fine particles in Mexico City during 2003-2004. Atmospheric Pollution Research 2, 477-483.

Wu M., S.Ng. T., Skitmore M., (2016). Sustainable building envelope design by considering energy cost and occupant satisfaction. Energy for susteinable development 31, 118-129.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CASA-HABITACION DE INTERES SOCIAL EN TIJUANA

Ixchel Astrid Camacho Ixta y Claudia Lizbeth Fabela Blas
Arquitectura, Universidad Autónoma de Baja California ECITEC, Blvd. Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01 664 676 8222, **ixchel.camacho@uabc.edu.mx**

RESUMEN

Se busca el crear una casa-habitación de interés social que pueda llegar a cumplir con los lineamientos el confort de una familia mediana mexicana y tomando en cuenta los factores que dicta la arquitectura bioclimática, se pueda lograr el ahorro de energía y de mantenimiento bajo, dar una casa habitacion que sea digna y con materiales de ayude a su bajo mantenimiento.

Al propone como parte de una solución arquitectónica es una forma en la que se vehinculen una nueva forma de construccion y la implementacion de nuevos materiales que implique el bajo mantenimiento de laas casas de interes social; tanto por sus dimensiones se busca que pueda ser un lugar confortable donde una familia promedio, las que en muchos casos llegan hasta la monumentalidad, así como porque de la posibilidad del ejercicio de atrevidos procedimientos técnicos en efectos extraordinarios, pero que de todos modos están usados con un sentido utilitario

El explorar la casa de casa-habitación de interés social en Tijuana,esta pueda ser adaptada al clima de la zona donde se propone realizarla y cuales serian los materiales óptimos para que se mantenga su bajo mantenimiento como se viene proponiento y se logre una calidad de vida, una vivienda digna construida con nuevos materiales los cuales propondremos sea propiamente sustentables y parte del los canones del bioclimatismo.

ABSTRACT

It seeks to create a house-room social interest that may get to meet the guidelines comfort of a Mexican middle family and taking into account the factors that dictates bioclimatic architecture can achieve energy saving and low maintenance, room to a house that is worthy and materials help low maintenance.

When proposed as part of an architectural solution it is a way in which a new form of construction and the implementation of new materials involving low maintenance of houses laas vehinculen social interest; both for its size it is intended that to be a comfortable place where an average family, which in many cases reach the monumentality and because of the possibility of exercising daring technical procedures in extraordinary effects, but anyway they are used with a utilitarian sense

Exploring house house-room social interest in Tijuana, this can be adapted to the climate of the area where it is proposed to do it and what would be the optimum materials to remain low maintenance as proponiento comes and quality is achieved life, decent housing built with new materials which is properly propose sustainable and part of the canons of bioclimatic.

Palabras claves: bioclimatismo, interes social, habitabilidad.

Parte de la problemática de la vivienda en Tijuana, es muy distinta a la que presenta en el resto del país, dadas las condiciones creadas por las elevadas tasas de inmigración, dadas las dificultades que se presentan para acceder a una vivienda de interés social, pueden generan una problemática de impacto social.

La transformación que esta viviendo la casa habitación provoca que las construcciones no sea propiamente diseñadas y construidas, lo que se busca es tener un diseño que incorpore las nuevas tecnologías para el ahorro de energía de acuerdo a las NORMS Mexicanas correspondientes y de acuerdo a la Ley de Vivienda vigente.

Se busca que la zona donde se propone realizar el rediseño de estas construcciones proponiendo una nueva distrubución y tomando en cuenta las necesidades de el usuario y al mismo tiempo la casa-habitación de interés social cuente con los m^2 que necesarios para que cumpla con el confort necesario para una familia de 4 integrantes.

Dentro de los desarrollos que se tomaron para este rediseño, se encuentra Valle de Las Palmas, ubicado en el Sector 1, tiene una posición estratégica en el Contexto Metropolitano el cual en el mediano plazo consolidara la zona conurbada Tijuana-Tecate, considerada potencialmente como una reserva territorial para el crecimiento futuro no tan solo para Tijuana sino también para la Zona Metropolitana. (Implan, n.d.)

Figura 1. Localización de la zona

Las viviendas construidas no solo en Tijuana sino en Valle Las Palmas, en su mayoría, suplen su pésimo diseño bioclimático con enormes consumos energéticos de calefacción acondicionamientos de aire, ello sin dejar de mencionar el alto costo para su adaptación y mantenimiento: lo cual, no es compatible ni resulta óptimo para las características físicas existentes en la zona, ello, sin dejar de mencionar, que estos procesos de construcción no obstante a su "contexto moderno", impactan de manera inminente en el confort térmico al interior de las vivienda.

El acercamiento a las posibilidades que les provee el entorno de acuerdo a su desarrollo social, económico y cultural, de manera que este trabajo se retome el concepto de calidad de vida relacionado a un hábitat accesible para la clase trabajadora: la vivienda de interés social en el espacio-tiempo como elemento responsabilidad de organismos gubernamentales, sectores económicos, usuarios y principalmente en los asesores profesionales que se desenvuelven en el ámbito de arquitectura y el quehacer urbano.

La clasificación oficial que se asigna al clima de Tijuana, de acuerdo al Plan de Desarrollo Urbano, es la de un clima predominante árido, templado y seco (también llamado mediterráneo) el cual presenta veranos cálidos y secos, y lluvias en invierno; presenta una temperatura promedio anual de 21°C50 y el verano la media asciende a los 26°C; en verano también se presentan fuertes vientos, conocidos como vientos de Santana que pueden ser calientes y secos, o fríos y secos en invierno, son vientos muy fuertes, y provienen de la Sierra Madre, los cuales bajo condiciones climáticas adversas pueden superar los 140 km/h. Durante el invierno las temperaturas medias mínimas son del orden de los 6ºC y precipitación media anual de 230 mm lo que ubica a la región dentro de la definición de templada. (Implan, n.d.).

Al ser la vivienda un derecho de la familia, como organización social sujeta de obligaciones y derecho donde la vivienda es un parámetro de desarrollo social de la comunidad, de su satisfaccion depende la alimentación, la salud y la educación; mediados de los años 60's se inicio con programas de vivienda de interés social en Tijuana donde la problemática de crecimiento espontáneo, desordenado y concentrando esfuerzos en la ampliación de infraestructura con obras de agua y drenaje, donde la migración en ambos casos es atraída en especial por el empleo en el sector manufacturero desde la mitad de la década de los ochentas (Sánchez, Ortega y Montoya, 1992).

Donde la modificación de las dimensiones, la población esta accediendo a viviendas las cuales estan construidas en escasamente 2.7 m. de ancho por 4.20 m. de largo y estas estan divididas en recamaras, cocina, baño y sala-comer; vemos el espacio tan pequeño en lo que tiene que cohabitar puede llegar a generar una problemática social.

En estas viviendas prácticamente no cabe nada, se pierde la privacidad, al ser espacios demasiado pequeños donde se pueden escuchar las voces, los estornudos y ronquidos, los cuales son escuchados por los vecinos de al lado, con quienes se comparte estacionamiento, patio y hasta paredes.

En el año 2000 el gobierno federal optó por disminuir los metros cuadrados de construcción establecidos como mínimo, del cual paso de ser el espacio habitable de 60 m^2, este se redujo a 32 m^2.

Los espacios exageradamente pequeños provoca una aglomeración habitacional, esta nos lleva a una cual problemática de tipo social: "Un amplio porcentaje de la delincuencia juvenil y de la violencia intrafamiliar tiene su origen en el hacinamiento en que se habita" Fuentes (2011).

Al utilizar materiales propios de la región y ver su relación con lo que se utilizan actualmente en esta zona, con esto se verá cuál de todos es menos susceptible a la radiación y el tiempo de exposición solar, con esto se determinara el tiempo de confort y el material idóneo para esta región de Tijuana (Valle de las Palmas) que nos ayude a suministrar de manera óptima la energía solar dentro de nuestro vivienda. (Tabla 1). (Ixta, 2015)

Materiales locales de la Región	Materiales Actuales de la Región
Muros	**Muros**
Adobe	Concreto Vaciado
Block Común	Tablaroca
Ladrillo	Block Común
Recubrimiento	**Recubrimiento**
Adobe	Yeso
Yeso	Cemento
Cemento	Redemix
Cubiertas	**Cubiertas**
Concreto	Concreto
Adobe	

Tabla 1. Materiales de estudio

Los materiales mencionados en la tabla, se puede iniciar el diseño arquitectónico de una casa-habitación de interés social, así poder crear una edificación que pueda brindar confort para una familia de 4 integrantes, el comportamiento térmico de un edificio se estudia normalmente en términos del clima, las propiedades termo-físicas de los materiales que se pretenden utilizar, la relación y el estado entre sus componentes estructurales y la distribución arquitectónica de los espacios, que debe de conformar el diseño arquitectónico.

Como primera línea de estudio del el bioclimatismo, el cual abarca conceptos climatológicos como: temperatura, humedad, radiación solar, ventilación, medio ambiente, gráficas solares, transferencia de calor en las envolventes, software de programas para la simulación de la transferencia del calor, etc.

La importancia por el comportamiento térmico inadecuado de la casa de habitación de interés social, el cual implica un impacto continuo sobre sus ocupantes y un factor que puede, además, reducir su vida útil, se te utilizan los materiales actuales de la región.

Al buscar concientizar a las usuarios que se puede pueden utilizar los materiales actuales que nos brinda la región; la casa-habitación de interés social puede llegar a tener un ahorro de energía, se tiene como dato que el 30% del consumo de energía eléctrica de nuestro país corresponde a los sectores residencial, comercia y de servicios.

En México y en el mundo, arquitectos y constructores están volviendo a diseñar y construir casas y edificios tomando en cuenta el clima de la región. A este tipo de arquitectura se le conoce como: arquitectura bioclimática, no se han encontrado estudios donde se pueda observar como el comportamiento térmico de las viviendas de interés social del INFONAVIT y los efectos que sus habitantes puedan causar en cuanto al desempeño térmico de la edificación respecto a sus características físicas y sus reacciones, algunos que tratan el tema de este tipo de viviendas, lo estudian buscando aspectos de sustentabilidad térmica, tal fue el caso, de Silvia de Schiller que presentó las mediciones del comportamiento térmico de las viviendas normalmente desocupadas y cuando se consideran ocupadas, invariablemente se inserta a continuación al usuario y se evalúa cómo le afecta o cómo percibe el desempeño térmico de la vivienda.

BIBLOGRAFíA.

Alberich, M. L. (2003). *Estrategia Bioclimaticas en la Arquitectura.* Universitat Politecnica de Catalunya. Obtenido de https://climacusticaparaarquitectos.files.wordpress.com/2011/09/bioclimatica.pdf

implantijuana.org. (19 de septiembre de 2014). Recuperado el 08 de junio de 2016, de implantijuana.org: http://www.implantijuana.org

Mtro.Arq. SANCHEZ Corral Javier (2008), *La vivienda "social" en México: pasado-presente-futuro?,* México, DF. Ediciones JSa.

Ixta, I. A. (07 de octubre de 2015). distribucion de la energia solar en un modulo experimental. *distribucion de la energia solar en un modulo experimental*. Campeche, Campeche, mexico: ANES.

Lopez, D. C. (octubre de 2010). Principios de Arquitectura sustentable y la vivienda de interés social. Mexicali, Baja California, Mexico.

Mercado, I. (22 de Diciembre de 2011). *Viviendas indignas*. From Zeta: http://www.zetatijuana.com/2011/12/22/viviendas-indignas

fragmento tomado del articulo Viviendas Indignas publicado el 22 de Diciembre del 2011 del semanario Zeta Tijuana; donde hablo el sociólogo urbanista y director de la sede de COLEF en Ciudad Juárez, César Mario Fuentes

SANCHEZ Soler Ma. Dolores, ORTEGA Villa Guadalupe, MONTOYA Sánchez Edna E.
Componentes de cambio y economía regional: El sector Manufacturero en el estado de Baja California y en el Municipio de Mexicali (1985-1988), estudios fronterizos, revista del Instituto de investigaciones sociales, No. 27-28 Enero-abril/mayo-agosto del 1992.

Peña, J. R. (junio de 2007). *Analisis del efecto de la actividad de los ususarios en el desempeño termico de dos casas de interes social en tecoman, colima.* Coquimatlán: Universidad Autónoma de Aguascalientes .

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

IMPACTO DE LOS ESPACIOS EXTERIORES EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS EDIFICACIONES EN CLIMAS CÁLIDO-SECO

María-Guadalupe Alpuche[a], M. Paloma Giottonini[b], José Manuel Ochoa[a], Irene Marincic[a], Ana C. Borbón[c]

[a]Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Av. Rosales y Av. Colosio, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México. Tel. Fax. (662)2592180, mgalpuche@arq.uson.mx

[b]Departamento de Planificación Urbana, Luskin School of Public Affairs, Universidad de California Los Angeles, 3250 Public Affairs Building, Box 951656. Los Angeles, California 90095-1656, USA
Tel. +1 (310) 825-4025, Fax +1 (310) 206-5566, mpgiotto@ucla.edu

[c]Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Av. Rosales y Av. Colosio, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México. Tel. Fax. (662)2592180, acborbon@dicym.uson.mx

RESUMEN

El estudio de los diferentes efectos que los materiales constructivos tienen en el comportamiento térmico de los edificios, y por consecuencia en el consumo de energía de los mismos, es un área de investigación que ha ganado interés en los últimos años, fomentado parcialmente por la búsqueda de respuestas a los retos que presenta el cambio climático. Arquitectos y diseñadores urbanos han tratado de enfrentar estos retos desde las perspectivas del desarrollo sustentable para las ciudades, y de la eficiencia energética para los edificios, con el fin último de optimizar el uso de los recursos y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al mismo tiempo que se intentan mitigar los efectos negativos de las islas urbanas de calor. En consecuencia, los estudios que utilizan herramientas de simulación dinámica para optimizar el consumo de energía de los edificios son abundantes en la literatura, así como lo son los estudios que analizan los efectos de los materiales utilizados en espacios exteriores sobre la ganancia térmica de las ciudades. Sin embargo, son escasos los estudios que incorporen los efectos de los materiales exteriores en la evaluación del comportamiento térmico de las edificaciones, y estos estudios son mucho más escasos para las regiones con climas extremos. Este estudio evalúa si los materiales usados en espacios exteriores repercuten en el comportamiento térmico de una vivienda de nivel medio en Hermosillo, Sonora, una ciudad de clima cálido-seco extremoso en el Noroeste de México. Utilizamos simulaciones dinámicas con el programa Energy Plus. Al simular los efectos de tres diferentes materiales exteriores de uso común en la región, encontramos diferentes ganancias térmicas al interior de la vivienda y, en consecuencia, diferentes consumos de energía por el uso de sistemas de acondicionamiento de aire.
Palabras claves: Espacios exteriores, Simulación térmica, Ganancias de calor, Clima cálido-seco, Eficiencia energética.

ABSTRACT

Research on the different effects that construction materials have in the thermal performance of buildings, and consequently in their energy consumption, is an area of research that has gained interest in recent years, partly fueled by the quest for solutions to the challenges posed by climate change. Architects and urban designers have tried to address these challenges from the perspective of sustainable development for urban areas, and energy efficiency for buildings, with the ultimate goal of optimizing the use of resources and reduce greenhouse gas emissions, while at the same time, trying to mitigate the negative effects of urban heat islands. Consequently, there are abundant studies using dynamic simulation tools to optimize energy consumption of buildings, and also many studies examining the effects of outdoor materials on the thermal gains in urban areas. However, few studies incorporate the effects of outdoor materials in the evaluation of the thermal performance of buildings, and these studies are much scarcer for regions with extreme climates. This study evaluates whether outdoor materials have an effect on the thermal performance of an individual dwelling in Hermosillo, Sonora; a city with an extreme hot-arid climate in Northwestern Mexico. We perform dynamic simulations with the software Energy Plus. After simulating the effects of three different exterior materials commonly used in the region, we find different thermal gains inside the dwelling, and therefore different energy consumption by the use of air conditioning systems.

Keywords: Outdoor areas, dynamic simulation, thermal gain, hot-arid climate, energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los diferentes efectos que los materiales constructivos tienen en el comportamiento térmico de los edificios, y por consecuencia en el consumo de energía de los mismos, es un área de investigación que ha ganado interés en los últimos años, fomentado parcialmente por la búsqueda de respuestas a los retos que presenta el cambio climático. Arquitectos y diseñadores urbanos han tratado de enfrentar estos retos desde las perspectivas del desarrollo sustentable para las ciudades, y de la eficiencia energética para los edificios, con

el fin último de optimizar el uso de los recursos y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al mismo tiempo que se intentan mitigar los efectos negativos de las islas urbanas de calor. En consecuencia, los estudios enfocados en cómo reducir u optimizar el consumo de energía de los edificios son abundantes en la literatura de las últimas dos décadas, así como el desarrollo de herramientas que permitan simular el comportamiento térmico de los edificios dependiendo de los materiales de construcción, orientación, ubicación y cantidad de vanos, calidad de los acabados y características de las regiones climáticas donde se encuentren. A nivel urbano, ha aumentado el interés por entender las causas y efectos del fenómeno conocido como islas urbanas de calor, causado por la aglomeración y densidad de las zonas urbanas. Una parte de estos estudios se enfoca en el análisis de los efectos de los materiales utilizados en espacios exteriores sobre la ganancia térmica de las ciudades.

Sin embargo, son escasos los estudios que incorporen los efectos de los materiales exteriores en la evaluación del comportamiento térmico de las edificaciones, y estos estudios son mucho más escasos para las regiones con climas extremos. Según Ochoa y Marincic (2005), parte de esta falta de interés por el análisis de los efectos de los espacios que rodean a los edificios es debido a que dichos espacios no son diseñados para ser enfriados o calentados artificialmente, y al no ser parte de la demanda energética de un edificio, han sido simplemente dejados a un lado en los procesos de diseño. Además, en comparación con las edificaciones, hay muy pocas regulaciones y estándares que regulen el diseño de los espacios exteriores (Ochoa & Marincic, 2005).

ESTUDIO DE CASO

Para este análisis, se utilizó una vivienda típica de nivel medio ubicada en Hermosillo, Sonora, en el Noroeste de México. La ciudad de Hermosillo se localiza entre los 28º 30'oy 29º 30' de latitud Norte, y entre los 111º y 112º de longitud Oeste. Su clima es caracterizado como cálido-seco extremoso ó BWh según la clasificación de Köppen adaptada por Enriqueta García. La época más cálida es en los meses de Junio, Julio y Agosto con temperatura máxima promedio de 39ºC y mínima promedio de 25ºC y humedad relativa promedio de 40%. La época más fría corresponde a los meses de Diciembre, Enero y Febrero con temperatura máxima promedio de 24ºC y mínima promedio de 9ºC y humedad relativa promedio de 50%. Como otras ciudades desérticas, Hermosillo se caracteriza también por la gran disponibilidad de radiación solar. La ciudad alcanza niveles de radiación global (directa + difusa) de entre los 475 y 980 W/m2, situándola entre las localidades con más alta incidencia solar a nivel mundial.

En la última década la construcción masiva de viviendas en la ciudad de Hermosillo ha sido intensa, propiciando el crecimiento acelerado de la ciudad. Sin embargo, los diversos fraccionamientos habitacionales aunque cuentan con los servicios de pavimentación, agua, drenaje y energía eléctrica necesarios, carecen de áreas verdes suficientes o zonas de esparcimiento lo que ha provocado ciertos cambios en el microclima de las zonas intraurbanas (ver figura 1). Por otro lado, las viviendas son diseñadas sin consideración del clima local, respondiendo únicamente a un programa arquitectónico que permite realizar las funciones de estar, cocinar, dormir y servicios; a través de un espacio común para la sala-comedor y cocina, un espacio para la recámara y un baño.

Figura 1. Vista de un fraccionamiento de vivienda económica en la Cd. de Hermosillo, Sonora (Google Maps)

El estudio de caso seleccionado es una vivienda económica representativa de éste tipo de fraccionamientos, con una superficie de 35 m^2. En su programa arquitectónico contempla sala-comedor, cocina, dos recámaras y un baño, como se muestra en la figura 2.

Metodología de Simulación

Para la evaluación de los efectos que tienen los materiales con los que se construyen los espacios exteriores que rodean las viviendas sobre el comportamiento térmico de la misma, se realizaron simulaciones dinámicas en el programa Design Builder que realiza los cálculos con base en Energy Plus. Para cada material se ejecutó una simulación donde se obtuvieron datos de ganancias de calor, al interior de la vivienda, a través de los muros exteriores; ganancias solares a través de las ventanas y consumos de energía eléctrica por el uso de aire acondicionado en la temporada de verano. El archivo meteorológico empleado fue obtenido a través del programa Meteonorm, para la localidad de Hermosillo.

La edificación se supuso desocupada, para los tres casos evaluados, los sistemas constructivos de muros, techos y vanos son iguales, para efecto de la simulación se consideran los muros de ladrillo común con aplanado de mortero de cemento-arena en exterior y yeso en interior y las losas de concreto armado con impermeabilizante elastomérico al exterior y aplanado de yeso al interior. sólo cambian los materiales de construcción en el espacio exterior que rodea la edificación. El sistema de acondicionamiento de aire, es un sistema Split con un Coeficiente de operación (CoP) de 1.83 y se encuentra operando en los meses de mayo a octubre.

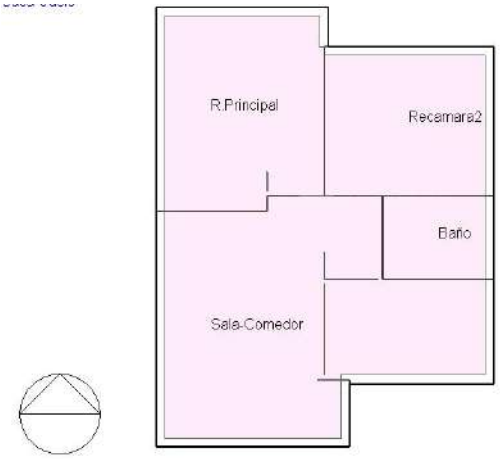


Figura 2. Distribución espacial del estudio de caso

Selección de Materiales

Se seleccionaron tres materiales empleados regularmente en el diseño de espacios exteriores de la región: Concreto, adoquín y vegetación. La Tabla 1 presenta las propiedades térmicas y superficiales con las que se realizaron las simulaciones. El programa de simulación en base a la propiedad superficial (absortancia) calcula las reflexiones de la radiación solar y la afectación sobre la edificación.

Tabla 1. Características de los Materiales analizados.

	Conductividad (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Densidad (kg/m3)	Absortancia
1 Concreto	0.960	840	2000	0.50
2 Adoquín	0.770	896	2800	0.60
3 Vegetación	0.300	1000	1000	0.75

Fuente: Design Builder

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Se presentan los resultados obtenidos para los tres casos de materiales empleados en el diseño de los espacios exteriores alrededor de la edificación, los valores se muestran en promedios mensuales para un año completo. La figura 3 muestra que existe una diferencia entre las ganancias de calor hacia el interior de la edificación por el empleo de los tres diferentes materiales en los espacios exteriores. Sin embargo, estas diferencias no son mayores de un 4% entre los valores mínimos y máximos, tanto en los meses de verano como en los meses de invierno. Es importante hacer notar que al usar vegetación en los espacios exteriores, se tiene un mejor comportamiento tanto en invierno que se tienen menos pérdidas como en verano que se tienen menos ganancias de calor.

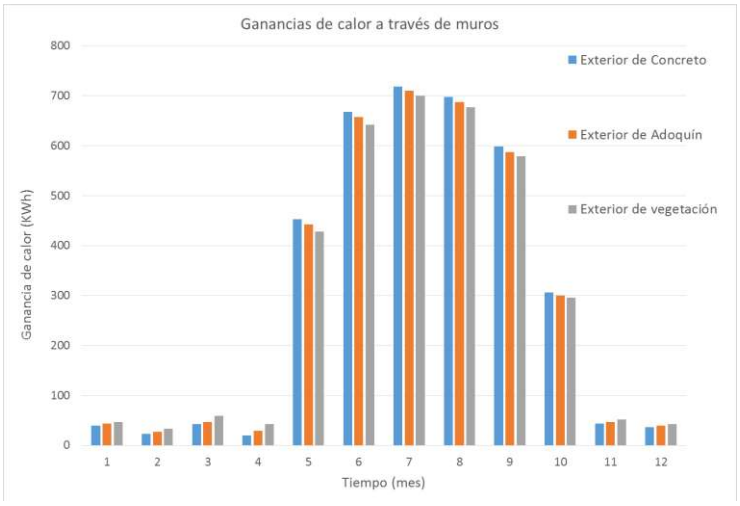


Figura 3. Ganancias de calor promedio mensuales a través de los muros exteriores.

En la figura 4, se puede observar que también existe una diferencia en las ganancias debidas a la radiación solar a través de las ventanas. En éste caso, la diferencia entre los efectos de los materiales es mucho más significativa, pues se incrementa desde un 4.6% durante los meses de invierno hasta un 18% durante los meses de verano.

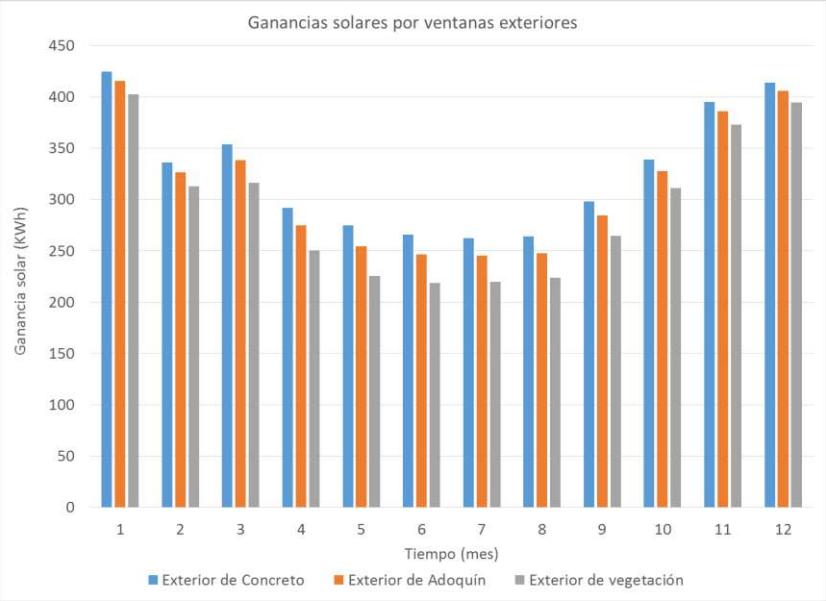


Figura 4. Ganancias por radiación solar promedio mensual a través de las ventanas

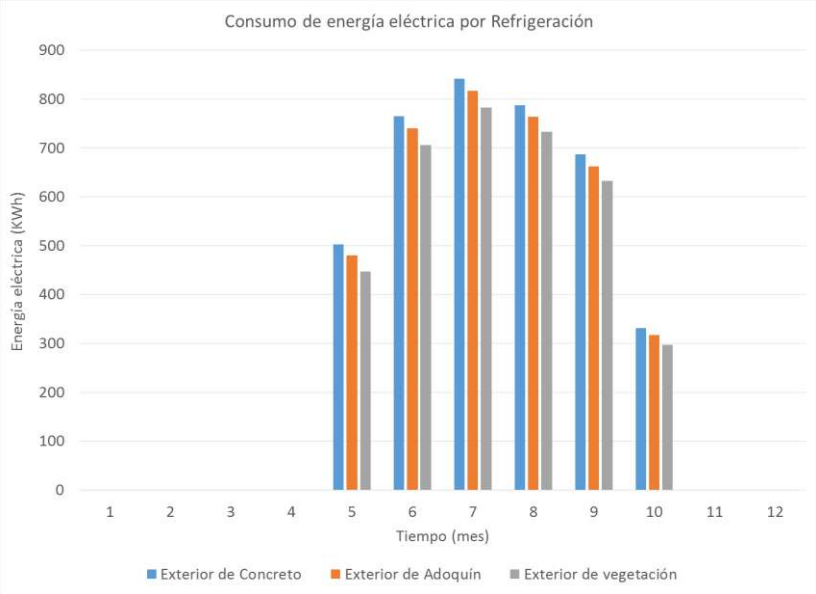


Figura 5. Consumo de energía eléctrica promedio mensual por el uso de Aire Acondicionado.

La figura 5, nos muestra el consumo de energía eléctrica por el sistema de aire acondicionado empleado en la simulación, durante los meses de mayo a octubre, un periodo en el cual es necesario su uso para obtener las condiciones de confort al interior de las edificaciones. Podemos observar de igual manera que existen diferencias, aunque aparentemente pequeñas, entre los casos evaluados. Una vez más, el concreto es el material que causaría el mayor consumo de electricidad por refrigeración en una vivienda, con diferencias de hasta 4.6% en comparación con el adoquín, y hasta 11% en comparación con el uso de vegetación en exteriores.

La Figura 6 muestra los consumos de energía eléctrica totales durante el período de mayo a octubre, cuando se utiliza el aire acondicionado. La simulación muestra que existe una diferencia de hasta 8% dependiendo del material seleccionado para los exteriores.

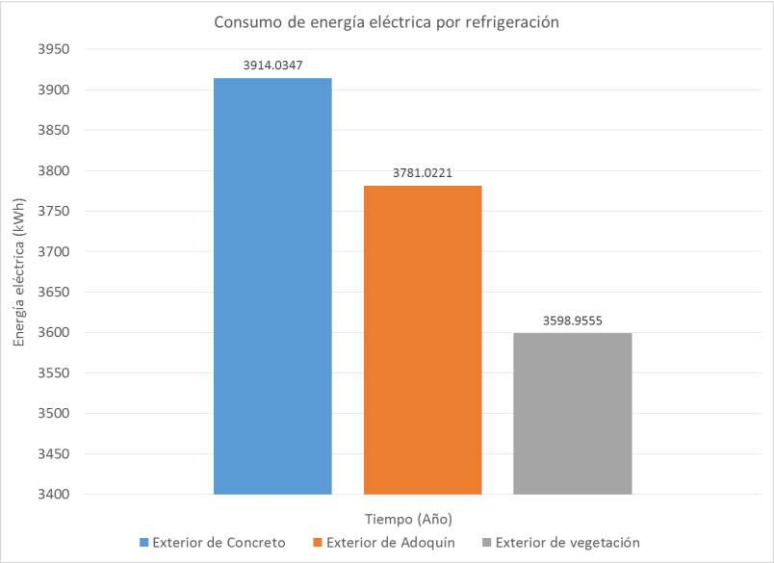


Figura 6. Consumo total de energía eléctrica por el uso de Aire Acondicionado en la temporada de verano.

CONCLUSIONES

El análisis de estos tres materiales nos ha permitido evaluar cuantitativamente los efectos que cada material tiene en el comportamiento térmico al interior de una vivienda. A través de las simulaciones hemos demostrado que existe una influencia directa de los materiales empleados en el diseño de los espacios exteriores sobre el comportamiento térmico al interior de las edificaciones. Este comportamiento está directamente relacionado con el albedo ya que es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

Esta es una condición de particular importancia en ciudades que, como Hermosillo, se ubican en regiones de clima cálido-seco extremoso, y que tienen una alta radiación solar durante la mayor parte del año. Asimismo, los resultados de las simulaciones corroboran que la absortancia y la emitancia solar son propiedades importantes en el comportamiento térmico de los espacios exteriores al que diseñadores urbanos y arquitectos deberán poner más atención debido a la capacidad que tienen estos materiales para modificar los microclimas urbanos. Asimismo, con esta información podemos proyectar los consumos energéticos y calcular los costos adicionales o los ahorros posibles dependiendo del material seleccionado para las áreas exteriores de las viviendas. Es importante aclarar que los materiales exteriores no son los únicos que tienen un efecto en el comportamiento térmico y energético de la vivienda, y además que según los resultados de nuestra simulación, el efecto es relativamente pequeño en comparación con otros factores como la orientación, los materiales de construcción y la calidad del aislamiento térmico de las viviendas. Sin embargo, este es el primer estudio que incorpora los efectos de los materiales de las áreas exteriores, y puede ser considerado un primer paso hacia un análisis más integral del comportamiento térmico de las edificaciones. La correcta selección de materiales en la construcción de las viviendas puede potencialmente reducir las cargas energéticas de los sistemas mecánicos de aire acondicionado, y puede también reducir los ciclos de uso de los mismos.

Aunque este estudio sólo analiza tres materiales de uso común en una región específica, la valoración cuantitativa de estos efectos es información valiosa para todos aquellos organismos e individuos encargados de tomar decisiones en diferentes ámbitos. Estos datos son herramientas de utilidad tanto para los profesionales de la construcción (arquitectos, diseñadores y constructores), así como para los organismos encargados de tomar decisiones, sobre todo aquellos relacionados con la creación de reglamentos urbanos y de construcción enfocados a la promoción de entornos más sustentables. Finalmente, y no de menor importancia, esta información es también útil para el ciudadano común que busca alternativas para mejorar las condiciones térmicas de su vivienda, para mejorar sus condiciones de confort al interior, así como reducir sus consumos de electricidad durante los meses del verano.

REFERENCIAS

Ochoa, J. M., & Marincic, I. (2005). Thermal comfort in urban spaces: the case of very warm and dry climate. In Passive and Low Energy Cooling for the Built Enviroment Conference, Santorini, Greece (pp. 785-789).

Marincic, I.; Ochoa, J.M.; Alpuche, M.G.; Tovar, I.; & Luna, A. (2015). Análisis energético y de confort térmico por el uso de sistemas constructivos en Hermosillo, Sonora. In XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, Campeche, México (pp. 12-17).

DesignBuilder (2010). DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation: for DesignBuilder v2.3. Bajado de la red el 20/12/2010: http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/

Remund J., Lang R.,Kunz S.(2013). METEONORM, Global meteorological database for solar energy and applied climatology. Meteotest, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SIMULACIÓN DE CARGAS DE REFRIGERACIÓN Y CALEFACCIÓN DE MATERIALES LIGEROS (STEEL–FRAME) EN EDIFICIOS RESIDENCIALES

Emilio Hernández Martínez[1], Benjamín González Vizcarra[2], Gabriel Cisneros Cueva[3], Miguel A. Hernández Mendoza[4]
Programa Educativo de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01-(664)-676-8222, **emilio.hernandez.martinez@uabc.edu.mx, bgonzalez79@uabc.edu.mx, cisneros.gabriel@uabc.edu.mx, hernandezm24@uabc.edu.mx.**

María del C. Prieto Avalos[5]
Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44 Mexicali, Baja California, 21280, México. 01-(686)-566-4270, **a168960@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

El siguiente artículo se presenta los resultados de un estudio de los consumos de energía por climatización de un edificio residencial. El objetivo principal de la investigación es evaluar los materiales ligeros (Steel-Frame) de construcción de edificios residenciales así como el análisis de indicadores que representen si se genera una deducción de las cargas de refrigeración y cargas de calefacción al ser utilizados. La investigación se desarrolló en Baja California el cual se encuentra en la zona norte de México, en donde el clima predominante es cálido-seco. En la metodología de simulación se definieron tres escenarios con distintitos sistemas constructivos; la simulación fue desarrollada en el software CYPECAD MEP y EnergyPlus. A partir los resultados finales se concluye que la aplicación de materiales ligeros en la construcción de edificios residenciales en la zona norte de México de clima cálido-seco producirá una mejora considerable en la reducción de las cargas de climatización de hasta un 60%, debido a sus propiedades térmicas, lo que repercute en un alto porcentaje en la economía familiar, el desarrollo económico, el cuidado del medio ambiente y la salud pública de la región al dejar de emitir gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

The following article presents the results of a study of energy consumption for HVAC a residential building. The main objective of the research is to evaluate the lightweight materials (Stell-Frame) for residential buildings construction, getting indicators that describe if it generates a diminution of cooling loads and heating loads when used. The research develops in Baja California, which is located in the north zone of Mexico, where warm-dry weather predominates. In the evaluation methodology were defined four scenarios with different building systems; the simulation was develop in the CYPECAD MEP and EnergyPlus. From results, it concluded that the application of lightweight materials in the construction of residential buildings in the north of Mexico with warm-dry weather would produce a significant improvement in the reduction of the HVAC loads up to a 60%, due to thermal properties, which results in a high percentage of the family budget, the economic development, the environmental care and the public health of the region due a emission reduction of greenhouse gases.

Palabras claves: Simulación, materiales ligeros Steel-Frame, sistemas constructivos, CYPECAD MEP, EnergyPlus, cargas de refrigeración y cargas calefacción.

INTRODUCCIÓN

La crisis energética es uno de los principales problemas actuales del mundo. En México, la crisis energética crea un impacto significativo en el desarrollo económico. Por lo tanto, el Gobierno tiene que establecer el ahorro de energía como una de las principales prioridades. Además, el ahorro de energía debe estar en línea con el uso eficiente de la energía para tener una influencia positiva para el medio ambiente, como la reducción de emisiones de los gases de efecto de invernadero. El uso eficiente de la energía significa reducir el consumo de combustible fósil utilizado en las centrales eléctricas convencionales para evitar el calentamiento global (Andarinia, 2014).

En los últimos años, ha habido un incremento en cuanto a la utilización de nuevos materiales de construcción y su tiempo de vida, así como su composición, en donde se pueden utilizar, y como pueden afectar estos de una manera positiva o negativa al consumo energético de edificios comerciales y residenciales (De Angelisa, 2014). El sistema del Steel-Frame, como se le conoce a nivel mundial, es un sistema constructivo de concepción racional, cuya principal característica es una estructura constituida por perfiles formados en frío de acero galvanizado que son utilizados para la composición de paneles estructurales y no estructurales, vigas secundarias, vigas de piso, cabios del techo y otros componentes. Por ser un sistema industrializado, posibilita una construcción en seco de gran rapidez de ejecución. Gracias a estas características, el sistema Steel-Frame también es conocido como Sistema Autoportante de Construcción en Seco (Sarmanho & Moraes, 2006). Esto nace por la creciente preocupación hacia el impacto que tiene la gran demanda energética con respecto al uso de los combustibles fósiles debido a su carácter finito y los efectos adversos que ocasionan en el medio ambiente.

En el año 2010, México contaba con una población de 112,336,538 millones de habitantes y 28,607,568 millones de viviendas, de los cuales 936,826 habitantes y 265,730 viviendas corresponden al municipio de Mexicali, Baja California (INEGI & Solís, 2010). Una

ciudad ubicada en el norte de México, predominante en esta zona del país un clima cálido-seco, el cual puede llegar incluso a ser extremoso, por lo que el nivel de adaptación de las viviendas afecta sensiblemente la necesidad de refrigeración y calefacción para mitigar el efecto del clima y obtener un determinado grado de confort en sus viviendas, correspondiente a cada necesidad particular (Pérez, 2007).

En las ciudades con clima cálido-seco como Mexicali, el consumo per cápita es de 5,924 MWh/año, 3.5 veces más que el promedio nacional (Romero, 2013). Las altas temperaturas durante el periodo de verano (Mayo – Octubre) por encima 45ºC y las bajas temperaturas durante el periodo de invierno (Noviembre – Abril) por debajo de los 8ºC generan condiciones térmicas un tanto extremas en las viviendas de la ciudad. Por lo tanto, el uso de equipos de aire acondicionado en construcciones no adecuadas térmicamente ocasiona un alto consumo de energía eléctrica, que a su vez se traduce en una mayor facturación anual.

Es muy común encontrar en los países latinoamericanos serias deficiencias en el cumplimiento de los reglamentos de construcción con respecto al acondicionamiento térmico, o simplemente la negligencia ante dichos reglamentos con la finalidad de lograr menores costos de construcción. Las edificaciones comerciales se encuentran sujetos a normas y reglamentos más rigurosos que toman en cuenta ciertas características térmicas, sin embargo, las edificaciones residenciales como son las viviendas unifamiliares no tienen la misma rigurosidad, en el caso de México, su reglamentación depende de los gobiernos municipales o estatales (Pérez, 2007).

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el material ligero constructivo Steel-Frame en edificios residenciales, para generar una disminución significativa en el consumo energético en el periodo de verano e invierno en regiones de climas cálidos. Lo que hace necesario echar mano de la simulación para modelar el comportamiento térmico–energético de edificaciones, esta metodología es ampliamente aceptada en la evaluación del consumo de energía durante el proceso de diseño de los edificios nuevos y los que se encuentran en renovación (Ioannou & Itard, 2015). El software utilizado es CypeCad Mep versión After Hours para el diseño y dimensionamiento de la envolvente, la distribución, y las instalaciones del edificio sobre un modelo 3D integrado con los distintos elementos del edificio, esta versión es totalmente funcional como la versión profesional que oferta Cype Ingenieros.

ANTECEDENTES

El sector residencial fue el tercer consumidor de energía a nivel mundial, con una participación de 23.1 % en año 2012 (IEA, 2011, 2014), mientras que a nivel nacional, con un consumo de 18.4 % de la energía final total en 2013 (SENER, 2014). En México, la mayor demanda de energía para uso final en 2009 fue el calentamiento de agua, con 47.0% del consumo total energético. Le siguieron la cocción de alimentos y la refrigeración con participaciones de 27.5% y 9.9% de la energía total utilizada, respectivamente (SENER, 2014). Siendo esto una área de oportunidad para disminuir el consumo de energía eléctrica por climatización en el sector residencial en zonas de climas cálidos. En la ciudad de Mexicali se han realizado diversos estudios y proyectos de investigación que caracterizan la tipología de vivienda, la eficiencia energética de unidades de climatización, el consumo energético del sector residencial y el efecto de elementos de ahorro de energía en los sistemas constructivos entre los que se destacan:

- Influences of the relative humidity in the monthly invoicing in constructions of warm climates using the hour-degree methodology (Hernández et al, 2014).
- Diseño y desarrollo tecnológico de prototipos de vivienda de alta eficiencia energética para el mercado medio residencia (Ingeniería Dennis S. A. de C. V.-UABC, 2011-2012).
- Simulador térmico para el diseño de construcciones ahorradoras de energía en climas cálidos (Hernández et al, 2011).
- Análisis del comportamiento térmico de cuatro diseños tipo vivienda de interés social (Grupo Melo-UABC, 2005).
- Resistencia térmica efectiva en envolventes residenciales y su impacto energético por climatización en regiones de clima cálido. Efecto de puentes térmicos (Pérez et al, 2004).
- Uso eficiente de la energía en el sector residencial de regiones de clima cálido (Pérez et al, 2004).
- Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica (Pérez et al, 2004).

Es conocido que en las regiones de clima cálido la climatización de edificios residenciales representa la mayor parte del consumo y la demanda eléctrica en la época de verano e invierno, debido a que la temperatura cambia continuamente durante el transcurso del día y la noche, es necesario medir las horas de confort totales en un día para así, poder reducir las cargas de refrigeración y calefacción de un edificio residencial. Aunado a esto, es una práctica común el sobredimensionamiento de los equipos de climatización en un porcentaje considerable de la totalidad de las instalaciones residenciales y no residenciales originando una sobrecarga del sistema eléctrico de Comisión Federal de Electricidad (CFE) en las horas punta y obliga a una mayor capacidad instalada en la región para satisfacer dicha demanda (Pérez, 2007).

METODOLOGÍA

Los programas de infraestructuras de CYPE contienen normas en las que se basa para calcular y dimensionar infraestructuras de edificaciones (suministro de agua, evacuación de agua, climatización, captación solar para producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS), protección frente a la acción del rayo, iluminación, gas, electricidad y telecomunicaciones y para comprobar aislamiento térmico y acústico, su certificación energética y su seguridad en caso de incendio). La normatividad tomada en cuenta en los programas de CYPE incluye normas vigentes y, además, normas suprimidas que se siguen utilizando, bien para comprobar y revisar estructuras que se dimensionaron dependiendo de las necesidades de los países a los cuales se les está aplicando.

El software CYPECAD MEP de CYPE Ingenieros contiene en un solo programa todas las instalaciones de una construcción de diversos tipos (viviendas, oficinas, hospitales, centros docentes, comerciales, residuales, etc.) Está formado por múltiples pestañas y módulos,

según los distintos tipos de instalaciones que puedan proyectarse. En la pestaña de Climatización de CYPECAD MEP es posible crear y desarrollar en un único programa una instalación de climatización completa (sistemas aire-agua y aire-aire) y de calefacción (eléctrica y por agua con radiadores, suelo radiante y calderas), incluido el presupuesto de la instalación.

EnergyPlus es un software de simulación térmica y energética de edificios, este programa es desarrollada por el Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO) y manejada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL). El software de CYPECAD MEP dispone del módulo de Exportación a EnergyPlus, con el que es posible exportar la construcción introducido en EnergyPlus, desde las pestañas de Estudio Térmico y Climatización. La exportación a EnergyPlus es un complemento que ayuda al estudio térmico y energético de una construcción.

DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio residencial estará ubicado en la zona dorada de Mexicali, Baja California, de acuerdo al sistema de información geográfica Google Earth se ubica en la región noroeste de México localizándose en las coordenadas 32°39'06.22"; de Latitud Norte y 115°23'25.92; de Longitud Oeste.

El edificio residencial que se muestra en la Figura 1 como objeto de estudio con ubicación en la zona dorada de la ciudad de Mexicali, Baja California. El terreno cuenta con una superficie de 400 m^2, de los cuales 300 m^2 corresponden al área de construcción del edificio residencial cuya fachada principal se encuentra orientada al Norte geográfico.

La edificación residencial cuenta con dos plantas, la planta baja posee una cocina, un salón/comedor, un baño, un pasillo (recibidor), cuarto de juego, cuarto de estudio y cuarto de lavado no climatizado, mientras que la primera planta consta de una recamara principal, dos recamaras secundarias, cuarto de televisión, pasillo y dos baños, como se puede apreciar en la Figura 2 y Figura 3.

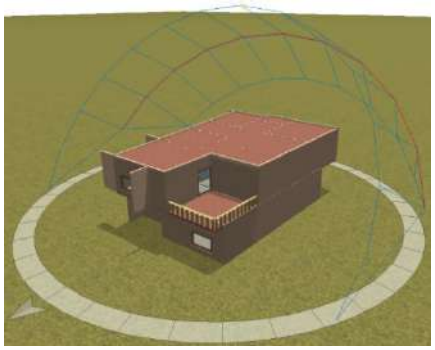


Figure 1. Edificio Residencial

Figure 2. Planta Baja

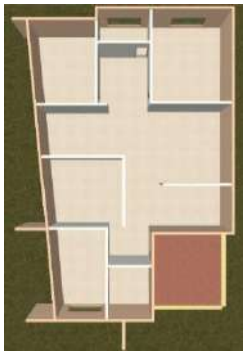


Figure 3. Primer Nivel

CASO DE ESTUDIO

A continuación se describen los diferentes materiales que componen los muros exteriores, particiones interiores, forjado sanitario, forjado entre platas y cubierta que conformaran los tres casos de estudio del presente trabajo. Así mismo, la figura 4, figura 5, figura 6, figura 7 y figura 8 muestra sus respectivas transmitancia térmica utilizada en las simulaciones (Papadopoulos, 2008).

- *Caso 1:* Muros Exteriores: Pintura, enlucido de yeso, mortero de cemento, block de concreto convencional, mortero de cemento, enlucido de yeso y pintura; Muros Interiores: Pintura, enlucido de yeso, mortero de cemento, block de concreto convencional, mortero de cemento, enlucido de yeso y pintura; Forjado Sanitario: Loza de hormigón armado; Forjado entre las plantas: Loza de hormigón armado; Cubierta: Loza de hormigón armado.
- *Caso 2:* Caso 1 con aislamiento de poliestireno expandido EPS.
- *Caso 3:* Muros Exteriores: Pintura, basacoat con malla de vidrio de refuerzo y finish, poliestireno expandido EPS, tablero OSB, poliestireno expandido EPS, placa de yeso, enlucido de yeso y pintura.

Figure 4. Caso 1

Figure 5. Caso 2

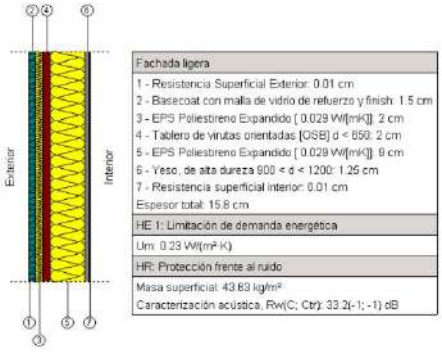


Figure 6. Caso 3

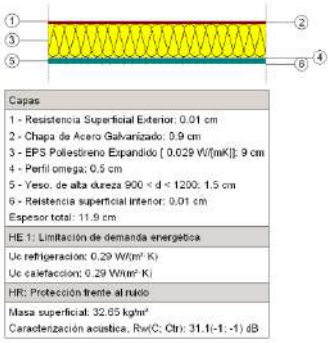


Figure 7. Caso 3

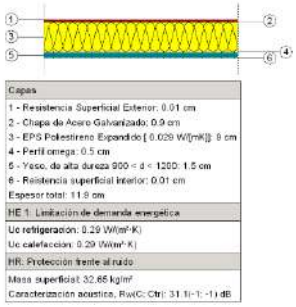


Figure 8. Caso 3

SIMULACIÓN DE CARGAS DE CLIMATIZACIÓN

La simulación del consumo de energía en esta investigación considera un edificio residencial típico de nivel medio alto para la ciudad de Mexicali, al cual se le determina la carga de refrigeración y calefacción total, así mismo, se realizará una simulación dinámica de dichas cargas mensuales, ya que estos resultados serán la base para continuar con la investigación para la instalación de sistemas de climatización para el periodo de verano e invierno. En el cálculo de las cargas de refrigeración y calefacción, se han fijado una serie de consideraciones, tanto interiores como exteriores, con el fin de alcanzar un adecuado comportamiento de la instalación al momento de realizar las simulaciones. La temperatura interior de diseño del sistema de refrigeración y calefacción será de 24 °C y 21 °C

respectivamente, dentro de los valores de temperatura operativa fijada por el Software CypeCad MEP basado en el Código Técnico de la Edificación de España del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España (CTE, 2015).

Para establecer las condiciones de temperatura exterior del proyecto se recurre al Weather Data Sources del U.S. Department of Energy (DOE, 2015) tomando como ciudad de referencia Yuma, Arizona por tratarse de la ciudad más próxima a la de estudio con las condiciones climatológicas similares a la ciudad de Mexicali. El cálculo de las cargas de refrigeración y calefacción se realizó conforme a lo establecido en la norma UNE EN 12831:2003. Empleando el software informático CYPECAD MEP de la empresa CYPE Ingenieros, S.A., vesión After Hours (CYPE, 2013), destinada principalmente a estudiantes. Ofrece la posibilidad de exportar los datos introducidos a EnergyPlus™ (EnergyPlus, 2015), software de libre distribución de simulación dinámica que permitirá hacer los estudios de demanda y consumo energético.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se procede a realizar una estimación de las cargas de refrigeración y calefacción para cada uno de los casos propuestos. Los resultados de consumo mensual obtenidos para los casos de estudio se muestran en el Tabla 1. En cuanto a la comparación entre los tres casos de estudio se puede observar que el *caso 3* es el que genera un menor consumo debido a refrigeración y calefacción para la potencia por superficie con 54.5 W/m^2 y 36.1 W/m^2 respectivamente, mientras que para la potencia total este mismo caso presenta también el menor consumo para refrigeración y calefacción con 15.74 kW y 10.43 kW respectivamente. Cabe destacar el excelente desempeño de los materiales ligeros de construcción Steel-Frame que son el objeto de estudio del presente trabajo, generando una disminución en el consumo de refrigeración y calefacción para la potencia por superficie de 60.67 % y 71.49 % con respecto al caso base (Caso 1). Revisando el consumo de refrigeración y calefacción para potencia total este caso genera una decremento de 60.40 % y 71.29 % con respecto al caso base.

	Potencia por superficie (W/m2)		**Potencia total (kW)**		**Toneladas de refrigeración**	
	Refrigeración.	***Calefacción.***	***Refrigeración.***	***Calefacción.***	***Refrigeración.***	***Calefacción.***
Caso 1	138.6	126.6	39.71	36.26	11.29	10.31
Caso 2	63.5	50.2	18.02	14.25	5.12	4.05
Caso 3	54.5	36.1	15.74	10.43	4.47	2.96

Tabla 1. Cargas de refrigeración y calefacción

CONCLUSIÓN

Actualmente el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) ha realizado diversos estudios con el software CYPECAD MEP Versión After Hours y EnergyPlus. Los estudios comprenden desde diferentes modelos de viviendas unifamiliares, edificios educativos y administrativos de hasta cuatros niveles, así mismo, estudios de materiales cerámicos, materiales compuestos y nuevos materiales reciclados para construcción. Esta investigación nos permitió analizar el consumo de energía de tres casos de edificio residencial en la ciudad de Mexicali, Baja California, que pertenece a una zona de clima cálido en México, utilizando los datos climatológicos de la ciudad de Yuma, Arizona por sus características similares a nuestra ciudad de estudio. El análisis se realizó con el fin de evaluar las cargas de refrigeración y calefacción para el periodo de verano e invierno de dicho edificio residencial utilizando distintos escenarios de sistemas constructivos; construcción convencional (Caso 1 y Caso 2) y Steel-Frame (Caso 3). Los resultados obtenidos mostraron que los materiales ligeros para construcción presentan ahorros energéticos en cargas de climatización superiores al 60% comparado con los materiales convencionales de construcción utilizados en la ciudad de Mexicali.

El sistema constructivo Steel-Frame (figura 9) es competitivo frente a los sistemas constructivos tradicional, presentan una disminución en los costos de construcción de 4.4%, cabe destacar que los materiales representan un porcentaje alto en los costos de construcción con Steel-Frame. Esto trae, por un lado que la elección de los materiales puede llevar hacia una obra más económica o más costosa y por otro lado apoya la ventaja que ofrece la industria de utilizar materiales de alta prestación, calidad y economía (Consul Steel, 2013). El aislamiento térmico en los sistemas constructivos Steel-Frame genera un ahorro energético significativo, estudios realizados por instituciones educativas, institutos de investigaciones y empresas relacionadas a materiales aislantes brindan datos certeros de cuánto porcentaje y cuánto dinero estaríamos ahorrando al colocar un aislamiento térmico en relación a una obra que no la posee. Esta aislación considerada dentro de los sistemas constructivos Steel-Frame genera un ahorro en los consumos energético del edificio (figura 10).

Figure 9. Vivienda Steel-Frame. http://dmx-mexico.com/

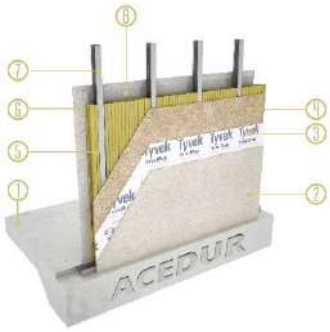


Figure 10. Steel-Frame. http://www.acedur.com/

RECOMENDACIONES S

Como continuación del presente trabajo se realizará un estudio económico detallado para mostrar los benéficos que ofrecen los materiales ligeros en el área de la construcción residencial en lugares de climas cálidos como el que presenta la ciudad de Mexicali, Baja California. Impulsando el cambio de los sistemas constructivos tradicionales de México, por los sistemas constructivos ligeros, tales como los sistemas Steel-Frame. Así mismo, se continuará con la investigación de materiales ligeros para edificios residenciales de interés social, ya que representan el mayor porcentaje en el territorio de México.

Otros de los puntos a realizar en la investigación es la elección de los sistemas de climatizaciones convencionales de alta eficiencia y sistemas de climatización geotérmica, adecuados a las cargas dinámicas mensuales, generando un ahorro en la inversión inicial y en la facturación mensual por consumo eléctrico a lo largo de la vida útil del sistema de climatización.

REFERENCIAS

A. Ioannou, L.C.M. Itard, *"Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy"*. Energy and Buildings 92. 2015. Pag 216-233.

A. M. Sarmanho y R. C. Moraes. *Steel Framing: Arquitectura*. Asociación Latinoamericana del Acero, Alacer. Instituto Brasileiro De Siderurgia Centro Brasileiro De Construçâo Em Aço. 2006

Agis M. Papadopoulos, Simos Oxizidis, Luciano Papathanasiou, *"Developing a new library of materials and structural elements for the simulative evaluation of buildings' energy performance"*. Building and Environment 43. 2008. Pag 710-719.

C. Pérez, M. De Armas, H. Campbell, M. Galindo, M.G. Amado, *"Consumo eléctrico y capacidad de enfriamiento residencial empleando técnicas de inteligencia artificial"*. V conferencia internacional de energía renovable, ahorro de energía y educación energética CIER, 2007.

D. Solís, *"Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado"*. Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto. Volumen III. Número 3. 2010. Pag 31-57.

E. De Angelisa, E. Serraa, *"Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges"*. Energy and Buildings 45. 2014. 362 – 371.

R. Andarinia, *"The Role of Building Thermal Simulation for Energy Efficient Building Design"*. Energy Procedia 47. 2014. Pag 217-226.

R. Romero, G. Bojórquez, M. Corral, R. Gallegos, *"Energy and the occupant's thermal perception of low-income dwellings in hot-dry climate: Mexicali, México"*. Renewable Energy 49 (2013). Pag. 267-270.

http://www.inegi.org.mx *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).*

http://www.energia.gob.mx/taller/res/1858/IEE_Mexico.pdf. *Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 Sectores, 5 retos, Secretaría de Energía (SENER) en colaboración con la Agencia Internacional de Energía (IEA), 2011.*

http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2012&country=MEXICO&product=Balances. *World Energy Balances, IEA, edición 2014.*

http://www.energia.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Balance_2013.pdf. *Balance Nacional de Energía 2013, Secretaría de Energia (SENER), 2014.*

http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/. *CTE. Código Técnico de la Edificación de España*, 2015.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=4_north_and_central_america_wmo_region_4/country=1_usa/cname=USA. *Weather Data Sources - U.S. Department of Energy (DOE)*, 2015.

http://descargas.cype.es/. *CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)*, 2013.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/. *EnergyPlus Energy Simulation Software*, 2015.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

LA VIVIENDA COMO UNA DE LAS PRIORIDADES DEL DESARROLLO DE MEXICO: LABORATORIO NACIONAL DE VIVIENDA Y COMUNIDADES SUSTENTABLES

José M. Ochoa de la Torre, Glenda B. Yanes Ordiales, Irene Marincic Lovriha, María G. Alpuche Cruz
Alejandro Duarte Aguilar, Juan L. Loredo López, Luisa M. Gutiérrez Sánchez
Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Bld. Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, Tel. (662)2592179, Fax (662)2592180, josemanuel.ochoa@laboratoriodevivienda.org

Gabriel Castañeda Nolasco
Facultad de Arquitectura, UNACH, Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 29050, México, gabriel.castaneda@laboratoriodevivienda

Fernando Córdova Canela
Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, U de G, Calzada Independencia Norte 5075, Guadalajara, Jalisco, 44250, México, ferando.cordova@ laboratoriodevivienda.org

Elvira Maycotte Pansza
Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte, UACJ, Calle o Apartado Postal, Ciudad, Estado, Código Postal, País, Teléfono, Fax, elvira.maycotte@ laboratoriodevivienda.org

RESUMEN

En las últimas décadas ha prevalecido en México un modelo de crecimiento urbano-territorial, extensivo, poco denso y periférico, cuyo despliegue ha fomentado un desarrollo de la vivienda con altos costos para el país tanto en materia ambiental, como económica y social.

Los recientes planes y programas gubernamentales vinculados a la gestión de políticas urbano-residenciales, se han encaminado hacia acciones estratégicas de fortalecimiento del desarrollo sustentable del sector a nivel nacional, teniendo como base el impulso de las vocaciones y competencias científicas, tecnológicas y de innovación local-regional, bajo un esquema de vinculación intersectorial e interinstitucional.

En el 2006 el CONACYT lanza la convocatoria del Programa para la Formación de Laboratorios Nacionales, que son unidades especializadas que promueven el desarrollo científico y la innovación en temas fundamentales de interés nacional, con el fin de optimizar recursos, generar sinergias y ofrecer servicios constantes y de calidad, así como incidir en la formación de recursos humanos de calidad.

Atendiendo la convocatoria del 2015, se asociaron cuatro instituciones académicas mexicanas: la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) (líder del proyecto), la Universidad de Guadalajara (U de G), la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) y la Universidad de Sonora (UNISON), para proponer el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS), aprobado y financiado por el CONACYT en ese mismo año. En la primera etapa en el año 2015, el LNVCS quedó constituido con equipamiento básico, organización interna y la Implementación de un Sistema de Gestión de Calidad según lo establece la norma ISO 9001-2015, lo que permitirá al Laboratorio prestar servicios con mejor calidad.

En este artículo se presentan los objetivos, pertinencia, proceso de creación y certificación, así como los servicios y productos asociados al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables.

ABSTRACT

In recent decades in Mexico has prevailed an urban-territorial growing model, extensive, very dense and peripheral, whose deployment has fostered a development of housing with high costs for the country both environmental, economic and social.

Recent government programs related to the management of urban residential policies have been aimed towards strategic actions to strengthen the sustainable development of the sector at national level, based on the promotion of vocations and scientific, technological and innovation competence under inter-linking scheme.

In 2006 the CONACYT launches the call of the Program for the establishment of National Laboratories, which are specialized units that promote scientific development and innovation in key national issues, in order to optimize resources, create synergies and provide constant services, and influence the formation of quality human resources.

Heeding the call of 2015, four Mexican academic institutions were associated: the Autonomous University of Chiapas (UNACH) (project leader), the University of Guadalajara (UDG), the Autonomous University of Ciudad Juarez (UACJ) and the University of Sonora (UNISON), to propose the National Laboratory of Housing and Sustainable communities (LNVCS), approved and funded by CONACYT in the same year. In the first stage in 2015, the LNVCS was constituted with basic equipment, internal organization and the implementation of a Quality Management System as established by ISO 9001-2015, which will allow the laboratory to provide services with better quality.

This article describes the objectives, relevance, the process of creation and certification, as well as the associated services and products of the National Laboratory of Housing and Sustainable Communities are presented.

PALABRAS CLAVE

Vivienda sustentable, comunidades sustentables, laboratorio nacional, desarrollo sustentable, calidad de vida, desarrollo humano.

LA VIVIENDA SOCIAL EN MÉXICO: ESTADO ACTUAL

En México existen cerca de 31.7 millones de viviendas, con antigüedad promedio de 20.4 años. Se trata de vivienda relativamente joven. Más de dos terceras partes, equivalente a 20.7 millones, fueron construidas sin apoyo técnico o financiero, es decir, fueron autoproducidas. Además, podemos suponer que buena parte de éstas aún se encuentran en proceso de consolidación, ya que una casa de este tipo tarda en promedio 18 años en concluirse (Murrieta, 2003).

El 28.3% de los hogares que habitan el total de viviendas mexicanas se encuentran en condiciones de rezago. Esto puede significar: 1. Que las edificaciones cuentan con techos y muros a base de material de desecho, lámina de cartón y/o carrizo (rezago por construcción con materiales deteriorados); 2. Que cuentan con muros de lámina metálica o de asbesto, madera o adobe, y techos de lámina metálica o de asbesto, madera, tejamanil o teja (rezago por materiales regulares); o 3. Que las viviendas están ocupadas por dos o más hogares (Fundación CIDOC; SHF, 2015).

Más de medio millón de viviendas depositan sus residuos sólidos en la calle, barrancas o cuerpos de agua. Además se desconocen las condiciones de operación de los 4.6 millones de fosas sépticas habitacionales que existen (Fundación CIDOC y SHF 2014).

Sumado a lo anterior, se ha presentado un incremento de conjuntos habitacionales ubicados fuera de la mancha urbana compacta, es decir lejos de los servicios básicos de infraestructura y equipamiento. Esto ha tenido como consecuencia un incremento en costos de traslado para los residentes e incluso abandono de la vivienda, sobre todo por encontrarse alejados de los centros de trabajo, pero también debido a situaciones de inseguridad o violencia. El efecto del éxodo de las periferias con planeación deficiente ha favorecido el encarecimiento del suelo servido y la especulación inmobiliaria.

Así, ante un escenario de aproximadamente 200,000 viviendas abandonadas, el Gobierno Federal ha planteado rescatar y reinsertar entre 47,000 y 50,000 de ellas en 2015 (Fundación CIDOC; SHF, 2015, pág. 17).

Entre los retos que actualmente plantean los distintos órdenes de gobierno en relación a la producción de vivienda y el ordenamiento territorial conviene señalar: La escasez de suelo urbanizado, así como un incremento en el precio del mismo; la ausencia de redes de transporte público sustentable relacionadas con la falta de conectividad y accesibilidad; la normatividad contradictoria entre los diferentes órdenes de gobierno y su aplicación; y el ritmo del crecimiento de la población y demanda de vivienda a mayor ritmo de la expansión de la infraestructura y los servicios (Ibíd.).

Habrían de agregarse, la irregularidad en la tenencia de la tierra y la falta de normatividad adecuada a los ámbitos locales ya sea por cuestiones medio-ambientales o culturales.

Vale destacar que estos retos son muy similares a los indicados en el documento del Reporte de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo: Nuestro Futuro Común, mejor conocido como el informe Brundtland, presentado en marzo de 1987. En el trabajo se destina un capítulo a los temas –entonces emergentes- sobre los retos de la cuestión urbana, en la sección destinada a la orientación de las políticas públicas. Destacaban entonces como planteamientos relevantes:

La interrelación entre desarrollo rural y urbano y el ordenamiento equilibrado del territorio.

La necesidad de promover un ámbito social incluyente y participativo que fortalezca las capacidades de las autoridades locales y promueva el involucramiento de la ciudadanía.

La relevancia de implementar programas públicos que atiendan las demandas de vivienda para los pobres, la regularización de la tenencia de la propiedad y la dotación de servicios e infraestructura.

La necesidad de regulación y políticas que aminoren la tendencia a generar vacíos urbanos que fomentan la especulación inmobiliaria y el encarecimiento del suelo urbano.

Actualmente, el Programa Habitat de las Naciones Unidas declara que el desarrollo urbano sustentable debe cimentarse sobre tres componentes básicos: La legislación urbana, congruente y sólida, que promueva la descentralización y gobernanza que involucre activamente a la sociedad civil; el diseño y la planificación de la ciudad compacta, con mixtura de usos de suelo que favorezca la interacción socio-cultural y reduzca la necesidad de uso de transporte; y las finanzas urbanas, que consideren inversiones públicas iniciales para cubrir gastos corrientes y obtener beneficios financieros (UN-HABITAT, 2015).

Es en este escenario de políticas y señalamientos internacionales y de condiciones locales de rezago habitacional que distintas instancias gubernamentales en México han desplegado una serie de estrategias, aún en proceso o pendientes de evaluarse para atender la problemática. A partir de 2015 se aplican estímulos fiscales como la eliminación del IVA en la prestación de servicios de la construcción de vivienda –como incentivo para promover esta actividad; se han convocado concursos y premios para propuestas de viviendas que promuevan la inclusión de personas con capacidades distintas y sus familias, así como de vivienda productiva o transformable; han disminuido las tasas de interés en créditos para adquisición de vivienda vertical -para favorecer los procesos de densificación y ocupación de suelo servido-; se han certificado conjuntos habitacionales que cumplen con condiciones de sustentabilidad -inclusión social y participación comunitaria, mitigación de impacto negativo sobre el medio ambiente y ahorro de recursos-, entre otros (Fundación CIDOC; SHF, 2015).

Estos proyectos piloto han convertido a la ciudad misma en un laboratorio con múltiples casos aún en espera de ser estudiados.

A partir de 2014, INFONAVIT promueve la realización de investigaciones y estudios especializados en estas temáticas (Fundación CIDOC; SHF, 2015, pág. 59) y en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (PND 2013-2018), el Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología (CONACYT) ha promovido y cofinaciado la creación y fortalecimiento de laboratorios nacionales que atiendan los principales ejes para el desarrollo.

La inclusión social entendida como el acceso apropiado a los derechos sociales de: 1. Educación, 2. Servicios de salud, 3. Seguridad social, 4. Alimentación y 5. Vivienda con servicios básicos (agua, electricidad y drenaje), espacios suficientes y de calidad, se considera uno de los 5 retos para el desarrollo en el documento del PND 2013-2018.

A la problemática del acceso a la vivienda de calidad hay que agregar el hecho de que el 44% de la población trabajadora en México percibe ingresos por debajo de los 2 salarios mínimos mensuales (PND 2013-2018, 2013: 44) y que una cifra similar de hogares, el 43.4% (12,383,325 de unidades) se encuentran en situación de pobreza energética. Es decir, no cuentan con un número adecuado de bienes económicos que consumen energía para mejorar la calidad de vida de la persona. Estos bienes son electrodomésticos como el refrigerador, los sistemas de calefacción o de enfriamiento climático, los focos o lámparas fluorescentes, etc. (Ochoa-García, 2014).

Asimismo Roaf *et al.* (2009) definen un término similar: "*Fuel poverty*", el cual se aplica cuando una familia necesita emplear más del 10% de su ingreso a mantener su casa en condiciones de confort térmico, ya sea para calentar o enfriar su vivienda. La pobreza energética es causada por la convergencia de tres factores: 1. Bajo ingreso familiar, relacionado con la pobreza. 2. Alto precio de la energía (combustibles y electricidad) , que en México aún con los altos subsidios que tienen los energéticos, en ciertas zonas del país con climas extremos afecta a las familias de menores ingresos, y 3. Baja eficiencia energética de las viviendas, debido al pobre o nulo diseño térmico, vacíos en la normatividad y en la utilización de sistemas de acondicionamiento ambiental viejos o inadecuados. Aunque en principio el concepto está ligado al uso de la energía para acondicionamiento ambiental, deben considerarse otros usos, como la energía para el funcionamiento de electrodomésticos básicos como refrigerador, cocina y agua caliente, así como iluminación y, cada vez más, telecomunicaciones y entretenimiento.

Es en este orden de ideas que la vivienda asequible y acondicionada apropiadamente según las condiciones socio-culturales y climatológicas se entiende como el elemento clave para favorecer el desarrollo humano. La ubicación de la vivienda inserta en un tejido urbano compacto, con uso de suelo mixto, que promueva la interacción social y reduzca la necesidad de traslados en vehículos motorizados, así como el diseño de vivienda que requieran bajo mantenimiento y bajo consumo energético. Esto último cobra una mayor relevancia cuando la vivienda se ubica en sitios de clima extremo que, bajo un diseño de esquema convencional, representa un alto consumo energético y de gasto.

EL PROGRAMA DE LABORATORIOS NACIONALES DE CONACYT

En el año 2006, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) implementa el Programa de Establecimiento de Laboratorios Nacionales de Infraestructura Científica o Desarrollo Tecnológico con base en el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006, en las atribuciones que le confiere la Ley de Ciencia y Tecnología y su Ley Orgánica, así como en las estrategias y líneas de acción contenidas en el Programa Especial de Ciencia y Tecnología (PECYT). Se creó el Programa de Fomento a la Investigación Científica, cuyas Reglas de Operación, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 26 de febrero de 2003, y el cual contempla al Subprograma de Investigación Aplicada, mismo que dentro de sus modalidades establece la creación y equipamiento de laboratorios de alta especialidad, así como la creación y consolidación de grupos de redes de investigación (CONACYT, 2006)[1].

Según la convocatoria publicada en el 2014, los Laboratorios Nacionales apoyados por el CONACYT (2014) son unidades especializadas, que pertenecen a un grupo de Instituciones, que refuerzan la infraestructura y equipamiento en temas fundamentales para el desarrollo científico y la innovación, de manera que incidan en la formación de recursos humanos de calidad, brinden servicios externos a sectores de la sociedad y sean autofinanciables. Se espera que estos Laboratorios tengan un alto impacto nacional en el desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación.

Con el fin de optimizar recursos, generar sinergias y ofrecer servicios constantes y de calidad, estas unidades se han conceptualizado como "Laboratorios sin paredes" de manera que se establezcan como una asociación entre Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación Públicos y Privados, así como con los Institutos Nacionales de Salud de las diferentes regiones del país para los fines mencionados. Independientemente de la temática y orientación de los Laboratorios Nacionales, cada uno deberá contemplar en su estructuración y operación, la integración de elementos académicos-científicos, tecnológicos y de innovación en el plano social [2].

En la primera convocatoria que se publicó en 2006 se apoyaron 15 laboratorios, tres años después en el 2009 se lanza la segunda convocatoria donde se apoyaron 18 laboratorios más con proyectos de mediano plazo. En 2014 se vuelve a lanzar la convocatoria para la formación de Laboratorios Nacionales, en esta ocasión se apoyaron en total 27 proyectos, de los cuales 17 eran nuevos. Asimismo en la convocatoria de 2015 se apoyaron y fortalecieron 41 laboratorios y finalmente en 2016 el presupuesto permitió apoyar y fortalecer 40 laboratorios (Sánchez, 2016).

Actualmente se cuenta con 66 Laboratorios Nacionales, que desarrollan los más diversos temas, contenidos tanto en el *Programa Especial de Ciencia y Tecnología(PECYT) 2001-2006*, como en las sucesivas versiones, hasta llegar al actual *Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECITI) 2014-2018*. En la tabla 1 se pueden apreciar las diversas temáticas según el plan correspondiente a la convocatoria.

Tabla 1. Temática correspondiente a la primera y última convocatoria de Laboratorios Nacionales.

Convocatoria 2006 (PECYT 2001-2006)	**Convocatorias 2014-16 (PECITI 2014-2018)**
Biotecnología o Biomedicina	Ambiente
Nanotecnología	Conocimiento del universo
Cómputo avanzado	Desarrollo sustentable
Energías alternas	Desarrollo tecnológico
	Energía
	Salud
	Sociedad

LABORATORIO NACIONAL DE VIVIENDA Y COMUNIDADES SUSTENTABLES

En el marco de la Red de Vivienda, conjunto de grupos de investigación con esta temática en México, se definió la necesidad de la creación del Laboratorio Nacional, que promoviera soluciones innovadoras en el ámbito de la vivienda social y el desarrollo urbano sustentables, dada la reapertura de las convocatorias para este tipo de proyectos por parte de CONACYT. A pesar de existir mas de 40 laboratorios nacionales en ese momento y la variedad de temáticas que abordaban, no había ninguno que tratara temas relacionados con la arquitectura y el urbanismo.

[1] Tomado de la convocatoria 2006 "Apoyos Complementarios para el Establecimiento de Laboratorios Nacionales de Infraestructura Científica o Desarrollo Tecnológico", primera convocatoria sobre los Laboratorios Nacionales de CONACYT.

[2] Convocatoria 2014 "Apoyos Complementarios para el Establecimiento y Consolidación Laboratorios Nacionales CONACYT".

Atendiendo la convocatoria del 2015, se asociaron cuatro instituciones académicas mexicanas: la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) (líder del proyecto), la Universidad de Guadalajara (UDG), la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) y la Universidad de Sonora (UNISON), para proponer el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS), el cual fue aprobado y financiado por el CONACYT en ese mismo año. Cada una de las instituciones cuenta con una experticia específica en temas relacionados al ámbito de la vivienda y el urbanismo sustentables.

El Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables, constituye un organismo interinstitucional con competencias técnicas y científicas tanto para la gestión, desarrollo tecnológico e innovación y desarrollo del sector de vivienda y de las comunidades con una visión sustentable, asimismo se propone el desarrollo de servicios internos y externos de investigación y la formación de recursos humanos de alto nivel asociados al sector. Lo anterior, con índices de cobertura regional que reconocen fortalezas, capacidades y recursos regionales en virtud de una estructura organizacional consorciada y complementaria. En la primera etapa en el año 2015, el LNVCS quedó constituido con equipamiento básico, organización interna y la implementación de un Sistema de Gestión de Calidad según lo establece la norma ISO 9001-2015, lo que permite al Laboratorio prestar servicios con mejor calidad.

Estructura Organizacional

Dada la composición interinstitucional del LNVCS, se optó por una estructura organizacional que permitiese la interacción y complementación de las cuatro instituciones que lo componen, tanto en la dimensión nacional como en la regional.

En la dimensión regional, cada institución forma un *Gabinete de Trabajo Regional*, el cual estará compuesto por la *Dirección Regional*, una *Unidad de Investigación y Desarrollo*, que como su nombre lo indica estará a cargo de las actividades de investigación y desarrollo tecnológico que se lleven a cabo tanto en el ámbito regional como en la interacción con las otras unidades regionales, así como de la formación de recursos humanos y la relación con los programas de posgrado asociados al laboratorio. También existe la *Unidad Ejecutiva*, la cual se encarga de la administración, finanzas, adquisiciones, gestión empresarial y la coordinación de calidad, que implica todo lo relacionado con el sistema de gestión de calidad asociado a la ISO 9001:2015. Asimismo está la *Unidad de Vinculación*, la cual se encarga de la vinculación y relación con entidades externas, difusión de las actividades realizadas y de los servicio a ofrecer, mercadotecnia, sitios web y comunicación. Por último está el Comité Regional Consultivo de Formación de Recursos Humanos, que está constituido por el Director Regional, el Jefe de la Unidad de Investigación y Desarrollo y el Coordinador Académico de los programas de posgrado asociados al Laboratorio.

En al ámbito nacional hay un Consejo General que estará constituido por los cuatro Directores Regionales, uno de los cuales es nombrado Director General del Laboratorio. Asimismo hay tres comités: Técnico, Ejecutivo y de Vinculación, los cuales están constituidos por los jefes de las unidades regionales correspondientes, además hay un Comité Nacional de Formación de Recursos Humanos, que está constituido por los Directores Regionales, los Jefes de las Unidades de Vinculación y los coordinadores de los programas de posgrado asociados. En la figura 1 se puede apreciar con mayor claridad el diagrama organizacional del LNVCS.

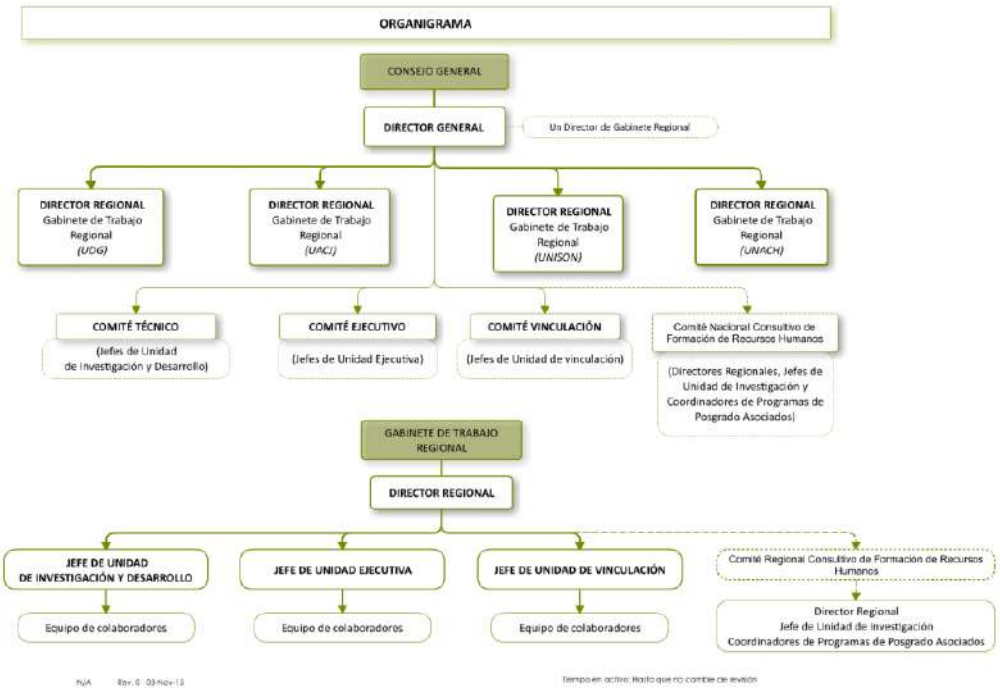


Figura 1. Organigrama del Consejo General y de los Gabinetes de Trabajo Regionales

Sistema de Gestión de Calidad. Un sistema de gestión de la calidad (SGC) es una estructura operacional de trabajo, documentada e integrada a los procesos técnicos y gerenciales, para guiar las acciones de la fuerza de trabajo, la maquinaria o equipos, y la información de la organización de manera práctica y coordinada, que asegure la satisfacción del cliente y bajos costos para la calidad (Mateo, 2009).

En el caso del LNVCS se aplicó la ISO 9001:2015, que es una norma de sistemas de gestión de la calidad (SGC) reconocida internacionalmente. La norma ISO 9001 es un referente mundial en SGC, superando el millón de certificados en todo el mundo. La norma

ISO 9001 es aplicable a cualquier organización, independientemente de su tamaño y ubicación geográfica. Una de las principales fortalezas de la norma ISO 9001 es su gran atractivo para todo tipo de organizaciones. Al centrarse en los procesos y en la satisfacción del cliente en lugar de procedimientos, es igualmente aplicable tanto a proveedores de servicios como a fabricantes (Mateo, 2009).

Implementar un Sistema de Gestión de Calidad, permite al LNVCS, sentar las bases para el desarrollo eficiente de sus actividades; cumpliendo con las normas de calidad, que se traducen en la excelencia de los servicios. También permite administrar, monitorear y evaluar la eficiencia en la ejecución de los procesos, en función de los estándares de calidad que establece la norma ISO 9001:2015, ya que conduce a la organización hacia una mejora constante y a su óptimo crecimiento y desarrollo.

Cartera de Servicios

La participación conjunta de las cuatro instituciones anteriormente mencionadas consolida y fortalece la infraestructura experimental del Laboratorio, los recursos humanos y físicos disponibles, en congruencia con las competencias de cada institución, ponderando la interrelación entre las líneas de investigación de los Cuerpos Académicos y programas de Doctorado de cada una. En función de lo anterior los ejes de acción del Laboratorio Nacional se orientan hacia un enfoque de abordaje inter y multidisciplinar de la vivienda y las comunidades, tomando en cuenta las siguientes cinco áreas estratégicas: 1. Urbano–Ambiental, 2. Tecnología e innovación, 3. Diseño y Proyectación, 4. Economía y Sociedad y 5. Patrimonial y Resiliencia, cuya cobertura regional se puede apreciar en la figura 2:

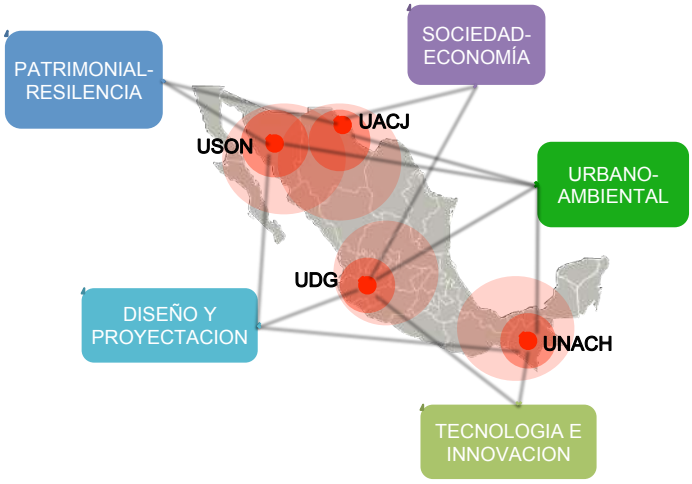


Figura 2. Cobertura y áreas estratégicas de énfasis regional.

Dadas las particularidades técnicas, académicas, tecnológicas, de participación y cobertura mencionadas, es competencia del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables el desarrollo de los siguientes servicios:

- Diagnósticos técnico-ambientales y soluciones integrales de modelación, simulación numérica y evaluación de variables ambientales aplicables a los componentes urbano arquitectónicos, a través de equipo de medición y monitoreo en sitio y de aplicación de software especializado.
- Estudios de las propiedades termofísicas de materiales y sistemas constructivos
- Soluciones integrales de modelado, documentación y geo- referenciación 3D con escáner láser terrestre de escenarios urbano arquitectónicos digitales, susceptibles de visualización y evaluación a través de la Unidad de Realidad Virtual Inmersiva.
- Estudios de prospectiva con base en la modelación de escenarios reales, tendenciales y deseables con indicadores de sustentabilidad aplicados a los conjuntos urbano-arquitectónicos.
- Fabricación rápida de prototipos y modelos de edificios y conjuntos urbanos, a través de impresión 3D y corte laser.
- Estudios de iluminación y soleamiento en modelos y edificaciones construidas.
- Evaluación energética postconstrucción y ocupación de edificaciones
- Planimetría 3D e imágenes térmicas a través de fotografía aérea.
- Desarrollo de anteproyectos ejecutivos urbanos y arquitectónicos bajo estándares integrales de sustentabilidad.
- Desarrollo de modelos de gestión tecnológica, innovación, transferencia de tecnologías y gestión social, orientados a la vivienda y el urbanismo sustentable.

Infraestructura y Equipamiento

Cada una de las instituciones que componen en LNVCS cultiva una o más líneas de investigación, lo que las circunscribe en uno o más de los ámbitos que maneja el Laboratorio, y por lo tanto define su equipamiento, infraestructura física, así como los servicios que puede prestar. Aún cuando cada institución contaba con laboratorios y equipo preexistente, en el presente apartado sólo se mencionará el equipamiento que se adquirió a partir de la fundación del LNVCS. La lista que se presenta en la tabla 2 no es exhaustiva, ya que solo incluye el equipo más representativo, sin embargo se cuenta con equipo de uso general como computadoras, impresoras grabadoras, cámaras fotográficas, tabletas electrónicas, así como software especializado y de ofimática.

Tabla 2. Infraestructura y equipamiento más representativo del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables.

Equipo	Descripción
Heliodón automático de dos ejes	Equipo fabricado sobre diseño para el LNVCS. El Heliodón automático de dos ejes, simula la proyección de la radiación solar en cualquier día, hora y lugar en modelos a escala de gran tamaño. Se pueden realizar estudios de iluminación natural, incidencia solar en edificaciones y aplicación energías renovables. UNISON
Anemómetros para flujo de viento en 3D	Son un anemómetros de precisión que permiten medir el flujo de viento en tres dimensiones. Sirve para realizar estudios de dispositivos pasivos y activos de ventilación natural en edificaciones y espacios exteriores. UNISON
Cámaras termográficas infrarrojas	Las cámaras termográficas permiten medir la temperatura superficial de diversos objetos. Se utilizan para realizar estudios de flujo de calor en diversos elementos constructivos, puentes térmicos, confort ambiental y eficiencia energética. Además se pueden detectar fugas de agua o refrigerante y cortocircuitos. UNISON, UNACH
Escáner láser terrestre Focus 3D	Escáner láser terrestre para medición, modelado y documentación 3D. geo-referenciada y de alta resolución de componentes urbano-arquitectónicos, incluye una unidad de computo portátil para procesamiento de datos. UDG
Unidad de Realidad Virtual Inmersiva	Equipo fabricado sobre diseño para el LNVCS. Visualización y evaluación ambiental y operativa de escenarios urbano-arquitectónicos digitales a través de realidad virtual inmersiva. UDG
Vehículos aéreos no tripulados (drones)	Estos vehículos tienen distintos tipos de sensores y cámaras, así como distintos formatos aerodinámicos (ala delta y quidricóptero) lo que permite diferentes coberturas de vuelo así como diferentes productos: mapas 3D, mapas térmicos, levantamientos topográficos, vídeo y fotografía aérea de alta resolución, entre otros. UACJ, UNISON
Equipo para medición de la conductividad térmica	Equipo fabricado sobre diseño para el LNVCS. para medir la conductividad térmica de materiales homogéneos y heterogéneos, cuenta con estructura de soporte, diseño que permite medir sistemas de muros (medición vertical) y sistema de losas (medición horizontal), así como sistemas de ventanas, puertas y otros similares. Está integrado además de equipos de adquisición de datos, baños térmicos, módulos de medición y control de potencia eléctrica. UNACH
Cámara climática para ambiente controlado	Equipo fabricado sobre diseño para el LNVCS. Cámara climática con aislamiento térmico. Diseñado específicamente para el equipo de conductividad térmica y los requerimientos del equipo placa caliente. UNACH
Aire acondicionado de precisión	Aire acondicionado de precisión de laboratorio para controlar las condiciones climáticas, específicamente de temperatura del aire y humedad relativa. UNACH

CONCLUSIONES

Se hizo un análisis del estado actual de la vivienda en México, así como de los principales conceptos y programas oficiales como antecedentes del LNVCS. Asimismo se describieron los principios del Sistema de Gestión de Calidad (SGC) y de la organización interna del LNVCS. Por otro lado se estableció que el LNVCS es un "laboratorio sin paredes" cuyas actividades y servicios están enfocados en cinco áreas estratégicas: 1. Urbano–Ambiental, 2. Tecnología e innovación, 3. Diseño y Proyectación, 4. Economía y Sociedad y 5. Patrimonial y Resiliencia, las cuales son de cobertura regional y nacional.

Con la participación conjunta de las cuatro instituciones (UNACH, UACJ, UDG y UNISON) se fortalece y consolida la infraestructura experimental del Laboratorio, los recursos humanos y físicos disponibles, en congruencia con las competencias de cada institución, ponderando la interrelación entre las líneas de investigación de los Cuerpos Académicos y programas de Doctorado de cada una.

Con el establecimiento de LNVCS se pretende llenar un vacío en el programa de Laboratorios Nacionales, así como complementar la oferta actual de servicios especializados en el desarrollo de proyectos de tipo académico, de investigación y consultoría, tanto para el sector académico como la vinculación con el sector público y privado en el área de experticia de cada institución.

Agradecemos la participación de las instituciones UNACH, UACJ, UDG y UNISON, así como del CONACYT a través del proyecto: 271517 que permitieron el desarrollo y consolidación del LNVCS.

REFERENCIAS

Brundtland, G. H. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. Recuperado el 2016 de Abril de 6, de United Nations Documents: http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf

CONACYT (2006) "Apoyos Complementarios para el Establecimiento de Laboratorios Nacionales de Infraestructura Científica o Desarrollo Tecnológico", http://2006-2012.conacyt.gob.mx/fondos/institucionales/Ciencia/LaboratoriosNacionales/Paginas/default.aspx, recuperado 15 de julio de 2016.

CONACYT (2014) "Apoyos Complementarios para el Establecimiento y Consolidación de Laboratorios Nacionales Conacyt 2014" http://www.conacyt.gob.mx/index.php/el-conacyt/convocatorias-y-resultados-conacyt/convocatoria-programa-de-laboratorios-nacionales/convocatorias-cerradas-programa-de-laboratorios-nacionales/convocatoria-2014-4, recuperado 15 de julio de 2016.

Fundación CIDOC; SHF. (2014). Estado actual de la vivienda en México 2014. México: México: BMC / México. Gobierno de la república. Recuperado el 12 de Octubre de 2015, de http://www.shf.gob.mx/estadisticas/EdoActualVivienda/Documents/EAVM%202014%20vf.pdf

Fundación CIDOC; SHF. (2015). Estado actual de la vivienda en México 2015. México: BMC / México. Gobierno de la república. Recuperado el 25 de Junio de 2016, de http://www.shf.gob.mx/estadisticas/EdoActualVivienda/Documents/EAVM_2015.pdf

Mateo, R. J., Sistemas de Gestión de la Calidad – Un Camino Hacia la Satisfacción del Cliente, http://qualitytrends.squalitas.com/item/108-sistemas-de-gesti%C3%B3n-de-la-calidad-%E2%80%93-un-camino-hacia-la-satisfacci%C3%B3n-del-cliente-%E2%80%93-parte-i.html, recuperado el 15 de julio de 2016.

Murrieta, A. (2003). La autoconstrucción de vivienda en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Hermosillo: COLSON (tesis de maestría).

Ochoa-García, R. (2014). Pobreza energética en América Latina. Santiago de Chile: ILPES / CEPAL / Naciones Unidas.

PND 2013-2018. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Gobierno de la República. Estados Unidos Mexicanos, http://pnd.gob.mx/wp-content/uploads/2013/05/PND.pdf recuperado el 7 de julio de 2016.

Roaf, S., Crichton, D. & Nicol, F. (2009). Adapting Buildings and Cities for Climate Change. Oxford Architectural Press.

Sanchez, V. (2016) "Tiene México 66 laboratorios de prestigio mundial" Agencia Informativa Conacyt Publicado el 30 de marzo de 2016. CONACYT, México.

SEDESOL. (2014). SEDESOL. Recuperado el 20 de agosto de 2015, de Piso Firme. Apéndice 1: http://www.2006-2012.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/EvaluacionProgramasSociales/Evaluacion_Impacto/EI_Piso_Firme/apendice_1_2.pdf

UN-HABITAT. (2015). Urban planning and design at UN-HABITAT. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de UN HABITAT for a Better Urban Future: http://unhabitat.org/urban-planning-and-design-at-un-habitat/

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

SIMULACIÓN DE CARGAS DE CLIMATIZACIÓN DEL EDIFICIO B DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA (ECITEC) DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA (UABC)

Emilio Hernández Martínez[1], Benjamín González Vizcarra[2], Gabriel Cisneros Cueva[3], Miguel A. Hernández Mendoza[4]
Programa Educativo de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01-(664)-676-8222,
emilio.hernandez.martinez@uabc.edu.mx, bgonzalez79@uabc.edu.mx, cisneros.gabriel@uabc.edu.mx, hernandezm24@uabc.edu.mx.

María del C. Prieto Avalos[5]
Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44 Mexicali, Baja California, 21280, México. 01-(686)-566-4270, **a168960@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

El siguiente artículo presenta los resultados del estudio de consumos de energía por climatización de un edificio docente. El objetivo principal de la investigación es evaluar las cargas de refrigeración y calefacción del edificio B de la ECITEC. Debido al tipo de usuario, la finalidad y confort de estas instalaciones que requieren un ambiente con condiciones óptimas para la concentración y estimulación del aprendizaje vitales en la comunidad estudiantil, ya que en ausencia de estas puede llegar a afectar a su desarrollo intelectual, así mismo, fomentar el uso adecuado de los recursos energéticos y económicos de la comunidad universitaria. La investigación se desarrolló en la ciudad de Tijuana, Baja California la cual se encuentra en la zona norte de México, en donde el clima predominante durante el año no es el adecuado para el proceso enseñanza – aprendizaje. El cálculo de las cargas de climatización fue realizado en el software CYPECAD MEP y EnergyPlus, los resultados obtenidos sentaran las bases para iniciar los trabajos pertinentes que den como resultado un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) en centros docentes de la ECITEC.

ABSTRACT

The following article presents the results of the energy consumption for air conditioning of a teaching building. The main objective of the research is to evaluate the cooling and heating load of the building B of the ECITEC. Due to the type of user, purpose and comfort of these facilities require an environment with optimum conditions for concentration and stimulation of vital learning in the student community, since in the absence of these it can potentially affect their intellectual development, likewise, promote proper use of energy and economic resources of the university community. The research was conducted in the city of Tijuana, Baja California which is located in northern Mexico, where the predominant climate during the year is not suitable for the teaching – learning process. The load calculation of air conditioning was conducted in the CYPECAD MEP and EnergyPlus software, the obtained results will provide the basis to start the relevant work that result in an Energy Management System (EnMS) in schools in the ECITEC.

Palabras claves: CYPECAD MEP, EnergyPlus, Simulación, Edificios docentes, Cargas de refrigeración, Cargas de calefacción y Sistema de Gestión de la Energía (SGEn).

INTRODUCCIÓN

De la misma manera en que las empresas se preocupan porque sus trabajadores lleven a cabo sus actividades en un ambiente adaptado a sus características y necesidades para que estas no afecten en la productividad, los centros educativos deben evaluar y distribuir los espacios docentes para que, tanto los profesores como los estudiantes, puedan realizar las actividades académicas en recomendables entornos de confort. Conseguir el mayor provecho posible de la luz natural, no exponerse de forma continua a niveles altos de ruido o evitar los cambios violentos de temperatura son algunos ejemplos que los especialistas en ergonomía en ámbitos escolares recomiendan en los salones de clase.

Las áreas educativas intervienen directamente en los resultados académicos de los estudiantes. Esto los confirma múltiples investigaciones llevadas a cabo alrededor del impacto que las condiciones ambientales y los hábitos ergonómicos de los centros escolares tienen en el aprovechamiento de los alumnos y en el trabajo de los formativos. A través de una revisión extensiva de la literatura "El impacto de los ambientes educativos: una revisión literaria", por el profesor Steve Higgins de la Universidad de Durham, Reino Unido, et al, (Consejo de Diseño, Londres 2005). La revisión explora el impacto de los ambientes de aprendizaje en el logro estudiantil y bienestar. En esta se encuentra evidencia clara que "ambientes de aprendizaje extremadamente pobres tienen un efecto negativo en los estudiantes y el personal docente y que al mejorarlo se obtienen beneficios significativos"

La calidad interna del aire, ventilación y confort térmico; iluminación; acústica y el tamaño de la escuela y de las aulas son los atributos espaciales que inciden sobre el aprovechamiento de alumnos y profesores, tal como apunta Mark Schneider, del Centro Nacional de Estadísticas Educativas Estadounidense. Su trabajo de investigación ¨ ¿Los Espacios Educativos Afectan los Resultados Académicos?"

concluye que “los espacios educativos influyen en el aprendizaje. La configuración del espacio, el ruido, calor, frio, luz y calidad del aire influyen en el rendimiento tanto de estudiantes como de maestros. Son necesarios aire limpio, buena iluminación, y un ambiente de aprendizaje tranquilo, cómodo y seguro.”

Es definitivamente necesario que los centros educativos muestren un excelente nivel de confort debido a la naturaleza y consideración de las actividades que dentro de ellos se realiza y a los periodos de tiempos prolongados que tanto el docente como el estudiante invierte en esta clase de instalaciones. El mismo proceso de enseñanza – aprendizaje se verá restringida con las condiciones en que este se promueva, de tal forma que será trabajo de la auditoria energética evaluar el funcionamiento del centro de aprendizaje en uso y averiguar las soluciones más eficientes energéticamente, conjugadas con los conceptos ergonómicos justos y obligatorios para asegura la adecuada ejecución del proceso enseñanza – aprendizaje.

Tomando en consideración que los estudiantes en estos centros educativos son la base del futuro de la sociedad, sería recomendable y de gran ayuda que estos trabajos de auditoria sean transmitidas y comentadas entre los alumnos, con el objetivo de hacer conciencia y educar sobre la necesidad de un planteamiento sostenible del planeta en el que vivimos.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar las cargas de refrigeración y calefacción del edificio B de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC), que sentaran las bases para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn, 2014) que dé como resultado un conjunto de ideas, soluciones y seguimiento adecuado encaminadas a conseguir un ahorro y uso eficiente de los recursos energéticos en los Centros Educativos en el Estado de Baja California, aumentando el confort y el uso adecuado de los recursos económicos de la comunidad educativa. Los centros educativos a los que se realizara este estudio son la ECITEC. Lo que hace necesario echar mano de la simulación para modelar el comportamiento térmico–energético de edificaciones, esta metodología es ampliamente aceptada en la evaluación del consumo de energía durante el proceso de diseño de los edificios nuevos y los que se encuentran en renovación (Ioannou & Itard, 2015). El software utilizado es CypeCad Mep versión After Hours para el diseño y dimensionamiento de la envolvente, la distribución, y las instalaciones del edificio sobre un modelo 3D integrado con los distintos elementos del edificio, esta versión es totalmente funcional como la versión profesional que oferta Cype Ingenieros.

ANTECEDENTES

Hoy en día el desarrollo de un país se basa y se refleja en una serie de factores económicos, técnicos y sociales, en los cuales la educación juega un papel muy importante para los factores antes mencionados, siendo uno de los pilares estratégicos de nuestra sociedad moderna. Es por ello la necesidad de mejora continua en todos los sentidos en el sector educativo mismo.

Por tal motivo se ha incrementado en todos los países el nivel de concientización hacia el sector educativo, con el objeto principal de dotar con la infraestructura y espacios adecuada a los centros educativos donde se realiza el proceso formativo. Siendo el caso México uno de los países que toma conciencia de lo antes mencionado, fortaleciendo el sector educativo en todos los niveles.

Es cierto que es preciso conseguir una ambiente adecuada tanto para la realización de actividades profesionales como de ocio o recreativas, una constante y una realidad en la sociedad actual, si bien en el ámbito del sector educación este ambiente tiene una mayor importancia puesto que en él se incluyen niños y adolescentes y entran en juego variables inherentes al propio desarrollo personal y fisiológico de la comunidad educativa como personas.

De acuerdo a la Guía de Auditorías Energéticas en Centros Docentes el consumo de energía de estos mismos es algo complejo de estimas de manera general, debido a la gran diversidad de instalaciones mencionadas. Así, dentro del término “Centro Docente”, se albergan desde Centros de educación infantil hasta Universidades, todos ellos con un denominador común: la búsqueda de altos rendimientos en cuanto a las instalaciones térmicas, de climatización y de iluminación. El consumo de energía en centros educativos dependen de muchos factores como son; ubicación geográfica, horarios de usos, características constructivas, finalidad de la instalación, antigüedad, etc.; pero es evidente es que el consumo de energía por climatización supone un porcentaje elevado en la mayoría de los centros educativos, por ejemplo en la comunidad de Madrid representa el 77 % del consumo total.

En el Estado de Baja California se han realizado diversos estudios y proyectos de investigación que caracterizan la tipología de edificios, la eficiencia energética de unidades de climatización, el consumo energético en diversos sectores y el efecto de elementos de ahorro de energía en los sistemas constructivos entre los que se destacan:

- Diseño y desarrollo tecnológico de prototipos de vivienda de alta eficiencia energética para el mercado medio residencia (Ingeniería Dennis S. A. de C. V.-UABC, 2011-2012).
- Simulador térmico para el diseño de construcciones ahorradoras de energía en climas cálidos (Hernández et al, 2011).
- Análisis del comportamiento térmico de cuatro diseños tipo vivienda de interés social (Grupo Melo-UABC, 2005).
- Resistencia térmica efectiva en envolventes residenciales y su impacto energético por climatización en regiones de clima cálido. Efecto de puentes térmicos (Pérez et al, 2004).
- Uso eficiente de la energía en el sector residencial de regiones de clima cálido (Pérez et al, 2004).
- Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica (Pérez et al, 2004).

Es conocido que en las regiones de clima cálido la climatización de edificio representa la mayor parte del consumo y la demanda eléctrica en la época de verano e invierno, debido a que la temperatura cambia continuamente durante el transcurso del día y la noche, es necesario medir las horas de confort totales en un día para así, poder reducir las cargas de refrigeración y calefacción en los edificios. Aunado a esto, es una práctica común el sobredimensionamiento de los equipos de climatización en un porcentaje considerable de la

totalidad de las instalaciones residenciales y no residenciales originando una sobrecarga del sistema eléctrico de Comisión Federal de Electricidad (CFE) en las horas punta y obliga a una mayor capacidad instalada en la región para satisfacer dicha demanda (Pérez, 2007).

En el estado de Baja California existe una importante red de centros educativos, constituida por cerca de 4,022 instalaciones de educación infantil, primaria, secundaria, bachilleratos y educación superior, de las cuales 12 instituciones de educación superior públicas y 51 instituciones de educación superior privadas, además de numerosas academias y centros y entidades de formación de carácter privado. Todos estos centros, por su finalidad y características, se engloban dentro del grupo de edificios considerados como de alto consumo de energía y esto supone un potencial de ahorro energético y económico en su funcionamiento muy importante.

METODOLOGÍA

Los programas de infraestructuras de CYPE contienen normas en las que se basa para calcular y dimensionar infraestructuras de edificaciones (suministro de agua, evacuación de agua, climatización, captación solar para producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS), protección frente a la acción del rayo, iluminación, gas, electricidad y telecomunicaciones y para comprobar aislamiento térmico y acústico, su certificación energética y su seguridad en caso de incendio). La normatividad tomada en cuenta en los programas de CYPE incluye normas vigentes y, además, normas suprimidas que se siguen utilizando, bien para comprobar y revisar estructuras que se dimensionaron dependiendo de las necesidades de los países a los cuales se les está aplicando.

El software CYPECAD MEP de CYPE Ingenieros contiene en un solo programa todas las instalaciones de una construcción de diversos tipos (viviendas, oficinas, hospitales, centros docentes, comerciales, residuales, etc.) Está formado por múltiples pestañas y módulos, según los distintos tipos de instalaciones que puedan proyectarse. En la pestaña de Climatización de CYPECAD MEP es posible crear y desarrollar en un único programa una instalación de climatización completa (sistemas aire-agua y aire-aire) y de calefacción (eléctrica y por agua con radiadores, suelo radiante y calderas), incluido el presupuesto de la instalación.

EnergyPlus es un software de simulación térmica y energética de edificios, este programa es desarrollada por el Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO) y manejada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL). El software de CYPECAD MEP dispone del módulo de Exportación a EnergyPlus, con el que es posible exportar la construcción introducido en EnergyPlus, desde las pestañas de Estudio Térmico y Climatización. La exportación a EnergyPlus es un complemento que ayuda al estudio térmico y energético de una construcción.

DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

La Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC) de acuerdo al sistema de información geográfica Google Earth se ubica en la región noroeste de México localizándose en las coordenadas 32°26'07.77"; de Latitud Norte y 116°40'31.54; de Longitud Oeste. El edificio escolar que se muestra en la figura 1 como objeto de estudio se encuentra en una zona en pleno desarrollo con el nombre de Valle de las Palmas en la ciudad de Tijuana, Baja California. El área de construcción de este edificio es de 1974.87m^2.

Figure 1. Edificio B, UABC ECITEC

El edificio cuenta con cuatro plantas, la *primera planta* posee: tres laboratorios, seis cubículos, tres almacenes, un cuarto de limpieza y un cuarto de instalaciones; la *segunda planta* posee: dos laboratorios, dieciséis cubículos, dos baños, un cuarto de instalaciones y un cuarto de limpieza; la *tercera planta* posee: con cinco salones, dos baños, un cuarto de instalaciones y un cuarto de limpieza; y por último la *cuarta planta* posee: seis salones, un cuarto de instalaciones y un cuarto de limpieza.

CASO DE ESTUDIO

A continuación se describen los diferentes materiales que componen los muros exteriores, particiones interiores, forjados sanitario, forjado entre plantas y cubiertas que conforman el caso de estudio del presente trabajo. Así mismo, la Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8 muestra las respectivas transmitancia térmica utilizada en la simulación (Papadopoulos, 2008).

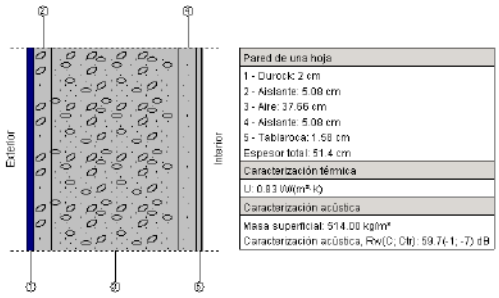


Figure 2. Cerramiento: Muro exterior con ventanas

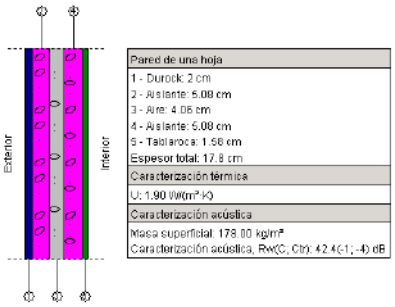


Figure 3. Cerramiento: Muro con ventanas Medio

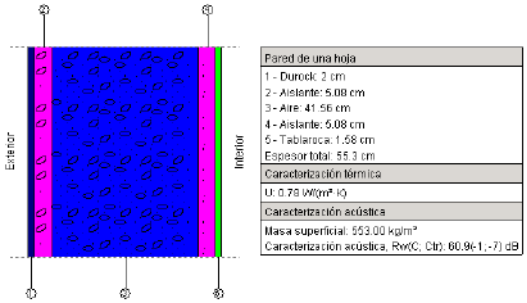


Figure 4. Cerramiento: muro con puerta lateral

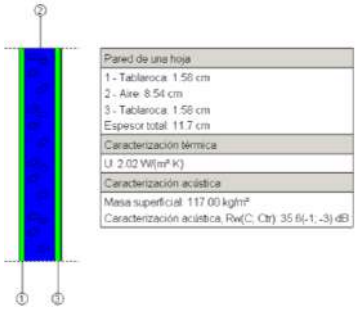


Figure 5. Tabiquería: Muro 1

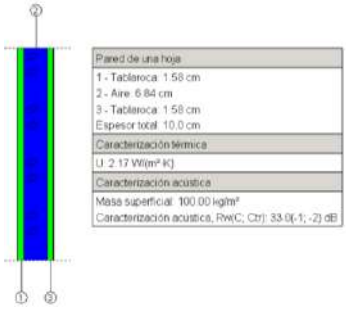


Figure 6. Tabiquería: Muro 2

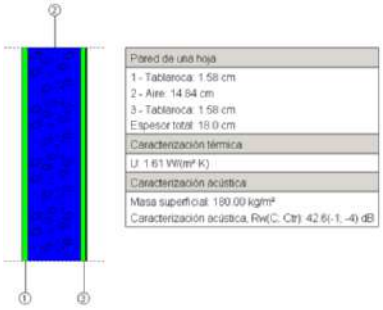


Figure 7. Tabiquería: Muro Baños

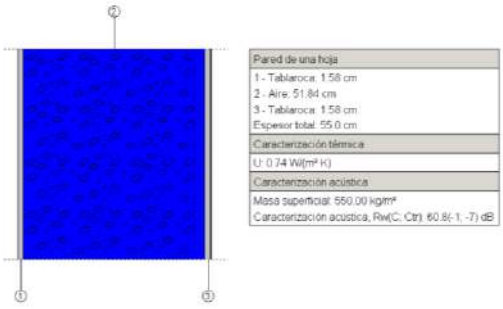


Figure 8. Tabiquería: Muro Separador de Puertas

Caso de estudio: *Muros exteriores*: Durock, aislante, aire, aislante, tablaroca; *Muros interiores*: tablaroca, aire, tablaroca; *Forjado sanitario*: solera de concreto, film de polietileno, poliestireno extruido; *Forjado entre las plantas*: forjado unidireccional (Bovedilla de hormigón); *Azotea*: pavimento de gres rustico, mortero de cemento, geotextil, impermeabilización asfáltica monocapa adherida, capa de mortero de cemento, cámara de aire, lana mineral, forjado unidireccional (Bovedilla de hormigón)

SIMULACIÓN DE CARGAS DE CLIMATIZACIÓN

En el cálculo de las cargas de refrigeración y calefacción, se han fijado una serie de consideraciones, tanto interiores como exteriores, con el fin de alcanzar un adecuado comportamiento de la instalación al momento de realizar las simulaciones. La temperatura interior de diseño del sistema de refrigeración y calefacción será de 24 °C y 21 °C respectivamente, dentro de los valores de temperatura operativa fijada por el Software CYPECAD MEP basado en el Código Técnico de la Edificación de España del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España (CTE, 2015). Para establecer las condiciones de temperatura exterior del proyecto se recurre al Weather Data Source del U.S. Department of Energy (DOE, 2015) tomando como ciudad de referencia Lindbergh Field San Diego, California por tratarse de la ciudad más próxima a la de estudio con las condiciones climatológicas similares a la ciudad de Tijuana. El cálculo de las cargas de refrigeración y calefacción se realizó conforme a los establecido en la norma UNE EN 12831:2003. Empleando el Software informático CYPECAD MEP de la empresa CYPE Ingenieros, S.A., Versión After Hours (CYPE, 2013), destinada principalmente a estudiantes. Ofrece la posibilidad de exportar los datos introducidos a EnergyPlus™ (EnergyPlus, 2015), Software de libre distribución de simulación dinámica que permitirá hacer los estudios de demanda y consumo energético.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se procede a realizar una estimación de las cargas de refrigeración y calefacción del edificio. Los resultados de consumo mensual obtenidos para los casos de estudio se muestran en la Tabla 2. Como podemos ver en la Tabla 1, la potencia por superficie de refrigeración y calefacción es de 119W/m^2 y 71.4W/m^2 respectivamente y una potencia total de refrigeración y calefacción de 232.0608kW y 139.2278kW respectivamente.

	Potencia por superficie (W/m^2)		**Potencia total (kW)**		**Toneladas de refrigeración.**	
	Refrigeración.	Calefacción.	Refrigeración.	Calefacción.	Refrigeración.	Calefacción.
Edificio B	119	71.4	232.0608	139.2278	65.9853	39.5887

Tabla 1. Cargas de refrigeración y calefacción.

		Consumo mensual (kWh/m^2)												
	Superficie (m^2)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Refrigeración	1974.87	9.93	11.09	15.42	17.95	24.73	31.21	48.78	53.96	52.86	32.25	19.43	14.31	331.90
Calefacción	1974.87	1.14	0.18	0.05	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.63	2.04

Tabla 2. Consumo mensual por refrigeración y calefacción.

CONCLUSIÓN

Este trabajo nos permitió analizar el comportamiento térmico del edificio B en la UABC en la ciudad de Tijuana, Baja California, que pertenece a una zona de clima cálido en México, utilizando los datos climatológicos de Lindbergh Field San Diego, California por sus características similares a nuestra ciudad de estudio. El análisis se realizó con el fin de evaluar las cargas de refrigeración (figura 9) y calefacción (figura 10) para el periodo de verano e invierno de dicho edificio, utilizando un solo escenario de sistema constructivo.

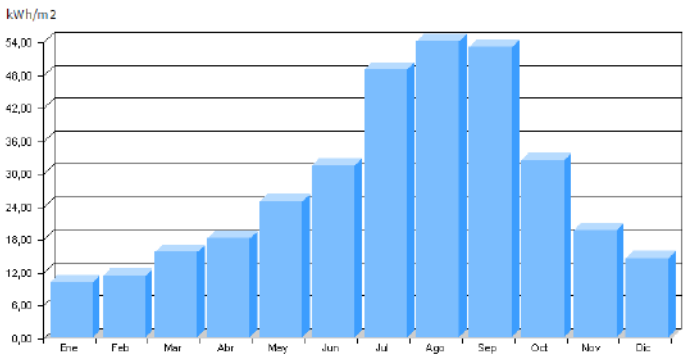


Figure 9. Demanda de refrigeración.

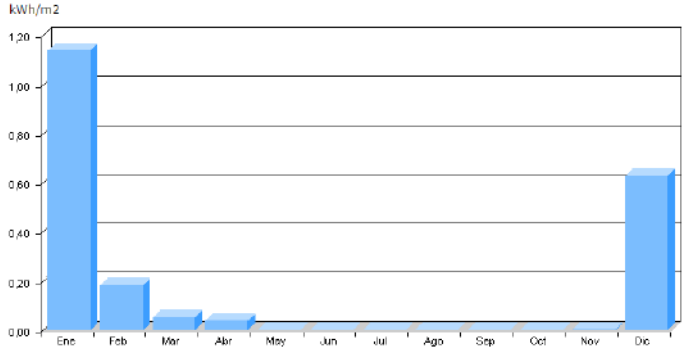


Figure 10. Demanda de calefacción.

El cálculo de las cargas de climatización fue realizado en el software CYPECAD MEP y EnergyPlus, los resultados obtenidos se utilizarán para iniciar los trabajos pertinentes que den como resultado un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) en centros docentes de la ECITEC, dando prioridad al confort de estas instalaciones que requieren un ambiente con condiciones óptimas para la concentración y estimulación del aprendizaje vitales en la comunidad estudiantil, ya que en ausencia de estas puede llegar a afectar a su desarrollo intelectual, así mismo, fomentar el uso adecuado de los recursos energéticos y económicos de la comunidad universitaria.

REFERENCIAS

A. Ioannou, L.C.M. Itard. *Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy*. Energy and Buildings 92. 2015. Pag 216-233.

Agis M. Papadopoulos, Simos Oxizidis, Luciano Papathanasiou. *Developing a new library of materials and structural elements for the simulative evaluation of buildings' energy performance*. Building and Environment 43. 2008. Pag 710-719.

Carlos Pérez T., Marcos De Armas T., Héctor Campbell R., Moisés Galindo D., M.G. Amado Moreno. *Consumo eléctrico y capacidad de enfriamiento residencial empleando técnicas de inteligencia artificial*. V conferencia internacional de energía renovable, ahorro de energía y educación energética CIER. 2007.

CELE. *Evaluación de la Calidad en Espacios Educativos*. Centre for Effective Learning Environments (CELE). Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2009.

Daniel Solís. *Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado.* Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto. Volumen III. Número 3. 2010. Pag 31-57.

Juan A. de Isabel, Mario García Galludo, Carlos Egido Ramos. *Guía de auditorías energéticas en centros docentes*. Consejería de economía y hacienda. Comunidad de Madrid. Madrid, España. 2010.

http://www.conuee.gob.mx/pdfs/ManualGestionEnergia_V2_1.pdf. Manual para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía 2014. Conuee - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

http://www.bajacalifornia.gob.mx/2doInformeBC/. 2do. Informe de Gobierno. LIC. FRANCISCO ARTURO VEGA DE LAMADRID. Gobernador Constitucional del Estado de Baja California.

http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/. *CTE. Código Técnico de la Edificación de España*. 2015.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=4_north_and_central_america_wmo_region_4/country=1_usa/cname=USA. *Weather Data Sources - U.S. Department of Energy (DOE)*. 2015.

http://descargas.cype.es/. *CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)*. 2013.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/. *EnergyPlus Energy Simulation Software.* 2015.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CORRELACION ENTRE NIVELES DE INSATISFACCIÓN TÉRMICA EN ESPACIOS Y COMPORTAMIENTOS TÉRMICOS DE MATERIALES EMPLEADOS EN LA VIVIENDA

Inocente Bojórquez, Osbet Aguayo
Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Blvd. Bahía s/n Esq. I. Comonfort, Col. del Bosque, Chetumal, Q. Roo, CP 77019
Tel: (983) 83 503 00 Ext 231
Fax: (983) 83 503 28
Correo electrónico: bojor@uqroo.edu.mx

RESUMEN
La valoración de la eficiencia térmica de materiales y de sistemas constructivos puede no ser completa si no se considera el nivel de satisfacción térmico del espacio estudiado. En este trabajo se muestran los resultados analíticos sobre la influencia de los comportamientos térmicos de sistemas de la envolvente, en régimen dinámico, y los niveles de sensación térmica y de insatisfacción térmica en espacios interiores, con el propósito de formular recomendaciones para el diseño de viviendas energéticamente eficientes, de acuerdo a las condiciones climatológicas del lugar. Para el primer criterio se realizaron mediciones *in situ*, de las temperaturas internas y externas mediante higrotermómetros digitales. Para el segundo, se basó en la norma ISO 7730:2005 y la metodología de Fanger; para el Índice de Valoración Medio (IMV) se consideraron las Características del vestido, de Trabajo y las del Ambiente, con estas variables y el factor de corrección por humedad se obtuvo el nivel de predicción de disconfort o insatisfacción térmica, resultado que fue comparado con lo expresado por voluntarios- Por último, mediante la dinámica de fluidos computacionales (CFD) se pudo visualizar el comportamiento del flujo térmico. Esto permitió experimentar teóricamente con diferentes valores de hipotéticas temperaturas superficiales debido a las capacidades de transferencia de calor de materiales convencionales y alternos.

Palabras claves: Sensación térmica; Insatisfacción térmica; Metodología de Fanger; Dinámica de fluidos computacionales.

ABSTRACT
Thermal efficiency assessment could be deficient in the inner space, if the thermal sensation level is not taken on account. This research is about the influence of thermal behaviors from constructive systems, on dynamic regime, and the levels of thermal sensation and thermal dissatisfaction on inner spaces, in order to recommend criteria to design low energy consumption housings under local climate conditions. For this purpose, they were made assessment, *in situ*, of internal and external temperature by a digital hygrothermometer. The thermal sensation and dissatisfaction was analyzed by Fanger´s methodology and the norm ISO 7730:2005. For the PMV and PPD indices were used the clothing characteristics, as well as the labor and environment characteristics. The Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to visualize the behavior of heat flow. This allowed to experiment theoretically with different values of surface temperatures from comun and alternatives materials.

Key words: Thermal sensation, Thermal dissatisfaction, Fanger´s methodology, Computational Fluid Dynamics

INTRODUCCIÓN
El análisis de la eficiencia energética de un espacio interior, como parte de la indagación para identificar los límites de temperatura que puede tolerar el ser humano para estar en condiciones térmicas favorables, es una tarea compleja que requiere del estudio de las interacciones entre las capacidades de transporte y de los fenómenos asociados a las variables termodinámicas de los materiales y de los sistemas, con las variables asociadas al intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente circundante, natural y construido; se incluye en éstas, las condiciones de esfuerzo físico, el nivel de adaptación a las condiciones del entorno y la vestimenta usada. A partir de estos requerimientos, se realizó una búsqueda de la metodología y de criterios enfocados a una

propuesta de diseño de un espacio térmicamente eficiente, entendiéndose como tal, aquel capaz de lograr las condiciones de comodidad a través de sistemas pasivos de climatización.

En su estudio sobre diseño bioclimático, Olgyay (2008) se refiere a la conveniencia de realizar una planifiación heliotérmica como parte de un acercamiento para comparar el comportamiento relativo de las distribuciones térmicas en la edificación. Szokolay por su parte, define que la zona de confort térmico (ZC) es la franja de 2.5 °C alrededor de la temperatura neutra obtenida a partir de la temperatura media del mes más cálido (Szokolay, 1980; citado en Rodríguez, *et al*, 2001). Mientras que Blasco, *et al.* (2007) sostienen lo implicado que resulta el análisis de las condiciones de confort, debido entre otras cosas, a las dificultades para la resolución de los modelos matemáticos que intervienen en el estudio del flujo turbulento.

Otros autores se enfocan a los procesos perceptivos como parte de la relación del hombre con el entorno, en especial para este caso, el relativo al catalogado como Nivel físico donde analizan el papel que los sentidos desarrollan en la percepción de las diferentes manifestaciones energéticas del ambiente circundante (Serra y Coch, 2001). Fanger (2001) por su parte, recomienda que los espacios deben ser confortables para todos los ocupantes, no deben incidir en afectaciones de la salud y sobre todo, estas condiciones deberán darse a través de un uso eficiente de la energía, aplicando los criterios de sustentabilidad; de alguna manera coincide con lo planteado por la Comisión Nacional de Vivienda, que cuando se refiere al uso eficiente de la energía en la vivienda, recomienda crear ambientes interiores sanos y cómodos para los usuarios además de conservar los recursos naturales (CONAVI, 2006).

Documentos normativos como la NMX-C-460-ONNCCE-2009 (ONNCCE, 2009), además de aquellos editados por la CONAVI, así como estudios y diversos trabajos de experimentación, se refieren a las propiedades térmicas de sistemas, materiales y formas arquitectónicas, que en concordancia con el manejo adecuado de los recursos naturales circundantes, buscan identificar los criterios para lograr ambientes interiores confortables mediante un mínimo consumo de energía; en este tenor, King (1994) realizó una propuesta para el diseños de espacios interiores confortables en armonía con la naturaleza; y Vélez (2007) sugiere que para determinar los niveles de confort dentro de un espacio arquitectónico es recomendable emplear la Carta psicrométrica de Baruch Givoni que muestra las estrategias de diseño para este cometido. A partir de un enfoque predictivo, Rincón (2014) realizó ensayos de laboratorio para determinar la temperatura neutra y los rangos de confort térmico.

Todos estos trabajos han sido significativos en el estudio del confort térmico de los espacios interiores; sin embargo, no ha sido fácil adaptar estas experiencias a las condiciones ambientales de un clima cálido húmedo (Aw) y a las características termofísicas de los materiales de la zona; por lo que en este trabajo se plantea identificar la correlación entre los márgenes de temperatura que puede soportar el ser humano para estar en condiciones de comodidad en un recinto cerrado a partir de las interrelaciones entre los comportamientos de las normales climatológicas del entorno y las capacidades termodinámicas de los sistemas constructivos del recinto.

Con esto se pretende aportar una metodología para el diseño de espacios interiores térmicamente equilibrados y de bajo consumo energético, basada en criterios predictivos, en la experimentación *in situ* y en el uso de modelos de simulación.

DESARROLLO

Como primer paso, se realizó un diseño conceptual de una edificación tipo cabaña, ubicada en un lote selvático a la orilla de un gran cuerpo de agua, de *4.00 x 4.00 m* de superficie, techo de *cuatro aguas* con altura de caballete central a *4.50 m;* la orientación se propuso en el eje SE-NO, debido a dos aspectos condicionantes: el primero, las vistas obligadas del entorno; y el segundo, la captación del flujo de aire; se planteó que el ingreso de éste al interior se diera a través de la fachada SE mediante el sistema de ventanas y la puerta de acceso, mientras que la salida tomaría en cuenta las ventanas ubicadas en el sentido opuesto simultáneamente con un sistema de cerramiento perimetral tipo “stack”; considerando la dirección del viento de 90° con respecto a la fachada SE, la relación del área de salida con respecto a la de entrada (As/Ae) fue de 1.17, en la Figura 1 se aprecia el resultado final de esta propuesta. En cuanto a la envolvente de la fachada SE se pensó que un 68% fuera a base de block hueco de concreto simple, recubierto con mortero cemento-polvo con textura rústica en el exterior, mientras que el resto lo conformaran las cancelerías de madera de caoba (*Swetania macrophyla*) y los cerramientos de madera dura de zapote (*Manilkara zapota*), este mismo material, de una pulgada de espesor, fue el recomendado para el techo cuya protección de los efectos de la intemperie sería mediante una capa de ferrocemento de *0.025 m* de espesor y un impermeabilizante local llamado calcreto.

Figura 1. Sistema de ventilación cruzada

Concluida esta fase del diseño arquitectónico, se pasó a la etapa de la visualización del comportamiento térmico del espacio, mediante el análisis del Índice de Valor Medio.

Índice de Valor Medio (PMV)

Después de las características físicas de los entornos naturales y contruidos, el siguiente acercamiento se inició con la obtenión del Índice de Valor Medio (Predicted Mean Vote) estudio predictivo sobre los niveles de incomodidad o insatisfacción térmica que podrían experimentar los usuarios de este espacio, expuestos al mismo ambiente no controlado y realizando el mismo *nivel de actividad*; el criterio para definir éste, sólo consideró el *consumo de energía*, por lo que el *consumo de oxígeno* y la *frecuencia cardíaca* no se tomaron en cuenta en esta investigación; dentro de los componentes del consumo energético, el *metabolismo de trabajo* fue el elemento rector a partir de dos factores: c*arga estática* (dormir) y *carga dinámica* (trabajo de escritorio durante cuatro horas). Los valores de la energía consumida en cada una de las actividades se tomaron de los citados por Chavarría (s/f)

Basado en el criterio de Fanger y de acuerdo a la norma (UNE-EN ISO 7730, 2006) se tomaron en cuenta además, las *características térmicas del vestido* referentes a un atuendo típico de verano (pantalón de mezclilla, camisa de algodón) con un valor de 0.5 clo, y las *características del ambiente* cuyos valores fueron obtenidos *in situ:* la velocidad relativa del aire, temperatura de bulbo seco (TBS) y humedad relativa (HR), para calcular el Índice de Valor Medio **(PMV**) mediante la Ecuación 1, valor que se consideró como primer acercamiento para predecir, mediante la gráfica de la figura 2 mencionada por Castejón (1983), si el ambiente propuesto podrá satisfacer las condiciones de comodidad térmicas pretendidas (PPD)

$$IMV = IMVc + FH\ (\Delta HR) \qquad (1)$$

Donde:

PMVc Índice de Valor Medio de acuerdo al nivel de actividad, las características del vestido y la velocidad relativa del aire

FH Factor de corrección por Humedad en función del nivel de actividad, las características del vestido y la velocidad relativa del aire

ΔHR Diferencia entre la HR del ambiente y la HR de 50% considerada en el modelo

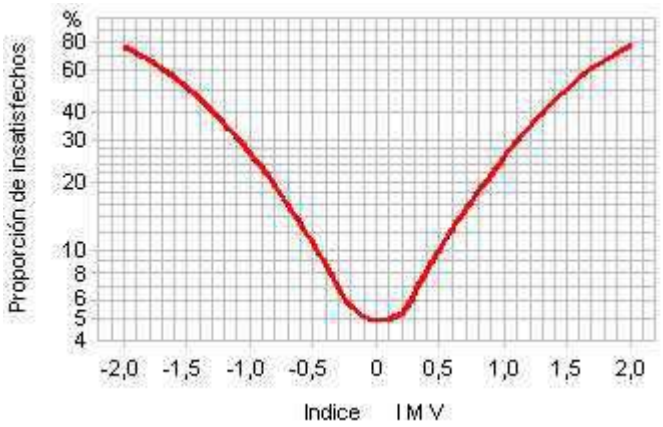


Figura 2. Proporción prevista de personas insatisfechas en función del IMV **(Fuente: P.O. Fanger)**

Predicción del Porcentaje de Insatisfacción (PPD).

Un segundo criterio para este mismo fin, fue el cálculo de ***Predicted Percentage Dissatisfied*** **(PPD)** mediante la la Ecuación 2.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2) \qquad (2)$$

Una vez construido el espacio, se investigó sobre el número de personas, que se sentirían insatisfechos debido a las condiciones térmicas del recinto, por lo que se aplicó una encuesta a tres personas adultas de sexo masculino durante seis fechas diferentes, bajo las condiciones descritas arriba; se tomaron muestras cada hora en ciclos de 24 horas, sumando un total de 432 lecturas; la escala numérica de sensaciones térmicas incluyó siete niveles: -3 (muy frío), -2 (frío), -1 (ligeramente frío), 0 (confortable), +1(ligeramente caluroso), +2 (caluroso) y +3 (muy caluroso). La información obtenida mediante este ejercicio fue comparada con los arrojados a través de los cálculos predictivos.

Simulación numérica mediante CFD.

La sensación térmica que experimenta el ser humano en un recinto cerrado, está estrechamente ligado al equilibrio térmico y éste a su vez, depende de varios factores como el metabolismo, el tipo de trabajo desarrollado, la temperatura radiante y la temperatura y velocidad del flujo de aire que normalmente tiende a ser turbulento, aunque existen zonas donde este flujo es lento, con posibles números de Reynolds por debajo del 2100, sobre todo en aquellos espacios donde la geometría es plana. Por lo general evaluar el comportamiento de este flujo en un espacio cerrado es complejo, no todos los modelos matemáticos empleados para esto concuerdan; por consiguiente, una de las estrategias más recomendables es el empleo de programas de computadora que simulen de una manera más efectiva los diferentes intercambios de energía.

En este trabajo, se empleó el programa de computadora ANSYS-FLUENT que mediante la dinámica de fluidos computacionales (CFD) permitió visualizar el comportamiento del flujo mediante la resolución de las ecuaciones de movimiento. El proceso incluyó tres pasos: 1. *Design Modeler*, que ayudó a realizar el modelo en 3D, como se aprecia en la figura 3; 2. *Mesher*, se trata de un mallado para dividir el volumen en micro elementos equiespaciados; en cada elemento se calcularon la temperatura, la energía cinética turbulenta y la velocidad del aire; y 3. *Fluent*, aquí se realizó la configuración del volumen de control, las condiciones de frontera y los modelos necesarios para el análisis. La figura 4, es el resultado de estos cálculos y configuraciones.

Los sistemas empleados en la evolvente fueron todos homogéneos, de tres capas cada uno, como se explica líneas arriba; para una visualización más eficiente de los sistemas, se realizó el modelo en 3D de la figura 3, mediante el *Design Modeler* que es uno de los componentes del programa.

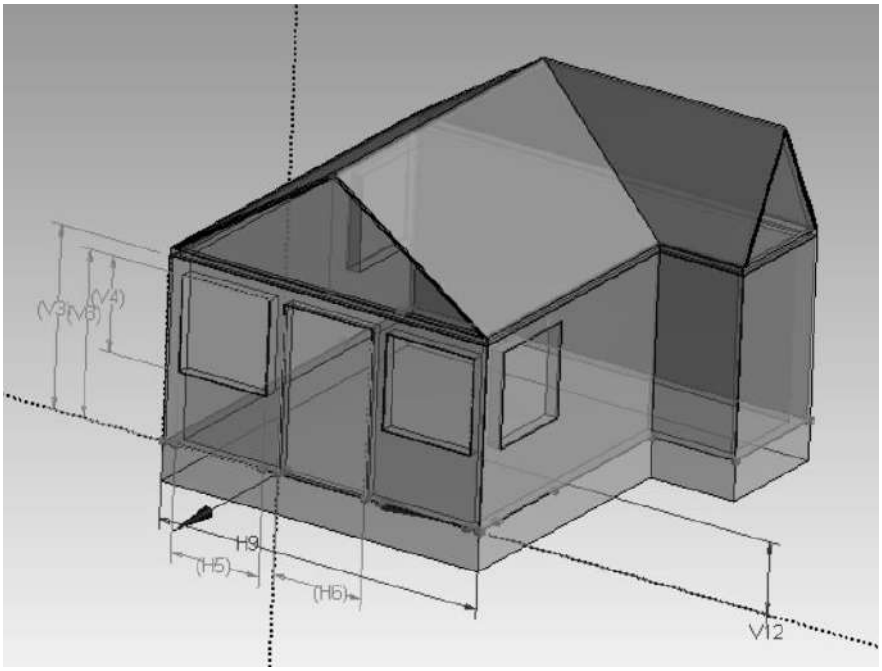


Figura 3. Elementos de la envolvente **(Fuente: O. Aguayo)**

Las propiedades térmicas de las maderas en el techo y en las cancelerías, y las de los materiales empleados como recubrimientos de muros y como impermeabilizantes en la azotea fueron los estudiados por Bojórquez y Castillo (2010) y Bojórquez y Castillo (2012) respectivamente.

Para el análisis de comportamiento de termo-fluidos, el programa ANSYS-FLUENT emplea los modelos de energía (conducción-convección), de radiación y de turbulencia (Aguayo, 2016); en este trabajo sólo se explica este último debido a lo extenso de la temática. El modelo de cierre *k-ε,* donde *k* es la energía cinética de turbulencia y *ε* la disipación viscosa, ha sido utilizado con éxito en flujos con turbulencia; dentro de las variantes está el RNG *k-ε* (Renormalization Group) que es efectivo para números de Reynolds bajos y altos. Las ecuaciones de transporte para este modelo están determinadas por la ecuación 3, referente a la energía cinética de turbulencia *k* y por la ecuación 4, la razón de disipación viscosa de energía cinética de turbulencia ε.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

Donde:

ρ= Densidad.

k= Turbulencia de energía cinética.

u_i=Componente de velocidad.

μ_{eff}=Viscosidad efectiva.

α_k =Inverso del número de Prandtl para k.

α_ε=Inverso del número de Prandtl para ε.

G_k=Turbulencia de energía a través de gradientes de velocidad.

G_b=Turbulencia de energía a través de efectos de flotación.

Y_M=Fluctuación de dilatación de la turbulencia.

S_k=término fuente definido por el usuario.

S_ε= término fuente definido por el usuario.

ε= razón de cambio de la energía cinética de turbulencia.

R_ε = término adicional[1]
$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{1\varepsilon}$ = Constantes delimitadas por el modelo.

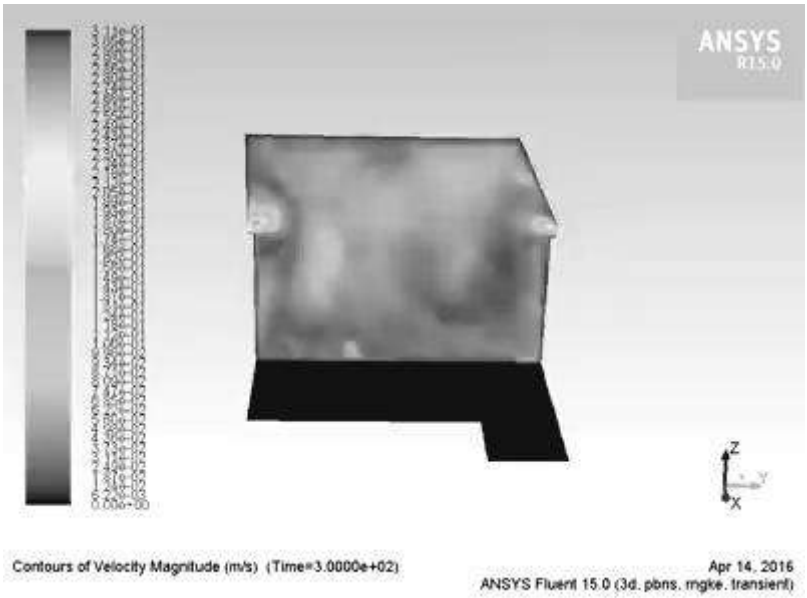


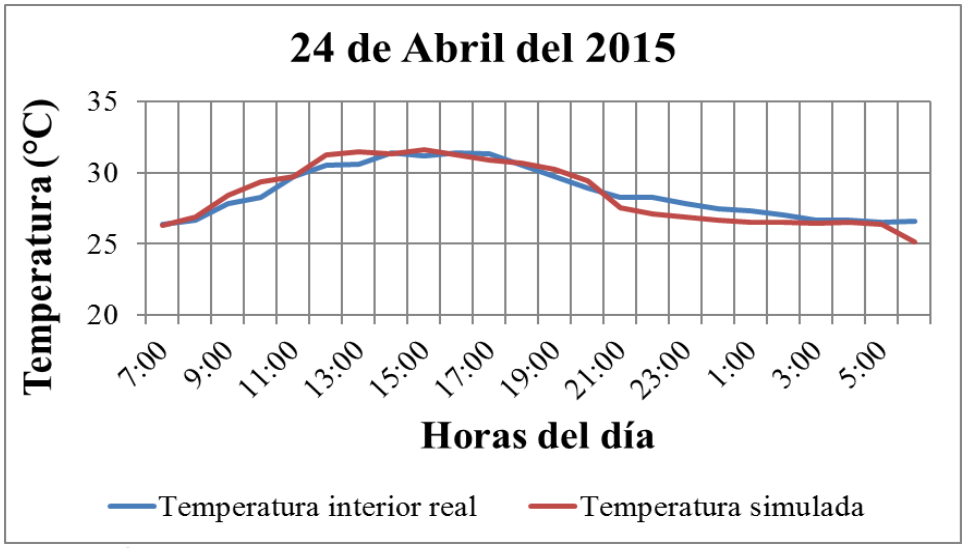
Figura 4. Corte transversal. Visualización de comportamiento de temperatura en tiempo**. (Fuente: O. Aguayo)**

RESULTADOS

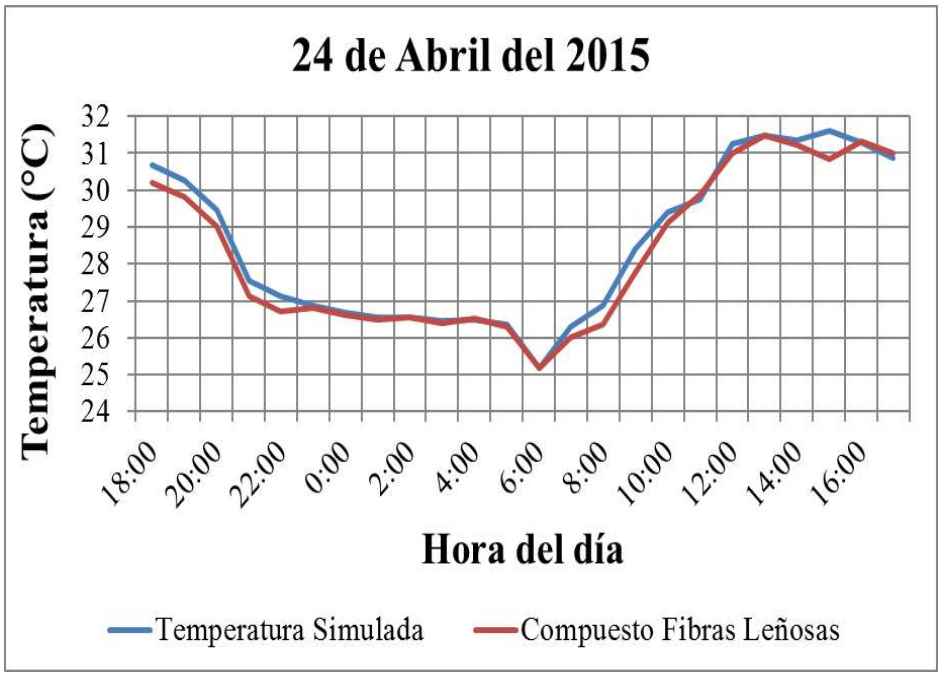
Para definir el nivel de actividad, sólo se consideró el Método de Consumo de Energía, y dentro de éste el Metabolismo de Trabajo, a partir de las dos actividades a desarrollar dentro del recinto: reposo y trabajo de gabinete mediante el uso de una computadora portátil; las posturas para la primera, consideradas dentro de la carga estática fueron: *tumbado* y *sentado* (normal y curvado); la de la segunda, comprendida dentro de la carga dinámica tomó el trabajo ligero de manos; estos criterios sumaron un total de 68 Kcal/h. Con este resultado y las características del vestuario, la temperatura y a velocidad del viento, pudo obtenerse el IMV y tomando en cuenta el Factor de Corrección por la Humedad (FH) pudo calcularse el IMV corregido. Este índice fue importante para el cálculo del PPD (Predicción del Porcentaje de Insatisfechos) a través de dos criterios: De manera gráfica y a través de la aplicación de un modelo matemático. Ambos mostraron comportamientos diferentes en la mayoría de los casos; sin embargo, el gráfico tendió a asemejarse con los resultados de la encuesta aplicada, durante fechas diferentes, dentro del espacio construido.

La simulación se realizó para tres meses diferentes: abril, septiembre y noviembre, en cada una de ellas se tomaron en cuenta tres diferentes materiales para el repellado de muros: mortero cemento-polvo, compuesto a base de matriz de cemento y refuerzo de fibra de *Swetania macrophyla* (caoba) y compuesto a base de matriz de cemento y refuerzo de fibra de *Lagenaria siceraria* (jícara). Las gráficas 1 y 2 muestran los comportamientos de las temperaturas medidas y las temperaturas calculadas a través de la simulación en recintos con recubrimiento en muros a base de dos materiales: mortero cemento-polvo (C-P) y compuesto de origen orgánico a base de fibras de caoba.

[1] Para mayor detalle del término adicional consultar Ansys Help Viewer, Theory Guide, en la sección turbulencia 4.3.2.6.



Gráfica 1. Condiciones térmicas en el recinto usando recubrimiento en muros a base de mortero C-P **(Fuente: O.Aguayo)**



Gráfica 2. Condiciones térmicas en el recinto usando recubrimiento en muros a base de compuesto de origen orgánico **(Fuente: O.Aguayo)**

CONCLUSIONES

El análisis predictivo es una herramienta útil para visualizar el posible comportamiento térmico de los espacios y su influencia en la sensación de comodidad de sus ocupantes bajo las condiciones de diseño; brinda también la oportunidad de experimentar teóricamente bajo condiciones diferentes tanto con propiedades térmicas de materiales como con niveles de actividad, lo que aumenta los criterios para el diseño de espacios térmicamente equilibrados o de bajo consumo de energía.

La aplicación de la encuesta sobre insatisfacción de confort en el recinto, reforzó el método propuesto por O.Fanger para este tipo de evaluación.

Mediante el uso de programas que simulan con gran efectividad el comportamiento de los flujos dentro de un espacio, se soluciona en gran medida, la complejidad en la resolución de ecuaciones empleadas en el análisis de flujos turbulentos.

La simulación mediante ANSYS-FLUENT, en este caso, demostró su efectividad con respecto al modelo real, el margen de error fue de 1.3 % en promedio.

Mediante la simulación se pudo demostrar que los compuestos de origen orgánico son un factor importante para el amortiguamiento térmico de los sistemas constructivos.

El ejercicio aquí desarrollado definió una metodología basada en tres pasos para el diseño de recintos térmicamente eficientes y de bajo consumo energético: 1. Análisis predictivo de las condiciones de confort durante el proceso del diseño conceptual; 2. Aplicación de una encuesta para medir los niveles de insatisfacción del espacio construido, de acuerdo a los niveles de actividad de los usuarios; 3. Simulación, mediante la dinámica de fluidos computacionales (CFD).

Es necesario incidir en los Reglamentos de Construcción para la inclusión de criterios planteados en el párrafo anterior, como parte de los compromisos de México en la COP16 de 2010.

AGRADECIMIENTOS
Los autores agradecen las facilidades y enseñanzas del Dr. Víctor Romero, profesor-investigador de la Universidad del Caribe.

REFERENCIAS

Blasco Laffón B., B. L. (2007). Cálculo de índices de confort térmico en recintos cerrados con transferencia de calor. *I JORNADA NACIONAL EN INVESTIGACIÓN EN EDIFICACIÓN.* MADRID: E. U. ARQUITECTUTA TÉCNICA. U.P.M. .

Bojórquez, I., & Castillo, S. (2010). Propiedades térmicas de maderas tropicales utilizadas en la vivienda. *XXXIV Semana Nacional de Energía Solar* (págs. 42-49). Guanajuato: ANES.

Bojórquez, I., & Castillo, S. (2012). Propiedades térmicas o calentamiento global: dos criterios, una problemática. *XXXVI Semana Nacional de Energía Solar* (págs. 132-139). Cuernavaca: ANES.

Castejón, E. (s/f). *NTP 74: Confort térmico: Método de Fanger para su evaluación.* Barcelona: Centro de Investigación y Asistencia Técnica.

Chavarría, R. (s/f). *NTP 177: La carga física del trabajo: definición y evaluación.* Barcelona: Centro Nacional de Condiciones de Trabajo.

CONAVI. (12 de Diciembre de 2006). *Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda.* Obtenido de Comisión Nacional de Vivienda: http://www.conavi.org.mx

Fanger, P. (2001). Human requirements in future air-conditioned environments. *International Journal of Refrigeration*, 148-153.

King, D. (1994). *Acondicionamiento Bioclimático.* México: Universidad Autónona Metropolitana-Xochimilco.

Olgyay, V. (2008). *Arquitectura y Clima. Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas.* Barcelona: Gustavo Gili.

ONNCCE. (16 de Junio de 2009). NORMA MEXICANA. *NMX-C-460-ONNCCE-2009.* MEXICO, D.F., MÉXICO: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Rincón, J. (2014). Estimación de Confort Térmico a partir del Enfoque Predictivo: Estudio Experimental. *XXXVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR* (págs. 133-135). Querétaro: ANES.

Serra, R., & Coch, E. (2001). *Arquitectura y energía natural.* Barcelona: UPC.

UNE-EN ISO, 7. (2006). *Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.* ISO 7730.

Vélez, R. (2007). *La ecología en el diseño arquitectónico.* México: Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CASETA DE PLATAFORMA DE PRUEBAS SOLARES

Brenda I. Ávila-Lira
Arquitectura, Instituto Tecnológico de Durango, Felipe Pescador 1830 Ote., Durango, Durango, 34080, México,
+52 (618) 829 0900, **11040034@itdurango.edu.mx.**

Norma A. Rodríguez-Muñoz
Cátedras CONACYT en Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Insurgentes Sur 1582, Ciudad de México, 03940, México,
+52 (618) 8110774, **norma.rodriguez@cimav.edu.mx**.

Ignacio R. Martín-Domínguez
Unidad Durango, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Victoria 147, Durango, Durango, 34000, México,
+52 (618) 8110774, **ignacio.martin@cimav.edu.mx**.

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento térmico del edificio de laboratorios de las plataformas de pruebas solares a construirse en el Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV-Durango). En la planeación de las instalaciones se contempló la construcción de plataformas de pruebas para dispositivos solares. Cada plataforma de pruebas cuenta con un edificio de tres plantas, el cual por su localización y orientación se prevé que tendrá ganancias de calor importantes. En este trabajo se muestra la evaluación del comportamiento térmico y consumo energético del edificio, el cual comprende tres plantas y un hangar de armado de prototipos, mediante el uso de un software de simulaciones dinámicas. Para el cálculo se utilizaron las condiciones climáticas de la localidad de El Pueblito en el estado de Durango. La edificación se evaluó en un año típico con combinaciones de diversos sistemas constructivos enfocados a la disminución del consumo de energía por climatización. Se delimitaron las zonas térmicas, se establecieron las temperaturas de operación del sistema de climatización, rango de confort deseado, así como los horarios de ocupación del inmueble. Como resultados se obtuvieron las temperaturas horarias y la demanda energética anual incurrida por concepto de calefacción y refrigeración.

ABSTRACT

The thermal behavior of a laboratory building at Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV-Durango) was investigated. The construction of solar testing platforms intended for solar device experimentation are planned and are to be built on the Durango campus of CIMAV. Each solar test platform comprises a three storey building and a prototype mounting shed; which due its position and orientation will have important heat gains. For the simulation, the climatic conditions of El Pueblito in the state of Durango were used. In this work, the evaluation of the thermal behavior and energy consumption of the building by means of dynamic simulation is presented. The building was evaluated through a typical year with a combination of several building systems and materials; the study focused on the decrease of the energy consumption due the use of heating and cooling systems. Thermal zones, operative temperatures of the conditioning systems, comfort range and occupation schedules were set. The results show the hourly mean temperatures and the energy demand needed to remain within the comfort range.

Palabras claves: consumo energético, climatización, edificación, simulación dinámica, transferencia de calor, TRNSYS.

INTRODUCCIÓN

El mejorar la eficiencia energética de los sistemas y edificaciones es una meta que muchos gobiernos comparten alrededor del mundo. Existen beneficios que incentivan el uso eficiente de la energía, tales como reducción de inversión en infraestructura, disminución de la dependencia de combustibles fósiles y aumento de la competitividad. Un reporte de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2008), menciona que después de analizar los indicadores mundiales del consumo de energía, la tasa de mejoramiento de la eficiencia energética no es suficiente para superar otros factores que acrecientan el consumo de energía. Como resultado, se avanza hacia un futuro energético poco sustentable, por lo que se debe trabajar en desacoplar el uso de energía y la generación de emisiones de CO_2 para la continuidad del crecimiento económico. La IEA presentó una lista de recomendaciones para mejorar la eficiencia energética en edificaciones, electrodomésticos, iluminación, transporte, industria, etc., por lo que se evidencia que una de las vías para la disminución de emisiones de CO_2 y por consecuente el cambio climático, es la implementación de tareas que lleven a la disminución del uso de energía.

Las edificaciones utilizan recursos valiosos, tales como agua, materiales y energía; además de ser generadores de residuos y contaminación. La industria de la construcción junto con las tecnologías que ayudan a la operación de una edificación, ocupan un segundo lugar en el consumo de energía primaria, teniéndose variaciones del 26 al 39% del consumo de energía dependiendo del país evaluado (Dimitrov, 2016).

La envolvente de una edificación es una parte importante en el diseño arquitectónico. Una de las funciones de la envolvente que es importante resaltar es su función con respecto al uso de energía, ya que ésta debe ser considerada como una parte de los sistemas energéticos de la edificación. Con el paso del tiempo, las ideas respecto a la función energética de la envolvente han evolucionado y las podemos resumir en dos etapas: 1) minimización del consumo energético disminuyendo la transferencia de calor a través de la envolvente manteniendo el confort interior y 2) alentar la incorporación de energías renovables a la matriz energética de la edificación. De acuerdo a lo anterior, no sólo se debe enfocar a crear edificios funcionales con toques estéticos sino que es de gran importancia la elección de los materiales para crear una envolvente térmica de alta calidad, brindándose confort a sus ocupantes; de lo contrario se generarían ganancias térmicas en verano y grandes pérdidas en invierno.

El consumo de energía en edificaciones por concepto de calefacción y refrigeración, puede llegar al 27% en construcciones comerciales y un 43% en las residenciales (U.S. Department of Energy, 2011). De forma breve, se puede mencionar que los factores que impactan en el consumo de energía en una edificación son el clima de la región, la orientación, la elección de materiales y sistemas constructivos, el área de acristalado y los sistemas de climatización artificial seleccionados. Por lo que es necesario realizar análisis cuidadoso de la selección de materiales para la envolvente de la edificación desde el momento de su planeación.

La evaluación del comportamiento térmico de una edificación permite obtener un diagnóstico del uso de energía para posteriormente analizar los resultados y proponer mejoras en el diseño o la elección de materiales y sistemas constructivos que contribuyan a reducir el consumo de energía. El diagnóstico se puede realizar tomando en cuenta las características de la envolvente térmica como la forma y propiedades de los materiales, aunado a la consideración del clima de la región, ubicación y orientación del edificio. Actualmente, existe una gran cantidad de software de simulación energética de edificaciones; herramientas que han sido ampliamente estudiadas, validadas y que pueden aportar resultados confiables. El analizar una edificación de forma dinámica, es decir considerando el paso del tiempo, hace posible probar gran cantidad de arreglos de sistemas constructivos, de forma tan detallada como se desee. Crawley y colaboradores (Crawley, 2008) elaboraron una comparación de las características de los 20 principales programas de simulación energética en edificaciones, entre ellos programas como: DOE-2.1E, ECOTECT, EnergyPlus y TRNSYS, concluyendo que aunque existen diferencias marcadas en los alcances de cada herramienta se alienta a que cada usuario encuentre la herramienta que se ajuste a sus requerimientos específicos.

Objetivo de este estudio es el de evaluar el comportamiento térmico, así como calcular la demanda energética del edificio *caseta* de las plataformas de pruebas solares. Se calculó la demanda energética anual correspondiente al uso de sistemas de climatización (refrigeración y calefacción). Este es el primer paso para posteriormente proponer una combinación de materiales para el establecimiento de los sistemas constructivos y de ser necesario una modificación en el diseño de la edificación.

MODELO FÍSICO Y UBICACIÓN

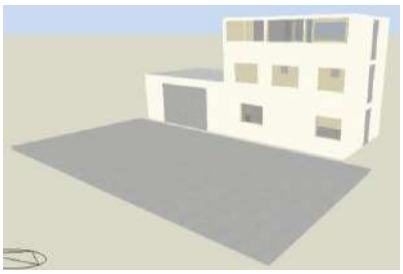
La caseta corresponde a un edificio de 399 m^2 de construcción, 133 m^2 por planta y un total de 219 m^2 sin incluir el hangar de armado de prototipos. En este primer estudio se analiza el comportamiento térmico de la envolvente del edificio para posteriormente calcular la demanda energética anual por concepto de climatización artificial. En la Figura 1a se observa la caseta en 3D, mientras que en las Figura 1a, 1b y 1c, se muestra la distribución de las zonas térmicas de cada planta del edificio de caseta. Las zonas térmicas comprenden las siguientes regiones, primera planta: monitoreo, almacén, sanitarios y hangar; segunda planta: laboratorio y tercera planta: oficinas y centro de cómputo. Las zonas de sanitarios (WC) y hangar, no se incluyen en el cálculo de demanda energética. Cada edificio de caseta va acompañado de una plataforma de pruebas solares, donde se realizarán experimentos en exteriores. En el edificio caseta se realizarán actividades desde la conceptualización, construcción y monitoreo de uno o varios sistemas experimentales, por lo que se hará uso de las instalaciones de tiempo completo. El horario de ocupación se estableció de forma corrida desde las 07:00 hasta las 19:00 horas de lunes a viernes, sin tomar en cuenta días festivos ni vacaciones.

La ubicación del edificio es en la localidad de El Pueblito en Municipio de Durango, localizado en la región centro sur del Estado de Durango, con coordenadas geográficas extremas: al norte 242º 26'; al sur 232º 29', al este 104º 06' y al oeste 105º 34'. El clima del Municipio de Durango está determinado principalmente por la altitud y el relieve, afectando la temperatura y la precipitación. El clima corresponde a una región dentro de la clasificación BS de acuerdo al catálogo de Köppen (Rohli y Vega, 2015). De esta manera, el municipio de Durango, queda influenciado por los factores externos del clima semiseco templado con lluvias en verano con temperaturas fluctuantes de 16 a 18 °C y precipitaciones de 500 milímetros con lluvias, con una mezcla de vegetación tipo desértica con predominación de bosques templados.

METODOLOGÍA

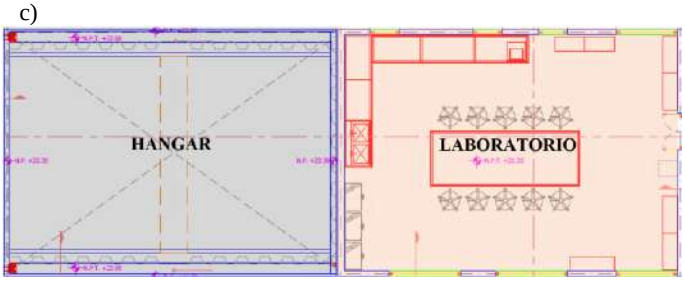
Se realizaron una primera serie de 32 corridas, realizando las posibles combinaciones entre cuatro sistemas de muro, dos tipos de cubierta y cuatro de ventana. En la Tabla 1, 2 y 3, se muestra la combinación de los sistemas constructivos analizados, las propiedades de las aberturas (ventanas y puertas) y de los sistemas constructivos respectivamente. La simulación se realizó de forma horaria durante un año típico mediante el programa Design Builder que utiliza como motor de cálculo a Energy Plus. Parámetros climáticos como: radiación solar, temperaturas horarias promedio, humedad y velocidad del viento fueron suministradas por el software Meteonorm, los cuales fueron generados cada 15 minutos e incorporados al software de simulación de forma horaria

a)



b)

c)



d)

Figura 1. a) Visualización de caseta en 3D, Cortes en planta con las zonas térmicas del edificio: b) Primera planta, c) Segunda planta y d) Tercera planta.

Tabla 1. Combinación de sistemas constructivos analizados.

Caso	Muro	Ventana	Cubierta		Caso	Muro	Ventana	Cubierta
1	Muro 1	Ventana 1	Cubierta 1		**17**	Muro 1	Ventana 1	Cubierta 2
2		Ventana 2			**18**		Ventana 2	
3		Ventana 3			**19**		Ventana 3	
4		Ventana 4			**20**		Ventana 4	
5	Muro 2	Ventana 1			**21**	Muro 2	Ventana 1	
6		Ventana 2			**22**		Ventana 2	
7		Ventana 3			**23**		Ventana 3	
8		Ventana 4			**24**		Ventana 4	
9	Muro 3	Ventana 1			**25**	Muro 3	Ventana 1	
10		Ventana 2			**26**		Ventana 2	
11		Ventana 3			**27**		Ventana 3	
12		Ventana 4			**28**		Ventana 4	
13	Muro 4	Ventana 1			**29**	Muro 4	Ventana 1	
14		Ventana 2			**30**		Ventana 2	
15		Ventana 3			**31**		Ventana 3	
16		Ventana 4			**32**		Ventana 4	

Tabla 2. Propiedades de las aberturas.

Nombre	Espesor	Conductividad térmica	SHGC	Valor U	Propiedades ópticas		
	(m)	k(W/m K)		(W/m^2K)	ε	α	ρ
Ventana 1 - Cristal claro sencillo	0.006	1.0	0.828	5.801	0.84	0.04	0.16
Ventana 2 - Cristal entintado sencillo	0.006	1.0	0.749	5.801	0.84	0.34	0.11
Ventana 3 - Cristal doble claro	Cristal (0.0060) Aire (0.013)	1.0	0.716	2.675	0.84	0.04	0.16
Ventana 4 - Cristal doble entintado	Cristal (0.0060) Aire (0.013)	1.0	0.616	2.675	0.84	0.34	0.11
Puerta de metal	Metal (0.0015) Aire (0.10)	50.0	-	3.124	0.30	0.30	0.70

Tabla 3. Propiedades de los sistemas constructivos.

Nombre	Material	Espesor	Conductividad térmica	Valor U	Propiedades ópticas		
		(m)	k(W/m K)	W/m^2K	ε	α	ρ
Muro-1	Mortero	0.025	0.70	2.390	0.90	0.60	0.40
	Bloque de concreto	0.13	1.11		-	-	-
	Yeso	0.013	0.40		0.90	0.50	0.50
Muro-2	Mortero	0.025	0.70	0.949	0.90	0.60	0.40
	Poliestireno	0.0254	0.04		-	-	-
	Bloque de concreto	0.20	1.11		-	-	-
	Yeso	0.013	0.40		0.90	0.50	0.50
Muro-3	Mortero	0.025	0.70	2.636	0.90	0.60	0.40
	Ladrillo	0.12	0.85		-	-	-
	Yeso	0.013	0.40		0.90	0.50	0.50
Muro-4	Mortero	0.025	0.70	1.122	0.90	0.60	0.40
	Poliestireno	0.0254	0.04		-	-	-
	Ladrillo	0.12	0.85		-	-	-
	Yeso	0.013	0.40		0.90	0.50	0.50
Muro interior	Yeso	0.013	0.40	1.175	0.90	0.50	0.50
	Bloque	0.13	0.19		-	-	-
	Yeso	0.013	0.40		0.90	0.50	0.50
Cubierta 1	Yeso	0.013	0.40	2.007	0.90	0.50	0.50
	Metal	0.01	45.28		-	-	-
	Concreto	0.10	1.40		-	-	-
	Impermeabilizante Terracota	0.0254	0.40		0.35	0.60	0.40
Cubierta 2	Yeso	0.013	0.40	0.881	0.90	0.50	0.50
	Metal	0.01	45.28		-	-	-
	Poliestireno	0.0254	0.04		-	-	-
	Concreto	0.10	1.40		-	-	-
	Impermeabilizante Terracota	0.0254	0.10		0.35	0.60	0.40

RESULTADOS

Se realizó un análisis del comportamiento térmico del diseño arquitectónico propuesto del edificio de caseta. Se obtuvieron resultados de la cantidad de energía necesaria para climatizar al edificio en un año de operación. Se analizaron 32 combinaciones de materiales (cuatro sistemas de muro, dos tipos de cubierta y cuatro de ventana), en la Figura 2 se grafican la demanda energética por refrigeración y calefacción de cada caseta y las temperaturas promedio horarias. El objetivo de realizar este análisis de materiales en la envolvente de la edificación es el de seleccionar los casos idóneos para la posterior implementación de otras estrategias o modificar el diseño arquitectónico inicial.

Análisis de demanda energética anual.

De la Figura 2a se puede observar que el caso con menor requerimiento de energía por refrigeración es el 20, 4989 kWh (muro 1, ventana 4 y cubierta 2), mientras que el caso que demanda menos energía para calefacción es el 23, 2458 kWh (muro 2, ventana 3 y cubierta 2). En ambos casos se observa que la cubierta 2, que es la que contiene aislamiento, incurriría en gastos menores por climatización. Sin embargo al considerar el consumo total anual, el caso 24 (muro 2, ventana 4, cubierta 2) es el que demandaría menor cantidad de energía: 7865 kWh, 5237 y 2638 kWh para refrigeración y calefacción, respectivamente. De la demanda energética total de este edificio, el 66.6% de la necesidad de climatización es por concepto de refrigerar, es decir disminuir la temperatura promedio de la caseta; por lo que es necesario enfocarse en esta temporada del año. Analizando el caso 8, que se encuentra constituido de igual forma que el 24, con excepción de la cubierta (sin aislamiento) observamos que consumiría un 10% más energía que el caso 24. Estos casos serán estudiados con mayor profundidad en un siguiente estudio de los autores. Cabe destacar que de análisis de edificaciones comerciales, oficinas y vivienda previamente estudiados, se obtuvo que para el clima actualmente analizado; la cubierta color terracota es la que se desempeña de mejor manera, teniendo consumo energético anual menor que si se considerara color blanco y/o blanco con propiedades reflectivas.

Por otro lado, los casos que tendrán peor comportamiento, con los mayores requerimientos de energía, son los casos 13 (muro 4, ventana 1 y cubierta 1) con un consumo de 7958 kWh) y 10 (muro 3, ventana 2 y cubierta 1) con un gasto de 5178 kWh por concepto de refrigeración y calefacción, respectivamente. El peor caso considerando el consumo total anual es el caso 13. Al comparar los casos con menor y mayor consumo energético anual, se obtiene que el caso 24, lograría un ahorro de hasta el 36%.

Análisis de temperaturas promedio.

En la Figura 2b, se grafican las temperaturas horarias del año analizado para los casos con el mayor y menor consumo energético anual, casos 13 y 24, respectivamente. Se observan el comportamiento horario de ambos casos sobre el comportamiento de la temperatura exterior, correspondiente a la del ambiente. De forma cualitativa se muestra que el caso 24 (muro de bloque aislado, ventanas entintadas dobles y cubierta color terracota con aislamiento) tiene mejor comportamiento que el caso 13 (muro de bloque aislado, ventana cristal sencillo y cubierta color terracota sin aislamiento) y como consecuencia menor consumo energético.

a)

b)

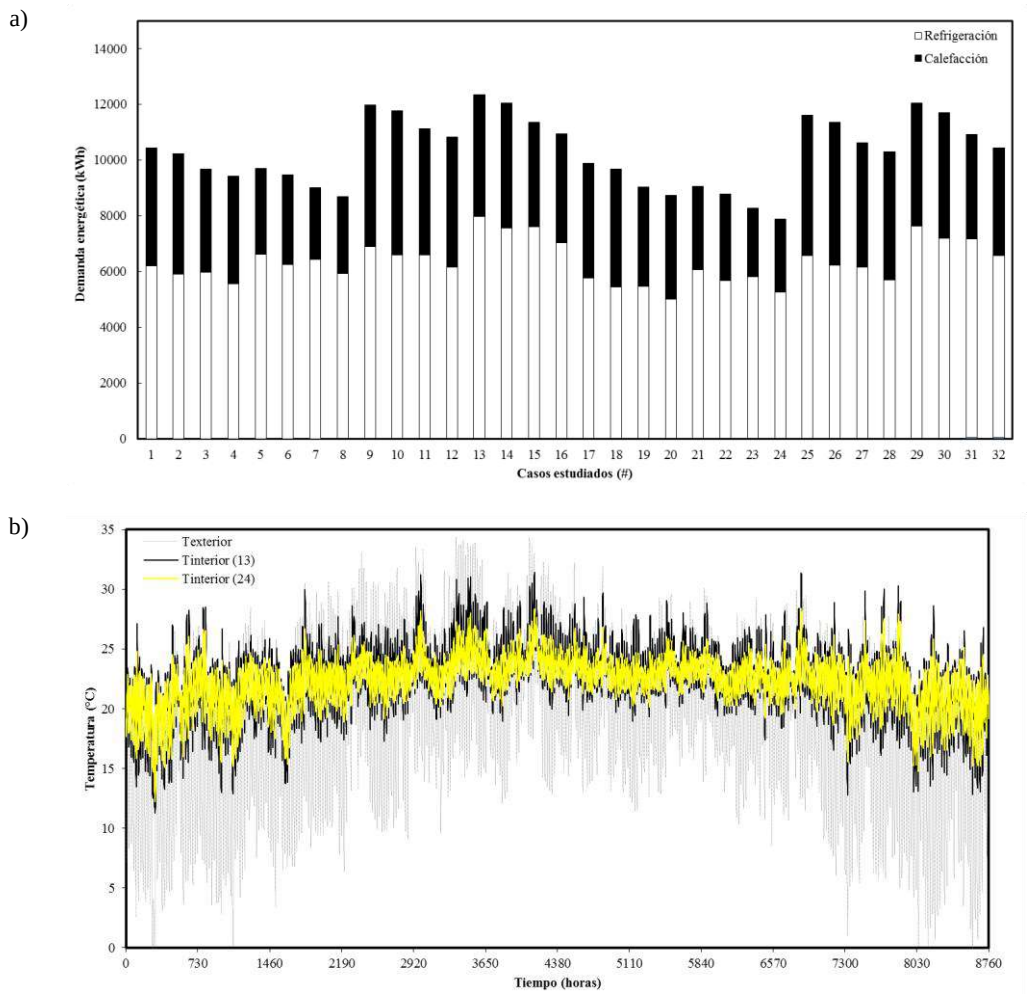


Figura 2. Resultados: a) Demanda energética anual por refrigeración y calefacción b) Temperaturas promedio.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis térmico del edificio *caseta*, el cual comprende de una edificación de tres plantas y una plataforma de pruebas. Mediante el uso del software de simulación dinámica TRNSYS se analizaron 32 combinaciones de materiales y sistemas constructivos a través de un año típico. Se cuantificó la demanda energética requerida por el uso de sistemas de calefacción y refrigeración de un año de operación del edificio.

Se logró reducir el consumo energético por refrigeración hasta en un 37.4% (caso 20) y de calefacción por un 52.5% (caso 23), comparando los casos que requieren menor y mayor energía. Estas disminuciones de consumo energético serían efectivas cuando se seleccione el sistema constructivo ideal para la reducción de consumo energético por refrigeración o por calefacción. Sin embargo, en este caso es necesario considerar que se pretende reducir al máximo la demanda energética anual, considerándose que se tiene que climatizar todo el año. Al realizarse el balance anual, el caso 24 es el que consumiría hasta un 36% menos energía por concepto de operación de ambos sistemas de climatización (refrigeración y calefacción). Este caso es el que se compone de muro aislado, cubierta color terracota aislada y ventana con doble cristal entintado.

Estas reducciones de consumo energético anual son estrictamente debido al análisis de los sistemas constructivos propuestos y no contempla la modificación del diseño arquitectónico, ni la incorporación de estrategias pasivas adecuadas a la climatología del lugar.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto: P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, para el desarrollo y presentación de éste trabajo. Asimismo agradecer al proyecto FOMIX - Durango: DGO-2014-01-229107: “Creación del Centro de Innovación y Competitividad en Energías Renovables y Medio Ambiente de Durango”.

REFERENCIAS

IEA, International Energy Agency. (2008). Worldwide trends in energy use and efficiency: Key insights from IEA indicator analysis. OECD/IEA Paris, France.

Dimitrov, A. V. (2016). Energy modeling and computations in the building envelope. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, USA.

U.S. Department of Energy. (2011). Buildings Energy Data Book. D&R International, Ltd., Maryland, USA. http://buildingsdatabook.eere.energy.gov/

Crawley, D.B. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, Building and Environment, Vol. 43, No. 4, p. 661-673.

Rohli R. y Vega A.J.. (2015). Climatology. Jones & Bartlet Learning.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DIAGNÓSTICO DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL DE LA CIUDAD DE DURANGO

Claudia K. Romero-Pérez, Ignacio R. Martín-Domínguez
Unidad Durango, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Victoria 147, Durango, 34000, México,
+52 (618) 8110774, claudia.romero@cimav.edu.mx, ignacio.martin@cimav.edu.mx

Norma A. Rodríguez-Muñoz
Cátedras CONACYT en Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Insurgentes Sur 1582, Ciudad de México, 03940, México,
+52 (618) 8110774, norma.rodriguez@cimav.edu.mx

RESUMEN
En México las viviendas de interés social tienen gran demanda de energía por el uso de climatización. Principalmente debido al pobre diseño de la vivienda y el uso de materiales de construcción con ineficiencia térmica. Desarrolladores locales han solicitado un análisis de desempeño térmico de la vivienda y de consumo de energía, donde el primer paso es realizar un diagnóstico de las condiciones de la vivienda de interés social en la ciudad de Durango, México y determinar el grado de confort de sus viviendas. En México existen diversos estudios que analizan el comportamiento térmico de la vivienda de interés social, estos se han concentrado en estudiar regiones del país con clima cálido y caliente, donde predominan condiciones para usar aire acondicionado. El clima en la ciudad de Durango se establece como BS por la clasificación Köppen, donde la temperatura ambiente mínima y máxima requiere el uso de algún sistema de enfriamiento y calefacción. En este trabajo, se presenta un análisis de clima del sitio, el desempeño térmico de una vivienda de interés social tipo económica y los niéveles de confort en cada una de sus zonas.

ABSTRACT
Social housing in México have high demand of energy because of the use of heating and cooling systems. Mainly poor design and the use of thermally inefficient construction materials. An analysis of the thermal behavior and energy consumption was demanded by local housing development chamber, and one of the first steps towards the accomplishment of this objective is to complete a diagnostic of the condition of social housing in the city of Durango in Mexico and their comfort levels. There are previous studies analyzing the thermal behavior of social housing in Mexico that have been focused on hot or warm regions of the country, where the air conditioning needs are predominant. The weather of the city of Durango is ranked as BS in the koppen classification, where the minimum and maximum ambient temperatures require the use of cooling and heating systems. A weather analysis, thermal behavior and comfort levels, currently utilized material and building systems together with the characteristics of the social housing is presented.

Palabras claves: vivienda de interés social, envolvente, desempeño térmico, confort.

INTRODUCCIÓN
Se sabe que la climatización de las viviendas representa grandes consumos de energía y emisiones de CO_2. En México, generalmente se diseña y construye vivienda de interés social subvalorando el clima y geografía del sitio de construcción. En consecuencia, la vivienda requiere el uso de climatización artificial (calefacción y refrigeración). La creciente demanda de la vivienda de interés social, anuncia una tendencia positiva en el consumo de energía. Diversos estudios realizados en materia del desempeño térmico de las viviendas de interés social exponen la urgencia y la necesidad de un profundo análisis térmico de los modelos actuales de vivienda (Ochoa et al. 2012). Se han realizado trabajos de investigación en diversas regiones de la república Mexicana, principalmente en climas que hacen necesario aire acondicionado. Sin embargo, se ha restado importancia a regiones que tienen necesidad de enfriar y calentar las viviendas, como es el caso de la ciudad de Victoria de Durango.

A la fecha existen diversas metodologías para realizar el estudio del estado actual de una vivienda en cuanto a su desempeño térmico, entre ellas la más destacada es mediante el uso de simulación dinámica. En este trabajo se realizó un análisis del sitio donde se ubica el caso de estudio, se recrea la geometría de la vivienda en el programa Sketch UP y por medio del paquete computacional TRNSYS (Transient System Simulation Tool) se realizara el estudio de desempeño térmico.

En el presente trabajo se presenta un análisis del confort térmico del diseño actual de la vivienda de interés social de la ciudad de Durango. Este estudio tiene como objetivo conocer el comportamiento térmico de la vivienda de interés social de la ciudad de Durango, con el fin de desarrollar un diagnóstico de partida para identificar si es necesario mejorar el confort en su interior. Los resultados obtenidos muestran que la vivienda presenta condiciones de disconfort durante un 60% de las horas de un año típico.

ANTECEDENTES

La acción global frente al cambio climático es impostergable, se requiere cambiar hábitos de consumo y producción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (SEMARNAT & INECC 2013). Para esto, una estrategia es reducir los consumos de energía a través del uso eficiente de la energía. Se sabe que las edificaciones consumen grandes cantidades de energía, principalmente las viviendas de interés social en México.

Existen diversos trabajos sobre el diagnóstico térmico de la vivienda de interés social. Éstos han estado enfocados a determinar la ganancia térmica con base en la simulación y el monitoreo, considerando las condiciones climáticas y el uso de materiales en la construcción. Sin embargo, el problema actual requiere más de un solo análisis térmico de una vivienda ya que en la nación existen diferentes tipos de climas. Los estudios realizados sólo muestran el comportamiento térmico en algunos de ellos, principalmente el cálido, los cuales no se pueden considerar como representativos para todas las condiciones del país (Andrade 2007).

Estudios realizados por (Lucero 2014) en 20 ciudades de nuestro país, muestran altos consumos de energía por climatización en vivienda de interés social. El envolvente de una vivienda es en sí una frontera física entre el espacio habitado de su interior y el medio ambiente exterior (Martín 2004). Desde el punto de vista térmico, la vivienda debería mantener el interior a temperaturas de confort durante todo el año. En algunas regiones geográficas las condiciones climáticas externas mismas no se alejan mucho de los valores considerados como de confort, por lo cual la vivienda no requiere de mucho esfuerzo en su diseño para cumplir con éste propósito. Sin embargo, en otras regiones del país las condiciones ambientales pueden alcanzar valores de temperatura los cuales provocan que las condiciones internas estarán alejadas de la zona de confort, originándose flujos de energía entre la vivienda y el medio ambiente.

Un análisis dinámico de la vivienda, es aquel que considera las características de la envolvente de la vivienda en interacción con su entorno de manera transitoria, es decir; a través del tiempo (ejemplo; cada hora durante un año global típico). El objetivo de estas simulaciones es el poder recrear las condiciones de la edificación lo más cercanas a la realidad.

Una evaluación del desempeño térmico de la edificación permite tener un diagnóstico del uso de energía, información útil para analizar los resultados y proponer mejoras en el diseño que reduzcan el consumo de energía. La evaluación se centra en las características de la envolvente térmica: su forma, propiedades físicas de los materiales, sistemas constructivos, etc. En un análisis dinámico todo esto, se conjuga con el clima y locación.

METODOLOGÍA

Se analizaron las características climáticas del sitio; se identifica el caso de estudio y sus componentes. Con ayuda de herramientas computacionales se recrean las condiciones climáticas de la región y la representación tridimensional de la edificación. Se establecen las características de la vivienda de interés social: forma, constitución y propiedades físicas de los materiales. El método de cálculo usado está basado en la aplicación directa de la ecuación de calor unidimensional en estado dinámico.

Análisis del sitio

Según el sistema modificado de Köppen y García, el clima del sitio tiene la siguiente descripción: seco extremoso, no es de tipo ganges, no hay canícula.

Grupo: Bs1 kw (e)

BS1	Clima templado seco, los menos secos del grupo.
k	Templado con verano cálido.
w	Régimen de lluvias en verano.
e	Extremoso, con oscilación térmica mayor a 14°C.

La ciudad analizada tiene temperaturas máximas normales de 25.5°C y mínimas normales de 2.8 °C. Lluvias en verano (principalmente en julio y agosto) y también lluvias escasas en invierno. La precipitación normal es de 542.2 mm. Los meses más secos corresponden a febrero, mayo y abril.

Ubicación del caso de estudio

La vivienda de interés social a analizar, se localiza en la ciudad de Victoria de Durango México, a una latitud de 24; longitud 104.6 y altitud de 1875m (Figura 1).

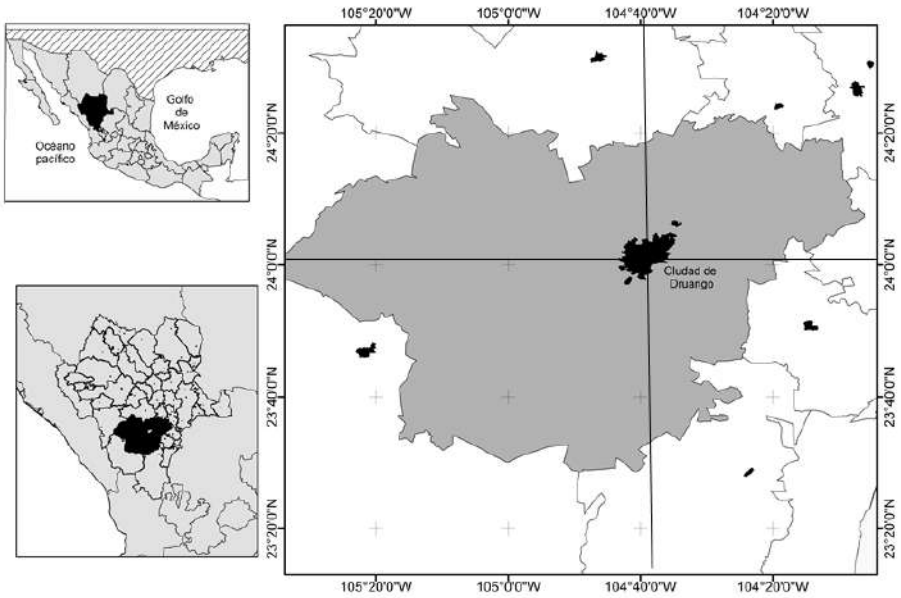


Figura 1. Ubicación geográfica de la localidad.

Diseño y simulación

Actualmente la simulación es una metodología que nos permite realizar cálculos tomando en cuenta un gran número de variables. Afortunadamente se han desarrollado poderosas herramientas para el estudio de balances de energía en edificaciones de manera transitoria. Estos programas cuentan con años de desarrollo, especializados en el campo y con gran confiabilidad (Crawley et al. 2006). Este trabajo es realizado con el software TRNSYS, ya que es de interés analizar el desempeño térmico de la vivienda de interés social que se construye en la ciudad de Durango, México. Éste es un programa modular que integra el clima de un año típico, las características físicas de la edificación y las propiedades físicas de los materiales que la constituyen.

Para realizar simulaciones de desempeño térmico se empleó el programa TRNSYS 17 y Google SketchUp 8 para el modelado arquitectónico de la geometría en 3D (Figura 2). Las condiciones climáticas se extraen de Meteonorm 7 en formato TMY.

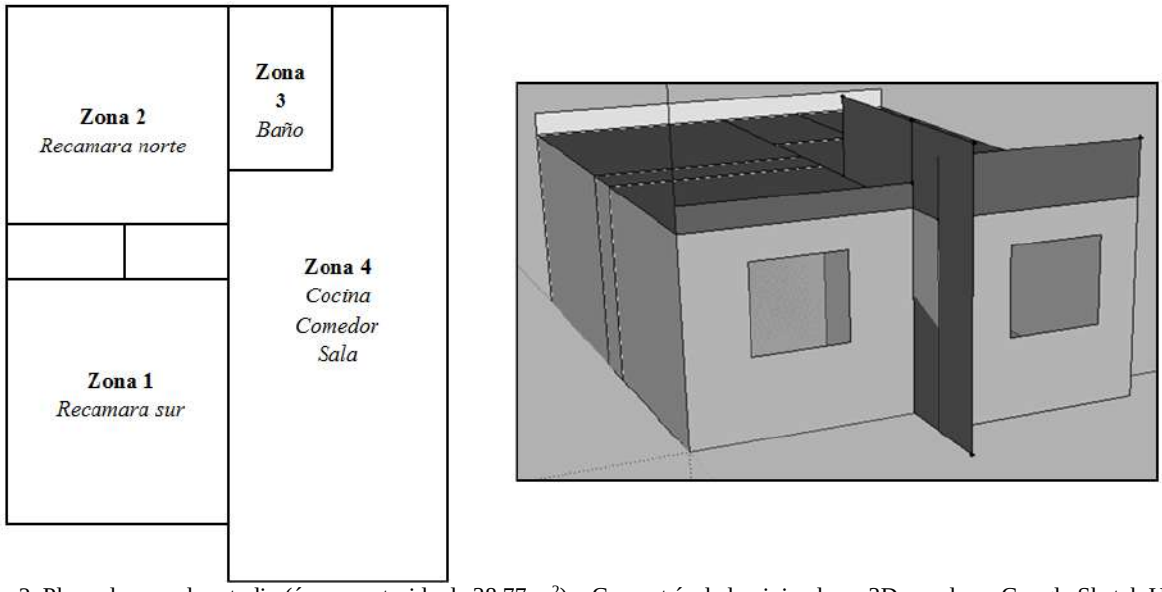


Figura 2. Plano de caso de estudio (área construida de 38.77 m^2) y Geometría de la vivienda en 3D creada en Google Sketch UP 8.

Descripción de la envolvente del caso del estudio

La vivienda tipo económica se compone de los materiales básicos de construcción típica de los desarrolladores locales, principalmente ladrillo en muros, techo de concreto, suelo de concreto y ventanas sencillas (Tabla 1). El diseño urbanístico-arquitectónico de la vivienda, utiliza el adosamiento de muros laterales. La fachada principal queda expuesta al exterior y el muro del patio exterior colinda con el patio de la vivienda trasera.

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales que componen la vivienda.

Tipo	Material	K (kJ/hmK)	Cp (kJ/kg K)	Espesor (m)	Densidad (kg/m^3)
Piso	Concreto armado	6.264	0.84	0.08	2300
Losa azotea	Lechada de mortero	3.1392	0.72	0.002	1860
	Ladrillo maceteado	2.7648	0.2	0.025	2000
	Mortero	2.5128	0.72	0.025	1860
	Tierra de azotea	0.342	0.44	0.075	1500
	Membrana asfáltica Termotek	0.612	1.26	0.002	1127
	Concreto armado	6.264	0.84	0.1	2300
	Yeso	1.3392	1.09	0.02	800
	Texturizado	0.5256	1.00	0.003	1760
Muro Exterior	Pintura	0.4572	1.00	0.001	1270
	Enjarre de mortero	2.9232	0.72	0.02	1860
	Tabique rojo recocido	3.1392	0.9	0.13	1920
	Yeso	1.3392	1.09	0.02	800
	Texturizado	0.5256	1.00	0.002	1760
Muro colindante	Texturizado	0.5256	1.00	0.002	1760
	Yeso	1.3392	1.09	0.02	800
	Tabique rojo recocido	3.1392	0.9	0.26	1920
Ventanas	Acristalamiento sencillo	3.24		0.003	2000

Consideraciones de la simulación

Se considera una vivienda aislada para la simulación, es decir sin viviendas colindantes. Una vez definida la geometría, se establecen los materiales y sus propiedades físicas. Es importante mencionar que la vivienda no cuenta con aislante en el suelo, por lo que es necesario activar un componente de TRNSYS para modelar la temperatura del suelo. Se establecen infiltraciones de aire de 0.98 1/h. Se estableció un horario de ocupación en la vivienda (Tabla 2), los ocupantes se contemplan con actividad normal de estancia laboral y escolar diurna. Como ganancias de calor internas se consideran 2 ocupantes realizando actividades ligeras y de descanso cambiando su vestimenta de acuerdo a la temporada estacional (Tabla 3 y Tabla 4). La vivienda es modelada bajo condiciones naturales sin uso de climatización artificial.

Tabla 2 Horario ocupacional

De	hasta	Descripción
00:00	08:00	En casa
08:00	18:00	Fuera de casa
18:00	24:00	En casa

Tabla 3 Ganancias internas

Horas del año	MET	CLO
0-1896 (invierno)	1	1
1896-6336 (verano)	1.5	0.5
6336-8760 (invierno)	1	1

Tabla 4 Programación de tasa metabólica y vestimenta estacional

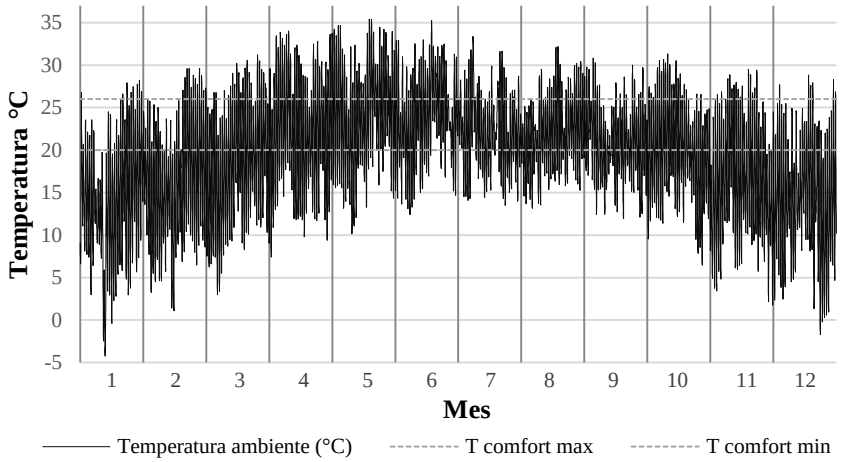
Ganancias internas	Zona 1 (Recamara sur)	Zona 2 (Recamara norte)	Zona 3 (Baño)	Zona 4 (Sala, comedor , cocina)
Personas	1 (descansando, sentado 100W)	1 (descansando, sentado 100W)		
Computadoras	140 W PC con monitor	140 W PC con monitor		
Iluminación	10 W/m^2	10 W/m^2	10 W/m^2	10 W/m^2

*No se consideró el calor de la estufa u otros electrodomésticos.

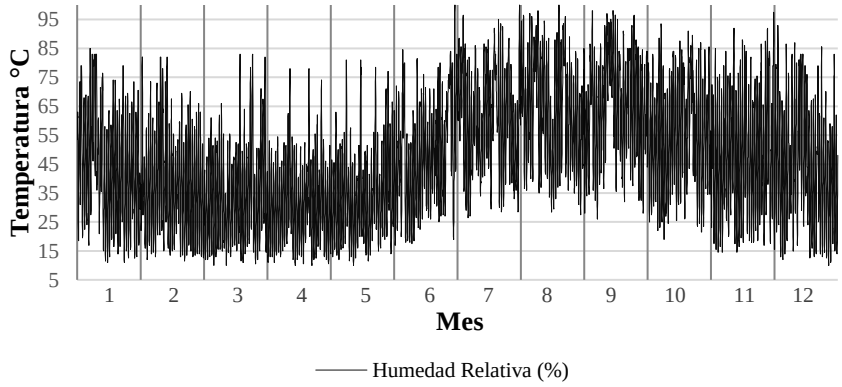
RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis climático del caso de estudio y los niveles de confort térmico en el interior de la vivienda analizada.

En la Grafica 1 y 2 se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente y de la humedad en la ciudad de victoria de Durango a lo largo de un año típico. Estos resultados fueron obtenidos de en TRNSYS con información climática del software Meteonorm, que corresponden al sitio analizado. Los datos confirman la necesidad de calefacción y enfriamiento estacional en la ciudad analizada. Se establece el rango confort de 20-26°C como temperaturas aceptables para estado de satisfacción.



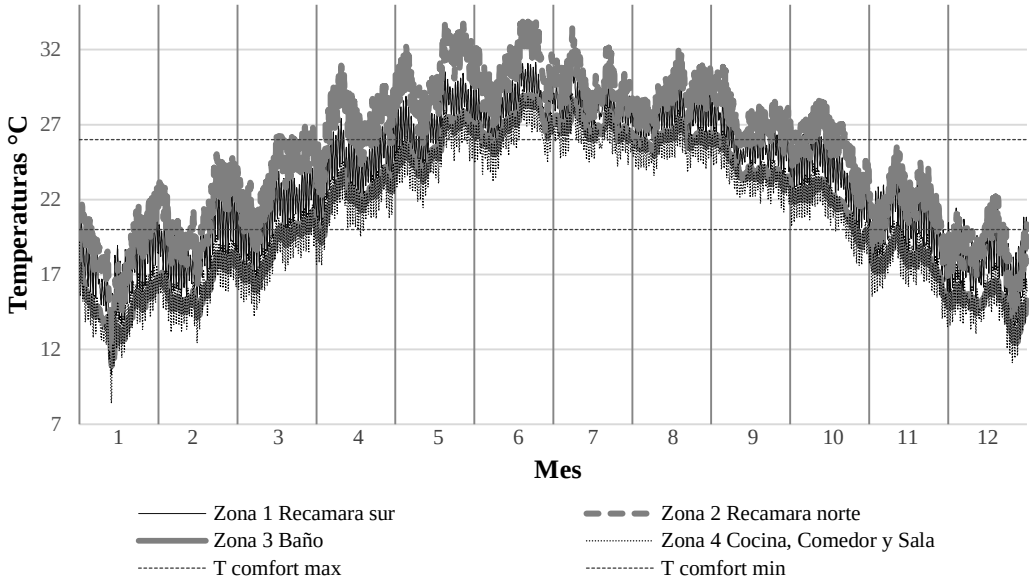
Grafica 1 Temperatura ambiente de la ciudad de Victoria de Durango de un año típico.



Grafica 2 Humedad relativa de la ciudad de Victoria de Durango de un año típico.

Distribución de temperaturas

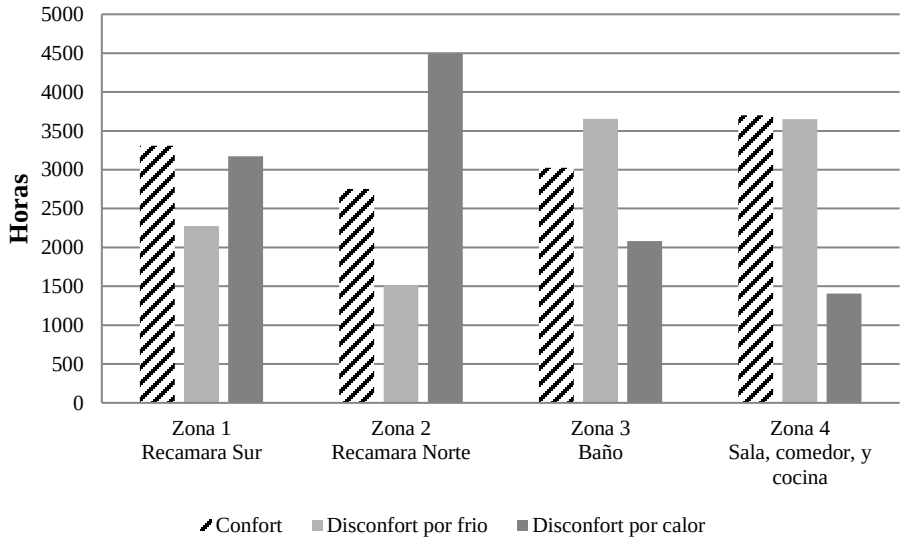
Integrando las características de la vivienda en la recreación de su entorno climático se obtienen la distribución de temperaturas (Grafica 3). Se reportan las temperaturas de las zonas térmicas de la vivienda, esto cada hora a lo largo de un año típico. Por su orientación, se destaca la zona 2 con mayor temperatura (33.93°C) y la zona 4 con la mínima temperatura (8.42°C). También se distingue que tanto en invierno como verano las temperaturas se salen del rango de confort térmico aceptable en el interior de la vivienda.



Grafica 3 Temperaturas horarias por zona.

Confort térmico en la vivienda

En base al rango de confort definido se reportan el número de horas de confort y disconfort al año y por zona térmica de la vivienda. En la Grafica 4 se muestra que predomina el estado de disconfort en la vivienda.



Grafica 4 Horas de confort al año por zona térmica

CONCLUSIONES

Las distribuciones de temperatura ambiente y temperatura interior en cada una de las zonas de la vivienda analizada confirman que se carece de confort térmico durante el 60% de las horas del año. Lo que demuestra que el diseño y ubicación actual de la vivienda analizada requiere de algún tipo de climatización. Se planea que en las siguientes simulaciones, se integren las viviendas colindantes para estudiar el efecto que estas tienen en el desempeño térmico de la vivienda. Posterior a este estudio se busca identificar y analizar el uso de tecnologías de acondicionamiento ambiental pasivas que ayuden a mejorar la sensación de confort en el interior de la vivienda.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto: P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

REFERENCIAS

Andrade, Andrés A. (2007). “Diagnóstico Del Comportamiento Térmico, Energético Y Ambiental De La Vivienda De Interés Social En México: Una Retrospectiva Y Prospectiva (2001 – 2012).” *Tesis de maestria de la UNAM*: p.7–13.

Crawley, Drury B., Jon W. Hand, Michaël Kummert, and Brent T. Griffith. (2006). “Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs.” *Building and Environment*: p. 661–73.

Lucero, Jorge. (2014). “The Effect of Solar Reflectance , Infrared Emissivity , and Thermal Insulation of Roofs on the Annual Thermal Load of Single-Family Households in México.” *ISES International Solar Energy Society*: p.5.

Martín, Ignacio R. (2004). Reporte *Desarrollo de Un Simulador Para La Optimización Termo-Económica de Viviendas de Interés Social.* p.7.

Ochoa, Jose M. et al. (2012). “Bioclimatic And Energy Efficiency Considerations For Social Housing : A Case Study In Hot Dry Climate.” *ES2011-54*: p.1–10.

SEMARNAT & INECC. (2013). “Estrategia Nacional de Cambio Climático.” *Informe CICC* (Cambio climatico): p.8.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

PROSPECTIVAS EN LAS TEMÁTICAS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN LAS AZOTEAS VERDES COMO ALTERNATIVA BIOCLIMÁTICA

Mtro. Roberto Gustavo Barnard Amosurrutia, Mtra. Roció Moyo Matinez
Dr. Pablo Elías López, Mtro. Héctor Valerdi Madrigal

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, México D.F., 02200, México.
Departamento del Medio Ambiente para el Diseño, edificio P1 Laboratorio de Bioclimática
Tel (0155)5318-9170 y (0155)5318-9187.
Dirección de e-mail. rbarnarda@gmail.com, rociomoyo@yahoo.com.mx
pabloelias10@hotmail.com, hvalerdi@gmail.com

RESUMEN

El uso de la tecnología de los espacios naturados como alternativas de diseño ambiental y bioclimático ha permeado en muchos ámbitos de la investigación, campos como el aislamiento térmico para el ahorro energético tanto para la calefacción como para el enfriamiento, la disminución de la reflexión, la reducción del albedo para mitigar el efecto de la isla de calor en las ciudades, el aislamiento acústico en espacios urbanos y ambiental, una tecnología verde para combatir el cambio climático. Mucho se ha investigado a nivel mundial y nacional, y mucho también se ha aplicado, pero a diferencia de otros países la normatividad en México relacionada con esta tecnología se encuentra completamente estancada a diferencia de otros países que detonaron la utilización de azoteas y muros verdes por medios de estímulos fiscales, México no presenta ninguna iniciativa o avance a este respecto, lo cual se convertirá en un impedimento para el crecimiento de la utilización de los espacios naturados en la edificación, de forma similar que se encontró estancada la industria de colectores solares en el país. Se muestra un análisis de los principales temas de investigación en los principales y más representativos centros de investigación relacionados en el estudio de los espacios naturados. Igualmente se presentan las más importantes iniciativas de normatividad y legislación que han estimulado el crecimiento y la proliferación de los espacios urbanos en ámbitos urbanos.

Palabras claves: Azoteas verdes, aislamiento térmico, aislamiento acústico, normatividad.

ABSTRACT

The use of green roofs and wall roofs as an alternative environmental and bioclimatic design has permeated many areas of research fields such as thermal insulation for energy savings both for heating and for cooling, reducing reflection, albedo reduction to mitigate the effect of heat island in the cities, sound insulation in urban areas and environmental spaces, a green technology to combat climate change. Much has been investigated at global and national level, and much has also been applied, but unlike other countries the regulations in Mexico related to this technology is completely stagnant and unlike other countries that launched roofs and green walls programs by means of tax incentives, Mexico presents no initiative or progress in this regard, which will become an impediment to growth in the use of green roofs in the buildings, similarly to the beginning of the solar collectors industry in our country. An analysis of the major research topics in the main and most representative research centers related to the study of green roofs is shown. Also the most important initiatives, regulations and legislations that have stimulated growth and proliferation of green roofs in in urban areas are presented.

Keywords: green roofs , thermal insulation , sound insulation, regulations

INTRODUCCIÓN

El uso de las azoteas verdes en México se detonó durante la gestión del entonces Jefe del Departamento Lic. Marcelo Ebrard Casubon y es impulsada por la Secretaria de Medio Ambiente en su Plan Verde[i1] que contempla diez acciones que la Cd. de México debe realizar para enfrentar los efectos del Cambio Climático. La acción numero 8 contempla un Programa de Azoteas Verdes que pretendía generar anillos verdes que sirvieran de pulmones para la ciudad reduciendo el índice de partículas suspendidas que filtraran regularan el aire. Igualmente es durante esta gestión que se publica la norma ambiental para sistemas de maturación NADF-013-NAT-2007[2] (que en realidad es un manual de procedimientos constructivos para una protección estructural y contra la humedad de los edificios) y posteriormente en diciembre de 2008 se publica en la gaceta oficial de la Cd. de México[3] una reforma al código fiscal que consiste en una reducción del 10% del predial en un año para los propietarios que construyan espacios naturados en la azotea. coadyuvaría a la construcción y practica de estos espacios naturados. El desarrollo de esta normatividad formaba parte del programa de azoteas verdes mencionado en el párrafo anterior al igual que una serie de proyectos demostrativos en edificios del gobierno del Distrito Federal.
Son estas las verdaderas condicionantes que detonan la aparición de un gran número de proyectos estudios e investigaciones sobre el diseño, la construcción y los efectos benéficos de la aplicación de los espacios naturados en los edificios.

Por supuesto esta iniciativa también obedecía a la utilización de azoteas verdes en otros países, principalmente Alemania que se había metido de lleno en la utilización de esta tecnología con el objetivo de disminuir el efecto de isla de calor y mitigar los efluentes de las precipitaciones pluviales en los sistemas de drenaje de las municipalidades y al mismo tiempo presentar un beneficio de aislamiento térmico y de ahorro de consumo de energía. En 1980 la tecnología de techos verdes era ya un procedimiento estándar[4], y en 2001 Alemania registra una construcción anual del orden de 13,500,000 de m2[5] de techos verdes, por supuesto es el país con el mayor número de superficies naturadas.

Actualmente estamos ante un fenómeno similar al que se presentó en el decenio de 1980 con la aparición de los sistemas de energía solar y los primeros colectores solares de agua y en ese entonces se hacían estudios para demostrar su factibilidad económica y se desarrollaban investigaciones y bancos de prueba para probar y evaluar diferentes sistemas y materiales, muchos de los miembros fundadores de la Asociación Nacional de Energía Solar recordarán esta tiempos y los estudios e investigaciones que se desarrollaban mismas que han quedado plasmada en las memorias científicas del A.N.E.S. Considerando lo anterior resulta interesante hacer una análisis de lo que está pasando en las investigaciones de techos verdes en nuestro país. Por lo que presentamos una clasificación de los tópicos que se están investigando y de lo que no se está investigando. Al respecto inicialmente tomaremos una clasificación de los beneficios de los techos verdes de trabajos expuestos en los congresos del A.N.E.S.[6], que fueron desarrollados en el Posgrado de Arquitectura del Paisaje de la U.N.A.M. por la Arq. Ilse García Villalobos y analizaremos que aspectos han sido estudiados en nuestro país, igualmente incluiremos otras consideraciones importantes que requieren de mayor investigación.

TEMÁTICAS DE INVESTIGACIÓN EN AZOTEAS VERDES

Mejoramiento de la Calidad del Aire. No ha sido evaluado en nuestro país y principalmente en la Ciudad de México el potencial que tienen los techos verdes para la reducción de las partículas suspendidas y la aportación que podría tener un programa de implementación de techos verdes en zonas altamente urbanizadas. No se cuentan con estudios a este respecto y no se cuenta con una correlación del significado de la disminución de CO2 y la posible disminución de los gastos en medicina pública de las enfermedades respiratorias (Human Health Effect), lo cual daría pauta a posibles escenarios de factibilidad económica para el lanzamiento de programas de estímulos para la construcción de superficies de naturación.

Regulación de la Temperatura. La evapotranspiración de las plantas es un proceso de intercambio de calor que es importante definir y emitir recomendaciones y lineamientos para diferentes tipos de plantas y climas. Ya se cuenta con algunas investigaciones que establecen modelos de cálculo a este respecto[7], como lo demuestran las investigaciones desarrolladas en el Institutito de Ingeniería de la UNAM[8].

Efecto de Aislamiento Térmico. Esta característica al parecer es la que ha sido más estudiado en nuestro país en diferentes partes y Universidades de la Republica, Mérida, Mexicali, Sonora, Colima, Ciudad de México entre otras. El objetivo ha sido el demostrar el ahorro energético en aire acondicionado más que en la calefacción como ha sido el objetivo en los países industrializados como Alemania, E.U.A. y Canadá.
Y es en este aspecto donde vemos una amplia gama de análisis y evaluaciones, así como una gran variedad de justificaciones y conceptualizaciones de la justificación y la aplicación de los espacios naturados en azotes. Se han revisado proyectos en Mexicali donde seguramente un buen aislante térmico pueda resultar más efectivo o en la Cd. de México donde los requerimientos de aislamiento térmico son mínimos.

---

[1] Plan Verde Cd. de México
http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001306.pdf
[2] GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, México, Gaceta Oficial del Distrito Federal, No.491, 28 de diciembre del 2008.
[3]GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, Gaceta Oficial del Distrito Federal,22 de diciembre del 2010.
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Green_roof
[5] http://www.greenroofs.org/index.php/about/aboutgreenroofs
[6] Ilse García Villalobos, Beneficios de los Sistemas de Naturación en las Edificaciones, Memorias ANES 2010
[7] Ilse García Villalobos, José D. Morales Ramírez, Isabel R. López de Juambelz, Las Características Higrotérmicas de la Vegetación en los Sistemas de Naturación Extensiva, Memorias ANES 2010
[8] Agustín Torres Rodríguez, David Morillón Gálvez, Calculo de la Evapotranspiracion en Techos Verdes con Clima Templado estudio de caso: casa popular, distrito federal, Memorias ANES 2008

Efecto de Aislamiento Acústico. Este aspecto prácticamente no ha sido estudiado en México y no solo a nivel de vivienda sino también como sistema para mitigar la contaminación acústica. Sin embargo a nivel urbano es un aspecto importante para atenuar el ruido ambiental, como se puede observar en algunos estudios del SPL (nivel de presión del sonido) en áreas urbanas[9]. Ver **Figura 1.**

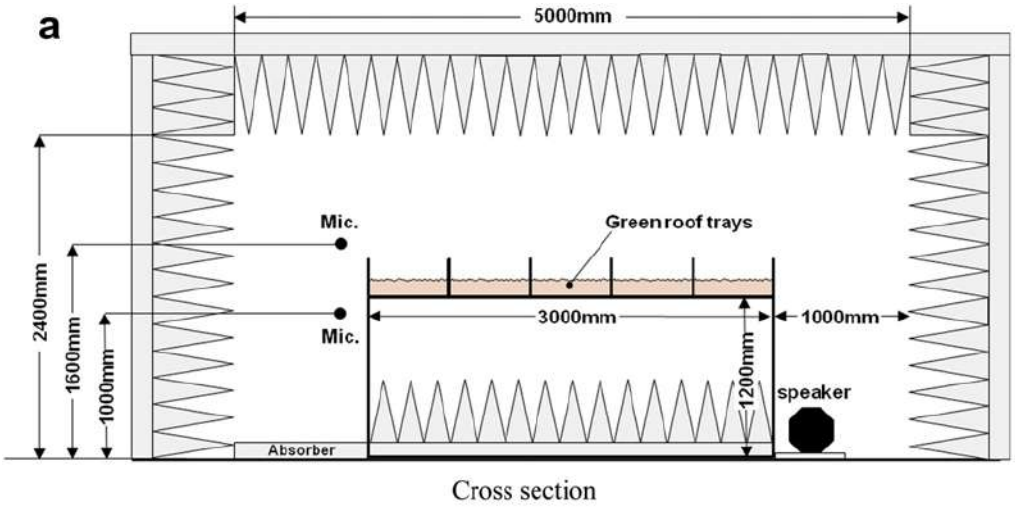


Fig. 1 Hong Seok Yang, Jian Kang, Min Sung Choi Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level, Building and Environment 2012

Prolongación de la Vida Útil de la Cubierta. Este aspecto pertenece más a la resistencia de la composición de las membranas y también a la forma y configuración de los techos. Pero habrá que considerar que actualmente en muchas partes los sistemas modulares están avanzando rápidamente y no requieren de la aplicación de membranas ni geotextiles como es el caso de la empresa aquí en México, "Simbiosis Urbana" que manufactura el producto Hidromaceta® hechos con polipropileno reciclado[10]. Estos sistemas son más económicos y requieren de diferentes consideraciones y normatividad. Ver **Figura 2.**

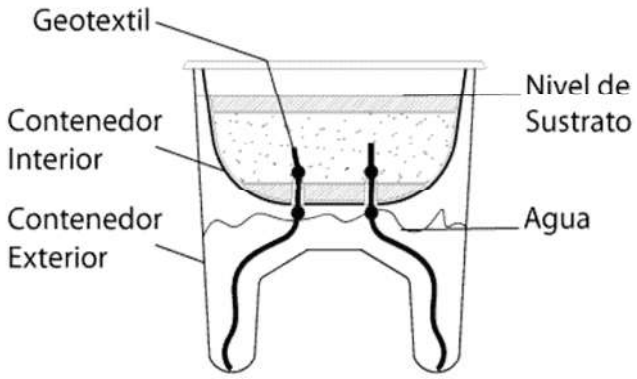


Fig. 2 www.simbiosis-urbana.com

Regulación de la Humedad. Aunque este apartado se refiere a los techos verdes, esta es una de las características más importantes de los muros verdes debido a su imperiosa necesidad de riego para su mantenimiento, esta característica los convierte en grandes sistemas de humidificación y de enfriamiento evaporativo[11] para el acondicionamiento térmico de espacios abiertos de forma muy similar a la propuesta urbana desarrollada en la Expo Sevilla 2012[12]. Aunque existen una gran cantidad de aplicaciones de muros verdes en la Cd. de México, están han sido realizadas con un fin meramente estético, y poco se ha evaluado en relación a sus capacidades para enfriar los espacios abiertos**.** Azoteas verdes, aislamiento térmico, aislamiento acústico, normatividad. Ver **Figura 3.**

[9]Hong Seok Yang, Jian Kang, Min Sung Choi Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level, Building and Environment 2012

[10]http://www.simbiosis-urbana.com/productos.html

[11] Silvia Soutullo CastroEvaluación teórica y experimental de una torre de viento evaporativa para acondicionamiento térmico de espacios abiertos, Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 2011

[12] **Sánchez, J.ˑSalmerón, J.ˑMolina,J.ˑSánchez, F.ˑÁlvarez, S.PHDC: sistemas de enfriamiento evaporativo pasivos e híbridos para edificios software de prediseño,** Revista de la Construcción vol.11 no.2 Santiago ago. 2012.

Fig. 3 http://m1.paperblog.com/i/157/1577533/cuidar-ti-cuidamos-ciudad-garnier-presenta-el-L-CvSAhY.jpeg

Capacidad de Retención del Agua. Curiosamente esta condicionante ha sido uno de los mayores detonantes del crecimiento de las azoteas verdes, ya que los mayores beneficios fiscales han tenido el objetivo de disminuir el pago de los impuestos de los drenajes pluviales, como ha sido los casos de programas muy exitosos en ciudades de Alemania, como Bonn, Berlín, Cologne, Wesphalia, que desde los 80´s ofrece beneficios fiscales sobre el pago del drenaje pluvial. Mas sin embargo poco se ha hecho a este respecto en nuestro país, principalmente porque no contamos con sistemas separados de alcantarillado y no existe un pago por la cantidad de agua que los usuarios mandan al sistema de drenaje. Pero el efecto es importante en las horas pico de tormentas en zonas urbanas que causan el colapso de vialidades y un enorme desperdicio de horas-hombre.[13] y nuestras ciudades no están exentas de esta problemática. Actualmente no tenemos estudios sobre el proceso de retención del agua y como disminuyen los efluentes pluviales en zonas urbanas. Aunque algunos autores mencionan hasta un 90% de almacenamiento de la precipitación pluvial como lo menciona Marco Antonio Sánchez Ibarra[14].

Reducción del Efecto de la Isla de Calor. Se han registrado reducción de temperaturas de hasta 4.5° de temperatura en áreas urbanas en zonas donde se han promovido áreas ajardinadas[15], disminuyendo de esta forma el efecto de isla de calor. Tampoco en este importante aspecto contamos con estudios o investigaciones de azoteas verdes que nos puedan dar algunos indicativos en las zonas urbanas de nuestro país.

Protección contra Incendio En realidad este beneficio depende directamente de la humedad de la cubierta vegetal, ya que en USA existe una normatividad muy estricta a este respecto (“Fire Design Standards for Vegetative Roofs), sobre todo considerando que la mayor parte de sus viviendas se construye con madera.[16]

Aumento de Espacio Útil. En realidad, la utilización de la quinta fachada es una alternativa viable, pero deberá competir contra el área requerida para colectores solares de agua y en otros casos con el área para colectores fotovoltaicos, además, debemos considerar que en un edificio multifamiliar el área de azotea proporcional a cada departamento es reducida. En este rubro se requerirán ciertos lineamientos de utilización en relación a la densidad de la construcción. Aunque en muchos edificios de oficinas se diseñan azoteas verdes en espacios de recreación o espacios áreas que no fueron utilizadas. Y habrá que considerar las nuevas normas complementarias del reglamento de la Cd. de México[17] que indican la obligatoriedad a utilizar sistemas de aprovechamiento solar para el calentamiento de agua en edificios comerciales viviendas multifamiliares y unifamiliares de más de 100 m2. Ver **Figura 4.**

Fig. 4 Torre Amazonas Diseño y Construcción Simbiosis Urbanahttp://www.simbiosis-urbana.com/

[13] http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/05/24/1094684
[14] Rocío López de Jumbelz, Naturación de Azoteas, Facultad de Arquitectura, UNAM, 2010
[15] Madrid+Natural, Adaptación al Cambio Climático basada en la Naturaleza, Ayuntamiento de Madrid
[16] ANSI/SPRI VF-1, Fire Design Standards for Vegetative Roofs, January 29, 2010
[17] http://www.excelsior.com.mx/periodico/flip-comunidad/28-06-2016/portada.pdf

Creación de Hábitat. Un caso típico con el objetivo de aumentar la fauna silvestre es el desarrollado en Londres y denominado corredor verde Crown State[18] donde claramente se especifica en el programa el deseo de favorecer el desarrollo de la fauna. Y mencionan que comparativamente con áreas no desarrolladas; los entornos urbanos solo mantienen el 8% de las especies nativas de aves y el 25% de las especies de plantas. Ver **Figura 5.**

Fig. 5 Proyecto Wild West End
http:// www.thecrownestate.co.uk/news-and-media/news/2015/london-property-owners-join-forces-to-launch-wild-west-end-ecology-initiative/

Aspectos Visuales y Estéticos. Bueno el aspecto estético es difícil de evaluar, pero lo que se puede investigar es el efecto que puede tener el beneficio visual de los muros verdes en los aspectos psicológicos de las personas, igualmente se puede analizar la plusvalía que representan las áreas verdes de las azoteas y muros verdes en la mercadotecnia de la venta de bienes inmuebles. Estos estudios pertenecen a otros campos disciplinares que son importantes para un enfoque integral y sustentable. Adicionalmente enunciaremos algunas temáticas que consideramos importantes para detonar una mayor aplicación de techos verdes en nuestras ciudades las siguientes temáticas son adicionales o complementarias a las mencionadas anteriormente.

Área Verde. Considero que para nuestro país uno de los aspectos más importantes de las azoteas y muros verdes es su beneficio en zonas urbanas carentes de vegetación. Visto desde muchos aspectos de vista como la reducción de la isla de calor o el aporte de oxígeno, además se podría evaluar su aporte a una disminución de los efectos de la contaminación ambiental y el número de contingencias ambientales. En este último punto es posible cuantificar las pérdidas en horas-hombre y correlacionarla con la disminución del CO2, generados por espacios naturados, de tal forma que se puedan hacer programas de financiamiento basados en estas consideraciones. Un ejemplo importante fue el desarrollo del Factor de Área de Biotipo en la ciudad de Berlín[19] ya que carecía de áreas verdes y estableció estrictos lineamientos para el establecimiento de áreas verdes obligatorias en los nuevos proyectos. Nuestro reglamento de construcciones inicialmente indicaba área libre y posteriormente al sismo se indicó una parte como área permeable (misma que nunca se respetó), pero en los proyectos de construcción de edificios no se establece claramente el objetivo de destinar un porcentaje exclusivo para vegetación o área verde; en los planes urbano si aparecieron algunas zonas delimitadas como áreas verdes y muchas de ellas fueron botín de la corrupción inmobiliaria y de las delegaciones. Ver **Figura 6.**

Fig. 6 Área verde experimental de paleta vegetal para muros verdes
Posgrado UAM-Azcapotzalco, Arq. Gabriela Román

[18] http://www.thecrownestate.co.uk/news-and-media/news/2015/london-property-owners-join-forces-to-launch-wild-west-end-ecology-initiative/
[19] http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/

Paleta Vegetal. Este componente de los sistemas Naturados es muy importante para el buen funcionamiento y sobrevivencia de la capa vegetal. La problemática estriba en definir que cultivos son los adecuados para las diferentes condiciones climáticas, afortunadamente muchas instituciones están participando en esta definición, La Universidad Autónoma de Chapingo, la Universidad Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana entre otras.

Estudios de Factibilidad Económica. Históricamente se ha demostrado que los más exitosos programas de desarrollo de azoteas verdes van acompañados de un buen programa de incentivos fiscales y financiamiento, como ha sido el caso de Alemania.

Políticas e Incentivos Fiscales. Independientemente de la propuesta de reducción fiscal en la Cd. de México (que no ha sido evaluada y representa un estímulo económico poco significativo para un proyecto de azotea o muro verde) no se cuentan con propuestas concretas de programas de incentivos fiscales para estimular el crecimiento de superficies de naturación en proyectos, vivienda existente y en áreas urbanas.

Sistemas Modulares. En el mercado existen sistemas modulares que son de un costo mucho menor que lo que indica la norma ambiental de la Cd de México, lo anterior nos indica que existe una buena posibilidad de estos sistemas crecerá más fácilmente que otros sistemas.

CONCLUSIONES

Inicialmente mencionamos el parecido que existe en el desarrollo de las investigaciones de espacios naturados con el que se presentó en algún momento en la década de los 80´s con las investigaciones de los sistemas de colectores solares de agua. Con el tiempo la investigación, el mercado y el costo de los energéticos fue favoreciendo el mercado de los colectores solares. En forma similar las investigaciones de los beneficios de las azoteas verdes están presentando un comportamiento similar y eventualmente esperamos que también la investigación, el mercado y la necesidad de mejores condiciones ambientales propicien un crecimiento mayor de las superficies de naturación en edificios y viviendas.

Consideramos que se requieren de muchos estudios econométricos y multidisciplinarios, estudios de efectos en la salud pública que nos ayuden a demostrar la factibilidad de estos sistemas, de tal forma que se puedan proponer programas de apoyos económicos para estimular su aplicación e integrar el diseño de espacios naturados, que se incluya en las medidas de mitigación en los estudios y análisis de impacto ambiental.

Podemos concluir que existen muchas investigaciones sobre la eficiencia energética o la capacidad de aislamiento de los sistemas naturados en azoteas, siguiendo enfoques de investigación de países desarrollados donde existen temperaturas extremosas y utilizan equipos mecánicos para calefacción o aire acondicionado. En efecto, es un sistema que permite disminuir los efectos de las temperaturas, pero aun en esas condiciones los sistemas de naturación compiten contra sistemas de aislamiento térmico de mucho menor precio. De alguna forma estamos perdiendo un enfoque más integral de las azoteas verdes que es el poder aumentar las áreas de vegetación y sus beneficios ambientales junto con esa capacidad de aislamiento térmico.

Referencias

•Beth Anne Currie, Estimates of Air Pollution Mitigation with Green Roofs Using the Ufore Model, A thesis presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Applied Science and Management, Toronto, Ontario, Canada, 2005.
•Corrie Elizabeth Clark, Energy Emissions Mitigation Using Green Roofs: Probabilistic Analysis and Integration in Market – Based Clean Air Policies, ProQuest Dissertations and PhD. Theses in Environmental Sciences and Pollution Management, The University of Michigan, 2008.
•Madrid+Natural, Adaptación al Cambio Climático basada en la Naturaleza, Ayuntamiento de Madrid.
•Madre Frédéric, Vergnes Alan, Machon Nathalie, Clergeau, Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large – scale sampling, Landscape and Urban Planning, 2014
•Memorias A.N.E.S, 2010, 2012, 2014
•Rocío López de Jumbelz, Naturación de Azoteas, Facultad de Arquitectura, UNAM, 2010.

http://www.anes.org/cms/index.php
http://www.greenroofs.org, 2014.
http://www.igra-world.com/, 2014

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO A BASE DE BLOQUE DE CONCRETO HUECO

Jesús B. Pérez Valenzuela
Departamento de ingeniería civil, División de ingeniería, Universidad de Sonora,
Rosales y Boulevard Luis Encinas, CP 83174, Hermosillo, Sonora, México, Código Postal 83174.
Teléfono (0166) 2592183, **benito@dicym.uson.mx**

Rafael E. Cabanillas López y Jesús F. Hinojosa Palafox
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, División de Ingeniería, Universidad de Sonora,
Rosales y Boulevard Luis Encinas, CP 83174, Hermosillo, Sonora, México, Código Postal 83174.
Teléfono (0166) 2592106, **rcabani@iq.uson.mx y fhinojosa@iq.uson.mx**

RESUMEN

Las cavidades o cámaras de aire cerradas en las edificaciones son elementos que, frecuentemente, aparecen en la envolvente constructiva de cualquier edificación. Estos espacios formados por paredes sólidas son de distintos tamaños, heterogéneas y normalmente contienen aire en su interior. Esto plantea una complejidad especial cuando requieren ser caracterizadas desde el punto de vista de la transferencia de calor; de igual manera, las cavidades alargadas que se forman en los sistemas de muros constructivos, a base de block hueco de concreto en forma de ductos verticales, no son la excepción.

El presente trabajo muestra los resultados numéricos de la transferencia de calor de una cavidad vertical cerrada cuya razón de aspecto es equivalente a la de un muro típico de bloque de concreto hueco. Los resultados se obtienen de modelar el desempeño térmico en estado permanente del sistema de muro en tres dimensiones, donde la porción sólida del bloque transmite el calor por conducción mientras que la cavidad alargada lo hace por los mecanismos de convección y radiación acopladas.

Los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en el sistema de muro en tres dimensiones confirman que la resistencia térmica disminuye con el incremento del gradiente térmico; por igual, se observa que la cantidad de calor que pasa a través de la cavidad es mayor que por la porción sólida. Se obtienen correlaciones de la resistencia térmica del sistema constructivo para diferentes condiciones lo que permite su uso en el cálculo de cargas térmicas de una edificación.

ABSTRACT

Cavities or chambers of air enclosed in the buildings are elements that often appear in the envelope of any building. These spaces formed by solid walls are different sizes, heterogeneous and typically contain air inside. This raises a special complexity when they require to be characterized from the point of view of heat transfer as well as tall cavities, which are formed in the systems of building walls on hollow block of concrete in the form of vertical ducts: there is no exception.

The present work shows the numerical results of the heat transfer from a vertical closed cavity whose aspect ratio is equivalent to of a wall in typical block of concrete hollow. The results of modelling the thermal performance in permanent state system of wall in three dimensions, where the solid portion of the block transmits heat by conduction while the elongated cavity makes it through mechanisms coupled convection and radiation

The results of the numerical simulations of the wall in the three dimensional system confirm that the thermal resistance decreases with the increase of the thermal gradient. It was observed that the amount of heat that passes through the cavity is greater than for the solid portion. Correlations of the thermal resistance with the constructive system for different conditions were allowing their use in the calculation of thermal loads of a building.

Palabras claves: heat transfer, tall cavities, coupled convection and radiation, concrete hollow block, numerical simulations,

INTRODUCCIÓN

Durante la temporada de mayor sobrecalentamiento en las zonas Norte y Costera de México, se presenta un gran consumo de energía eléctrica para generar las condiciones de habitabilidad intramuros, causando los impactos negativos al medio ambiente. En México, el 45% de los usuarios de electricidad son residenciales y el 72 % de ellos se encuentran en zonas de clima cálido, por ello una política efectiva para disminuir los consumos de electricidad por climatización artificial, es mejorando la envolvente constructiva de las edificaciones.

Las normas mexicanas como la NMX-C-460-ONNCCE-2009 y la NOM-020-ENER-2011, aplican la misma metodología para estimar la resistencia térmica o el coeficiente global de trasferencia de calor de cualquier sistema constructivo, pero no se establecen criterios para evaluar productos con cavidades constructivas, tal es el caso de muros fabricados con tabiques multiperforados, bloques de concreto hueco, muros ligeros a base de panel de tablaroca, entre otros. Debido a lo anterior es necesario consultar normas internacionales como los UNE-EN-ISO-6946 cuya metodología tiene mayor alcance que las contempladas en nuestra normatividad.

El presente trabajo consiste en evaluar el desempeño térmico de las cavidades alargadas que forman los sistemas de muros constructivos a base de block hueco de concreto en forma de ductos verticales. El boque de concreto utilizado en México es fabricado en diversas medidas, los más comunes que se utilizan en la construcción de viviendas son de 0.15×0.20×0.40 m y 0.12×0.20×0.40 m, con dos cavidades huecas interiores de 0.10×0.16 y 0.07×0.16 metros respectivamente y nervaduras de 0.025 m de grosor, que corresponden a la porción sólida del block hueco. Las figuras 1 y 2 muestran la configuración y las dimensiones de la mitad de un block, mismas que se retomarán para el modelo físico a modelar.

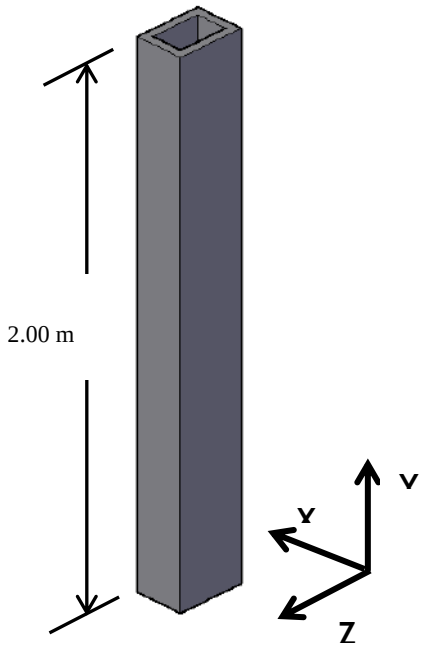
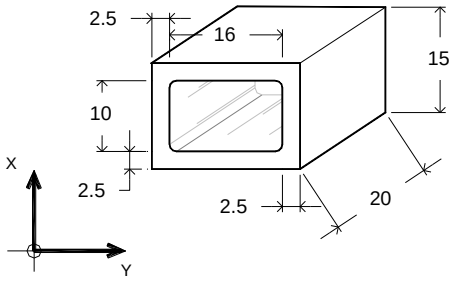


Figura 1. Dimensión vertical de la cavidad alargada formada por bloques.



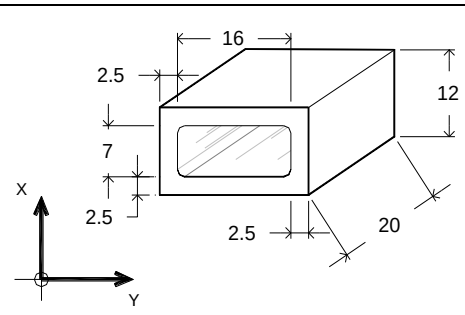


Figura 2. Dimensiones en centímetros, del bloque de concreto hueco.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Coz Díaz, et al (2005), estudia por el método de elemento finito, el comportamiento térmico de una pared que se fabrica con tipos de bloques huecos fabricados a base de concreto ligero. La modelación se realiza en estado permanente para los casos diferentes basados en las propiedades de los bloques y del mortero, y para las condiciones de frontera se fija un flujo de calor de 10 W/m^2 en la parte caliente, un coeficiente de película externo de 25 W/m^2 K, así como una temperatura ambiente de 273 K. Se reportan diferencias de hasta un 2% en los valores experimentales y modelados de la resistencia térmica y del coeficiente global de transferencia de calor. B. Lacarrie're, et al (2003) realizan un estudio de la influencia la unión con mortero entre los tabiques de arcilla multiperforados. Utiliza el software FLUENT para la solución de las ecuaciones gobernantes del problema, donde concluye que las perforaciones en los tabiques favorecen la resistencia térmica, pero el mortero de unión entre los tabiques genera zonas de menor resistencia térmica en el muro. S. Lorente, et al (1998), realizaron un estudio teórico en ladrillos de terracota huecos donde se encuentra que la resistencia térmica disminuye con respecto al aumento en la diferencia de temperatura, asimismo el efecto de la transferencia de calor en las cavidades es más crítico cuando son más gruesas.

M. A. Antar (2009) y H. Baig and M. A. Antar, (2008), realizan un estudio numérico de la transferencia de calor conjugada a través de un bloque hueco para investigar los parámetros que inciden en una mejora de la resistencia térmica de los bloques. Los resultados mostraron que aumentar el número de cavidades a dos, y luego tres conservando el ancho total del bloque, resultaron en una disminución de la velocidad máxima del aire dentro de las cavidades en 30.34 % y 40.56 %, respectivamente, lo que indica una disminución significativa en el coeficiente de transferencia de calor por convección y en consecuencia se reduce la transferencia de calor al cambiar el diseño de las cavidades disminuyendo los puentes térmicos. Por su parte, M. A. Antar y Thomas (2001, 2004 y 2006) demostraron la importancia de convección y radiación resistencias a través de un modelo simplificado de un solo bloque. Investigaron el efecto de radiación térmica y la emisividad de una superficie sobre la transferencia de calor a través de bloques de construcción huecos de diferente distribución interna. Encontraron que la resistencia térmica de un bloque hueco puede aumentar hasta en un 43% al aumentar el número de cavidades llenas de aire para una anchura total dada.

Majed M. Al-Hazmy (2006) reporta el estudio de la transferencia de calor por convección natural y conducción acoplados, en un bloque de 19 cm de altura y con tres cavidades huecas idénticas de 5×5 cm, un grosor de pared de 1 cm. De acuerdo con la simulación realizada con FLUENT, encuentra que los huecos llenos de aire del bloque, contribuyen a la transferencia de calor, encontrándose que esta se reduce en un máximo de 36% si se rellenan con poliestireno común. El objetivo era eliminar la convección dentro de las cavidades insertando

barras de poliestireno y con ello se redujo la transferencia de calor en un 26%. También investigaron el uso de particiones inclinadas dentro de ladrillos huecos para reducir la penetración de calor y llegó a la conclusión de que el flujo de calor a través de la cavidad disminuye a medida que el número de particiones aumenta, lo que se atribuye principalmente a la reducción del papel de transferencia de calor de convección. Una simulación de verano de un día mostró que las particiones inclinadas pueden reducir el flujo de calor hasta en un 42%

Jiapeng Sun (2009), estudia 71 combinaciones diferentes de bloques de concreto huecos utilizando la técnica de volumen finito a través del software FLUENT. El objeto de investigación es un bloque cuyas dimensiones son 240 mm de largo, 115 mm de ancho y 90 mm de alto, cuya densidad es de 2,200 kg/m^3 y una conductividad térmica de 1.40 W/m K. En la simulación se consideraron los coeficientes convectivos interior y exterior de acuerdo con el código de eficiencia energética de China y se reporta la conductividad térmica equivalente de cada combinación. Se concluye que, aumentando las particiones del bloque paralelas a la dirección predominante de la transferencia de calor, se disminuye el efecto de la convección, en este caso el efecto de la conducción a través del concreto es dominante, pero además reportan que es posible disminuir aún más la conductividad térmica equivalente escalonando las cavidades. Sala J. M. et al (2008), realizan una caracterización en estado estable y transitorio de una pared de ladrillo hueco de 40 milímettros, recubierta con yeso en el interior y una capa de aislamiento térmico de 30 milímetros. La arcilla del ladrillo hueco tiene una conductividad térmica de 0.490 W/m K y una densidad de 1,200 kg/m^3. A través del programa FLUENT se realiza la modelación del sistema constructivo y se obtiene una resistencia térmica igual a 0.85 m^2 K/W y del ladrillo hueco se reporta una conductividad térmica equivalente de 0.210 W/m K y en consecuencia una resistencia térmica de 0.190 m^2 K/W.

Ossama y Kris (1994) evalúan experimentalmente tres paredes individuales fabricadas con bloque de concreto hueco, para comparar la contribución de las cavidades y la influencia del mortero, en los valores de la resistencia térmica del muro. La muestra de control correspondió al muro de bloque de concreto hueco de 0.150 m de espesor unido con mortero convencional. En la segunda opción se sustituyó el mortero por un adhesivo y en la tercera se eliminan las cavidades y el mortero. La experimentación se realizó con base la prueba ASTM C 518-76, para estado estable con medición de flujo de calor. Se reportan valores de resistencia térmica de 0.331 m^2 K/W sin considerar la influencia del mortero y de 0.361 m^2 K/W cuando los bloques se juntan con mortero; se concluye que la resistencia térmica del muro de bloque de concreto hueco es 8% mejor que cuando se utiliza mortero para unión entre los bloques. Borbón y colaboradores (2010) realizan un estudio experimental de la resistencia térmica de un muro de bloque de concreto hueco de 0.12×0.20×0.40 m, 2.00 m de alto, por 1.60 m de ancho, reproduciendo las condiciones ambientales para la ciudad Hermosillo, Sonora, en épocas de sobrecalentamiento. Para mediciones en estado permanente se reporta una resistencia térmica promedio de 0.174 m^{2}K/W, y se encuentra que la resistencia térmica varía de acuerdo con el gradiente de temperatura.

Si bien la literatura especializada en el tema es amplia, pocos son los autores que se enfocan a un estudio numérico y experimental en su conjunto, para el caso estudio, se buscará validar la modelación con mediciones experimentales. También existen muchos estudios sobre tabiques multiperforados o relacionados con bloques de concreto hueco, a excepción de Borbón et al (2010) y Ossama et al (1994), que si corresponden al caso estudio del presente trabajo, aunque se aplica una metodología diferente porque el objetivo de este trabajo, es revisar el desempeño térmico de la cavidad constructiva y del bloque de concreto hueco acoplados.

MODELACIÓN CON CFD DEL CASO ESTUDIO

Las superficies exteriores de una edificación sujetas a condiciones que varían en función del tiempo en un clima cálido seco en el verano, hace que se presentan temperaturas máximas de hasta 50 °C, en tanto que en el invierno la temperatura puede llegar a los 0 °C o menos. Bajo esas condiciones reales de operación, se fijan fronteras isotérmicas con variaciones de temperatura del ambiente exterior de 30 °C a 50 °C para verano y de 0 °C a 20 °C para el invierno. Las condiciones intramuros son las de confort térmico a 25 °C, de tal modo que la combinación de condiciones reproduce una situación real para un año típico en la Ciudad de Hermosillo, Sonora.

El modelo físico en tres dimensiones representativo del sistema constructivo es una cavidad alargada de dos metros de altura, con las medidas de la mitad de un bloque de concreto hueco 12 y 15 cm como se muestra en las figuras 1 y 2. En las diferentes interfaces sólido-aire, la trasferencia de calor se lleva a cabo por convección de la superficie sólida al fluido o viceversa, y por radiación de superficie a superficie; la temperatura en la interface sólido-aire dependerá del balance térmico de la energía que entregue (o reciba) la superficie sólida al fluido y a las demás superficies de la cavidad.

Para el modelo físico se fijan fronteras isotérmicas en el exterior y el interior bajo las condiciones ya descritas, cuatro internas adiabáticas en los bordes de la tapa superior e inferior, así como dos laterales, y finalmente cuatro interiores en la cavidad (interfaces) sujetas al balance convectivo-radiativo de la cavidad. Al respecto se describen las fronteras y su tratamiento de acuerdo con las simplificaciones establecidas para su modelación.

Fronteras isotérmicas

$$\frac{\partial T(y,z)}{\partial y} = \frac{\partial T(y,z)}{\partial z} = 0 \qquad (1)$$

Fronteras adiabáticas laterales

$$Q_x = -\lambda_x \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}; \quad Q_y = -\lambda_y \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}; \quad Q_z = 0 \qquad (2)$$

Fronteras adiabáticas superior e inferior $$Q_x = -\lambda_x \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}; \quad Q_z = -\lambda_z \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}; \quad Q_y = 0 \tag{3}$$

El sistema de ecuaciones para resolver la transferencia de calor del problema propuesto no tiene una solución exacta, es por ello que se utiliza el software FLUENT 6.3 para dar solución al problema, mismo que aplica la técnica de volumen finito que fue desarrollado originalmente como una formulación especial de diferencias finitas, especialmente para resolver problemas relacionados con la dinámica de fluidos. En general, la exactitud y precisión de los resultados obtenidos con esta metodología, están en función de los recursos computacionales con los que se cuentan. Por tal motivo, en la mayor parte de los casos se utilizan aproximaciones y modelos que permiten resolver los problemas con recursos razonables.

La geometría de la cavidad alargada en tres dimensiones se genera con nueve volúmenes independientes acoplados entre sí, en las interfaces comunes sólido-sólido y sólido-aire, considerando las direcciones del modelo físico. Se revisó la variación del número de Nusselt promedio en la superficie caliente hasta generar la malla óptima que garantizara una variación no mayor al 1%, encontrándose que una malla de 80×60×100 y 80×40×100 satisface esta condición para un bloque representativo de *0.15* y *0.12 m* respectivamente como se muestra en la tabla 1, la variación del Nusselt, en función de la densidad de malla.

Tabla 2. Variación del Nusselt en función del tamaño de malla

DENSIDAD DE MALLA	NUSSELT	
	PROMEDIO	ERROR RELATIVO
80×30×100	703.4	
80×40×100	714.8	1.60%
80×50×100	725.8	1.51%
80×60×100	723.8	0.28%

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se llevan a cabo 5 simulaciones para verano e invierno, por cada tipo de block, variando el gradiente térmico desde 5°C hasta 25°C. Los cálculos calorimétricos obtenidos a partir de las simulaciones son: a) flujos de calor total a través del bloque y la cavidad, y b) resistencia térmica del bloque y la cavidad.

Para calcular la resistencia térmica del bloque de concreto hueco y de la cavidad, se aplican las siguientes expresiones:

$$R_{bloque} = \left(\frac{\Delta T}{q_{total}}\right) A_{bloque} \qquad R_{cavidad} = \left(\frac{\Delta T}{q_{cavidad}}\right) A_{cavidad}$$

Donde:

R_{bloque} Es la resistencia térmica del bloque de concreto hueco ($m^2 K/W$).

$R_{cavidad}$ Es la resistencia térmica de la cavidad ($m^2 K/W$).

ΔT Es la diferencia de temperaturas entre la superficie caliente y la superficie fría del muro o de la cavidad (K).

q_{total} Es el flujo de calor neto a través de todo el bloque (W).

$q_{cavidad}$ Es el flujo de calor que pasa a través de la cavidad (W).

A_{bloque} Es el área total perpendicular al flujo de calor (m^2).

$A_{cavidad}$ Es el área perpendicular al flujo de calor en la cavidad (m^2).

El flujo de calor se obtiene con FLUENT a partir de la simulación realizada. El área perpendicular al flujo de calor se calcula con las dimensiones del bloque simulado, que mide 0.21 m de ancho por 2.00 m de altura, entonces el área total es de 0.42 m^2. En el caso del área de la cavidad las dimensiones son de 0.16 m de ancho por 2.00 m de altura, por tanto, el área de interés es de 0.32 m^2.

Los resultados de las simulaciones durante el verano e invierno se muestran en la tabla 1 y 2. La información obtenida más importante, es la resistencia térmica por gradiente de temperatura en cada tipo de bloque y su resistencia térmica promedio; asimismo se muestra la resistencia térmica de la cavidad por cada tipo de bloque y su resistencia térmica promedio.

Tabla 2. Valores de resistencia térmica durante el verano e invierno, para el bloque de 0.15 m

BLOQUE DE 0.15 m		*VERANO*					*INVIERNO*				
BLOQUE	*ΔT (superficies exteriores) K*	*25*	*20*	*15*	*10*	*5*	*25*	*20*	*15*	*10*	*5*
	Flujo de calor total (W)	*56.650*	*44.315*	*32.389*	*20.929*	*10.040*	*52.129*	*41.372*	*30.700*	*20.154*	*9.823*
	Resistencia térmica (m^2 K/W)	*0.185*	*0.190*	*0.195*	*0.201*	*0.209*	*0.201*	*0.203*	*0.205*	*0.208*	*0.214*
	Resistencia térmica promedio (m^2 K/W)	*0.196*					*0.206*				
CAVIDAD	*ΔT (superficies cavidad) K*	*18.680*	*15.090*	*11.430*	*7.716*	*3.918*	*19.325*	*15.504*	*11.672*	*7.824*	*3.924*
	Flujo de calor (W)	*37.785*	*29.260*	*21.145*	*13.466*	*6.329*	*33.297*	*26.356*	*19.484*	*12.720*	*6.141*
	Resistencia térmica (m^2 K/W)	*0.158*	*0.165*	*0.173*	*0.183*	*0.198*	*0.186*	*0.188*	*0.192*	*0.197*	*0.204*
	Resistencia térmica promedio (m^2 K/W)	*0.176*					*0.193*				

Tabla 3. Valores de resistencia térmica durante el verano e invierno, para el bloque de 0.12 m

BLOQUE DE 0.12 m		*VERANO*					*INVIERNO*				
BLOQUE	*ΔT (superficies exteriores) K*	*25*	*20*	*15*	*10*	*5*	*25*	*20*	*15*	*10*	*5*
	Flujo de calor total (W)	*62.929*	*49.388*	*36.250*	*23.553*	*11.389*	*58.022*	*46.243*	*34.444*	*22.724*	*11.158*
	Resistencia térmica (m^2 K/W)	*0.167*	*0.170*	*0.174*	*0.178*	*0.184*	*0.181*	*0.182*	*0.183*	*0.185*	*0.188*
	Resistencia térmica promedio (m^2 K/W)	*0.175*					*0.184*				
CAVIDAD	*ΔT (superficies cavidad) K*	*18.680*	*15.090*	*11.430*	*7.716*	*3.918*	*18.903*	*15.155*	*11.401*	*7.635*	*3.846*
	Flujo de calor (W)	*39.309*	*30.509*	*22.100*	*14.128*	*6.675*	*34.566*	*27.454*	*20.352*	*13.341*	*6.479*
	Resistencia térmica (m^2 K/W)	*0.152*	*0.158*	*0.166*	*0.175*	*0.188*	*0.175*	*0.177*	*0.179*	*0.183*	*0.190*
	Resistencia térmica promedio (m^2 K/W)	*0.168*					*0.181*				

Finalmente se encuentra una función de ajuste representativa de la variación de la resistencia térmica para los dos tipos de bloques, considerando que la función es dependiente tanto del gradiente térmico como de la temperatura promedio de la cavidad del bloque.

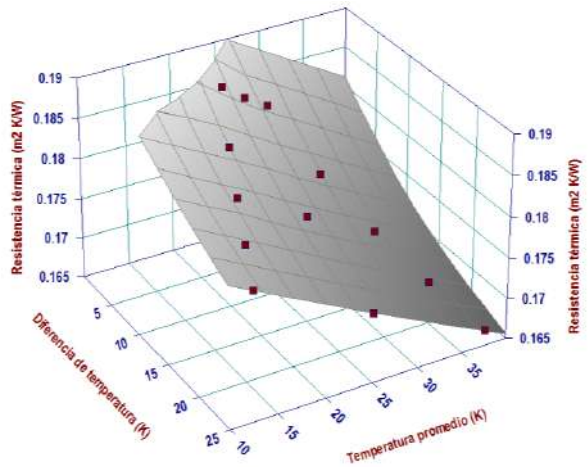


Figura 3. Superficie de respuesta con la función de ajuste en función del gradiente térmico y la temperatura promedio del muro en un bloque de 0.12 m

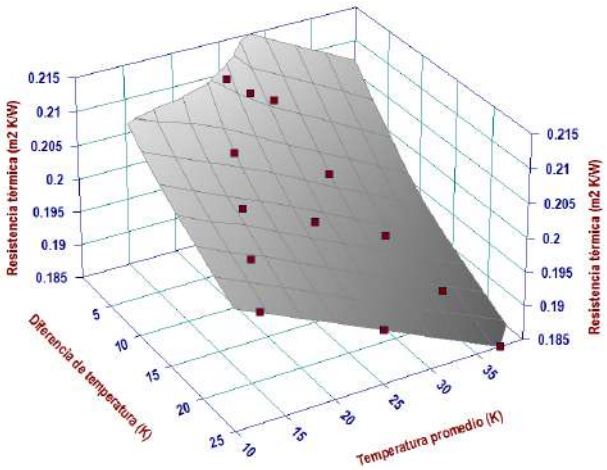


Figura 4. Superficie de respuesta con la función de ajuste en función del gradiente térmico y la temperatura promedio del muro en un bloque de 0.15 m

$$R_{térmica} = a + b(\ln(\Delta T))^2 + c \cdot T_{prom} \tag{6.4}$$

ΔT Es el gradiente de temperaturas entre la superficie caliente y la superficie fría del muro.

T_{prom} Representa la temperatura promedio de la cavidad del bloque.

Las constantes de la función de ajuste para cada bloque son:

	a	*b*	*c*
Bloque de 15 cm	*0.23405209*	*-0.0023201126*	*-0.00067803626*
Bloque de 12 cm	0.20479617	-0.0016059582	-0.00058177818

Se comparan los resultados que se obtendrían aplicando la función de ajuste con los valores reportados por Borbón A. et al 2010, en un muro a escala real fabricado a base de bloques de concreto hueco de 12 cm de espesor, reproduciendo las condiciones experimentales, en cuanto a los valores de gradiente térmico y temperatura del trabajo experimental. La función de ajuste se valida a partir de obtener resultados concordantes, con un error relativo promedio de 3.68% y una desviación estándar de 2.25 %.

CONCLUSIONES

Las resistencias térmicas promedio del bloque de *0.15 m*, son de *0.196* y de *0.0206 m^2 K/W* para verano e invierno; asimismo para el bloque de *0.12 m* son de *0.175* y de *0.184 m^2 K/W*, por lo que hay mejor comportamiento aparente del desempeño térmico del bloque durante las temporadas de bajo calentamiento. Lo mismo sucede en los resultados de las resistencias térmicas promedio de la cavidad; para el bloque de *0.15 m*, son *0.176* y *0.193 m^2 K/W*, asimismo para el bloque de *0.12 m* son *0.168* y *0.181 m^2 K/W*.

Es notorio que la variación de la resistencia térmica respecto del gradiente térmico se confirma con estas simulaciones como algunos estudios lo han reportado Lorente et al (1998) y Borbón A. et al (2010)); también se denota que para un mismo gradiente térmico las resistencias térmicas son ligeramente mayores en inverno que para el verano, esto se debe a que las propiedades termofísicas del aire en la cavidad varían con la temperatura de la cavidad.

En el mismo sentido, se concluye que la porción sólida es la que transporta más calor por unidad de área en una proporción de 2:1 para el bloque de 12 cm y de 1.75:1 para el bloque de 15 cm. Además, que la influencia de los puentes térmicos influye más en el bloque de 12 cm que en el bloque de 15 por el grosor del bloque mismo, por lo que si el bloque fuera totalmente sólido la cantidad de calor que transportaría sería mayor. También se ha determinado que la influencia de la temperatura promedio de la cavidad, influye notablemente en la resistencia térmica del bloque, siendo durante las épocas de sobrecalentamiento las que más lo afectan, contrario a los requerimientos de ahorro de energía.

Las funciones de ajuste obtenidas para los sistemas constructivos a base de bloque de concreto hueco, facilitan el cálculo de la resistencia térmica que no se encuentra reportado en la normatividad. Se recomienda que para condiciones reales, se debe considerar el sistema constructivo completo del muro que también incluye los refuerzos horizontales y verticales de concreto reforzado.

REFERENCIAS

1. J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, A. Martín Rodríguez a, A. Lozano Martínez-Luengas, C. Betegón Biempica. (2005). Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation, Applied Thermal Engineering 26, 777–786.
2. J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, C. Betegón Biempica, M.B. Prendes Gero. (2007). Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method, Applied Thermal Engineering 27, , 1445–1456.
3. Lacarrie're B., B. Lartigue, F. Monchoux. (2003). Numerical study of heat transfer in a wall of vertically perforated bricks: influence of assembly method, Energy and Buildings 35, 229–237.
4. Lorente S., M. Petit, R. Javelas. (1998). The effects of temperature conditions on the thermal resistance of walls made with different shapes vertical hollow bricks, Energy and Buildings 28, 237-240.
5. Mohamed A. Antar, Hasan Baig. (2009). Conjugate conduction-natural convection heat transfer in a hollow building block, Applied Thermal Engineering 29, 3716–3720.
6. H. Baig and M. A. Antar. (2008). Conduction / Natural convection analysis of heat transfer across multi-layer building blocks, 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands.
7. Mohamed A. Antar. Antar, L.C. Thomas. (2001). Heat transfer through a composite wall with enclosed spaces: A practical two-dimensional analysis approach, ASHRAE Trans 106, 318–324.
8. Mohamed A. Antar, L.C. Thomas. (2004). Heat transfer through a composite wall with an evacuated rectangular gray body radiating space: a numerical solution, ASHRAE Trans 110 (2), 36–45.
9. Mohamed A. Antar. (2006). Multi-dimensional effects in estimating the heat loss across building envelopes, in: Proceedings of the Second International Conference on Thermal Engineering Theory and Applications, Al-Ain, UAE 3–6 January.
10. Majed M. Al-Hazmy. (2006). Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks, Energy and Buildings, 38, 515-521.
11. Jiapeng Sun. (2009). Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 5598–5607.
12. Sala J. M., Urresti A., Martín K., Flores I., Apaolaza A. (2008). Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis, Energy and Buildings 40, 1513–1520.
13. Ossama A. Abdou, Kris S. Murali. (1994). The effect of air cells and mortar joints on the thermal resistance of concrete masonry walls, Energy and Buildings 2, 111-119.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SISTEMAS CONSTRUCTIVOS CONVENCIONALES DE MUROS DE VIVIENDA EN EL NOROESTE DE MÉXICO: UN ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS Y DE COSTOS

Ana C.Borbón Almada, Israel Miranda Pasos, Arturo Duarte Gaxiola, Osvaldo Gracia Ochoa.

Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México, Tel. (662) 2-59-21-84, acborbon@dicym.uson.mx, imiranda@dicym.uson.mx, a212206102@alumnos.uson.mx, maklein_91@hotmail.com.

RESUMEN

Este trabajo presenta una descripción de los tipos de muros más comúnmente usados para construir vivienda de interés social en la región Noroeste de México. Se realiza un análisis de sus características físicas, como la densidad volumétrica, costo por metro cuadrado y un análisis de sus características térmicas como la conductividad térmica de los materiales de que estarán compuestos, así como de la resistencia térmica por metro cuadrado de sistemas compuestos por varias capas, incluyendo materiales macizos y huecos. La mayoría de los datos utilizados para el análisis térmico se han determinado en el laboratorio de Análisis Térmico de Materiales del Dpto. de Ing. Civil de la Universidad de Sonora "TERMA", utilizando equipo especializado de medición, así como dispositivos diseñados en este laboratorio.

Finalmente se presenta un listado con las características más relevantes de cada tipo de muro, que puede servir como una guía para el sistema constructivo más conveniente de acuerdo a las necesidades del proyecto en cuestión de peso, costo y aislamiento térmico.

Palabras clave: Muros, construcción, vivienda, análisis termofísico, costos.

ABSTRACT

This ppaper presents a description of the types most commonly used to build affordable housing in the Northwest region of Mexico walls. an analysis of their physical characteristics such as bulk density, cost per square meter and an analysis of its thermal characteristics such as thermal conductivity of the materials that will be composed, as well as the thermal resistance is performed per square meter of composite systems several layers, including solid and hollow materials. Most of the data used for thermal analysis have been determined in the laboratory of Thermal Analysis of Materials Department. Ing. Civil of the University of Sonora "TERMA" using specialized measuring equipment and devices designed in this laboratory .

Finally a list of the most relevant for each type of wall, which can serve as a guide to the most suitable construction system according to the needs of the project in terms of weight, cost and thermal insulation characteristics is presented.

Keywords: Walls, construction, housing, thermophysical analysis costs.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas constructivos utilizados en la elaboración de muros en la vivienda mexicana, varían dependiendo del tipo de vivienda y el entorno climático así como las condiciones socioeconómicas del lugar. En el caso de la vivienda formal o de interés social que se produce en México los tipos de sistemas constructivos para muros se forman a base de mamposterías que pueden ser de diversos materiales, desde barro hasta concreto en diferentes proporciones de mezclas, tamaños y configuraciones tomando en cuenta los de tipo macizo y hueco. Existen también los paneles de materiales prefabricados o adicionados como aislamiento en diferentes formas, placas o espumas.

Los materiales que forman estos componentes en el caso de los tabiques, son a base de tierras cocidas y mezclas de morteros con cementantes y agregados. De acuerdo al código de edificación de vivienda (CONAVI, 2010) los materiales más comunes de que se fabrican los muros para la vivienda social mexicana son: Concreto armado, concreto prefabricado, concreto ligero (peso volumétrico en estado fresco menor a 1.9 t/m^3), recomendado para elementos secundarios en cuanto a solicitaciones estructurales. También de concreto simple, estructuras de mampostería, piedra artificial, elementos macizos o huecos, piedras naturales mas morteros aglutinantes, muros armados. También se presentan variantes de las mezclas para aligerar los concretos y los morteros con diversos materiales aligerantes que se encuentran en el mercado como perlitas minerales y sintéticas, (Del Rio, 2005), (Miranda, 2014),) ,(Oskan,2011), (Arambarri, 2000).

A partir de este panorama se busca enlistar los sistemas de muros más utilizados y mostrar sus características termofísicas. Este trabajo se plantea como antecedente dentro de un estudio de propuestas de morteros y concretos ligeros para muros de vivienda de interés Social.

En la siguiente revisión de literatura se muestran algunos trabajos donde se ha estudiado el comportamiento mecánico y térmico de diversos sistemas constructivos.

Se han encontrado referencias de sistemas constructivos tanto en México como en otros países que denotan la utilización de los principales materiales para formación de muros. Se advierten diferentes sistemas o tipologías constructivas como los que muestra (Barone, 2005). (Marincick *et al.* 2014) presenta evaluaciones de sistemas combinados de muros en una sola vivienda presentando concreto celular (ligero) y tabiques de tierra estabilizada, donde se compran las ventajas (con termografía) con los sistemas tradicionales de bloques y ladrillos en cuanto a desempeño térmico, esta autora destaca que no se conocen las propiedades térmicas de estos sistemas constructivos en México, solo en la bibliografía, esta es una importante referencia que destaca la importancia que tiene el desarrollo de trabajos relacionados con la determinación termofísica de las propiedades térmicas de los materiales y mezclas que componen los sistemas constructivos de muros más convencionales, sobre todo cuando son medidos en laboratorio.

Diniz, (2015) en Brasil, plantea la existencia de muros de mamposterías, que han resultado ser malos en cuanto a su evaluación térmica por simulación y propone mejorar estos sistemas desde una perspectiva de mejorar sus respuesta térmica, aspecto que refuerza la necesidad de estudios de comportamiento térmico de los materiales.

(Borbón, et al, 2010) Estudió el comportamiento térmico teórica y experimentalmente de muros de bloque de concreto hueco para determinar la resistencia térmica por metro cuadrado, mostrando valores que oscilan entre 0.15 a 0.18 ºCm^2/W.

Materiales y métodos

Tipologías de muros para vivienda de interés social. De acuerdo al código de edificación de vivienda publicado por CONAVI, y de las referencias del sector de la construcción de vivienda en México, los tipos de muros más utilizados en vivienda de interés social son:

-Muro de bloque de concreto hueco donde se varían sus dimensiones, así como las capas de diferentes materiales que actúan como aislantes ya sea en forma de rellenos de hueco o en forma de placas de diferente espesor.

-Muros de bloque de concreto macizo o muros de concreto colados en cimbra metálicas de tipo monolítico.

-Muros de tabique recocido diferente dimensiones y configuraciones , macizos, huecos o multiperforados.

La variedad de los tipos de materiales y componentes para fabricar muros en la vivienda de interés social en México, no es muy amplia, debido a que las instancias financiadoras de este tipo de vivienda, solicitan que se cumpla con normatividad vigente para los materiales de construcción y que cuenten con alguna certificación; sin embargo se realizan combinaciones de los sistemas constructivos antes mencionados de tal manera que la gama de combinaciones de capas y rellenos con material aislante puede ser muy variada, constituyéndose en estrategias de adecuación ambiental en el sentido de proporcionar sistemas constructivos más aislantes y ligeros.

A partir de estos tipos de muros se realizan combinaciones con distintos materiales para lograr modificar el desempeño térmico. Estas modificaciones consisten en diferentes estrategias como:

Rellenar los huecos de material aislante, adicionar placas de materiales aislantes, de diferentes densidades y conductividad térmica, así como variando sus espesores, lo que repercute en diseñar la resistencia térmica requerida para cada caso dependiendo de las necesidad del entorno de la vivienda y el clima.

La información que se requiere para realizar este análisis se toma de valores proporcionados por las fichas técnicas de los componentes o materiales que conforman los muros, así como de mediciones realizadas en laboratorio de la conductividad térmica y la densidad volumétrica de algunos materiales y sistemas constructivos. Se realizó una investigación de mercado en cuanto a los costos promedio de los materiales y mano de obra para fabricar un m^2 de muro de cada tipo, para mostrar un precio final integrado y aproximado por m^2 de muro para cada caso.

Finalmente se ha calculado la resistencia térmica de cada sistema constructivo por metro cuadrado, en base a la conductividad térmica medida en laboratorio, de cada capa de material y los espesores de las capas que conforman los sistemas constructivos tipo muro.

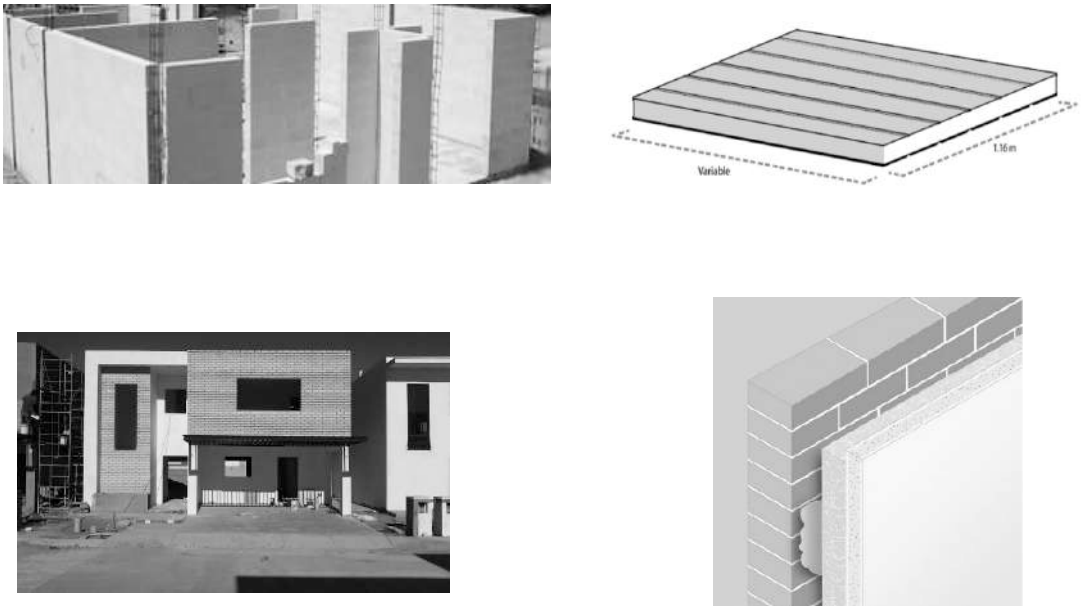


Fig. 1.- Sistemas consructivos tipo, de muros a base de tabiques y materiales aislantes.

Medición de conductividad térmica de materiales. Se realizó la medición de la conductividad térmica de una serie de materiales y componentes que forman diversos sistemas constructivos en combinaciones de materiales y espesores para conformar sistemas constructivos de muros; estos materiales y sus valores se enlistan en la tabla 1. Las mediciones de conductividad térmica y densidad volumétrica se realizaron utilizando el equipo *EP-50 Lambda Meter*, (ASTM-C-518) donde se midieron 3 muestras de cada uno de los materiales, para obtener un promedio de los valores de conductividad térmica por muestra.

Las muestras para los materiales no aislantes fueron de 15 x 15 x 4 cm; Las muestras para los materiales aislantes fueron de 50x 50 x 4 cm, como se muestra en la fig. 2.

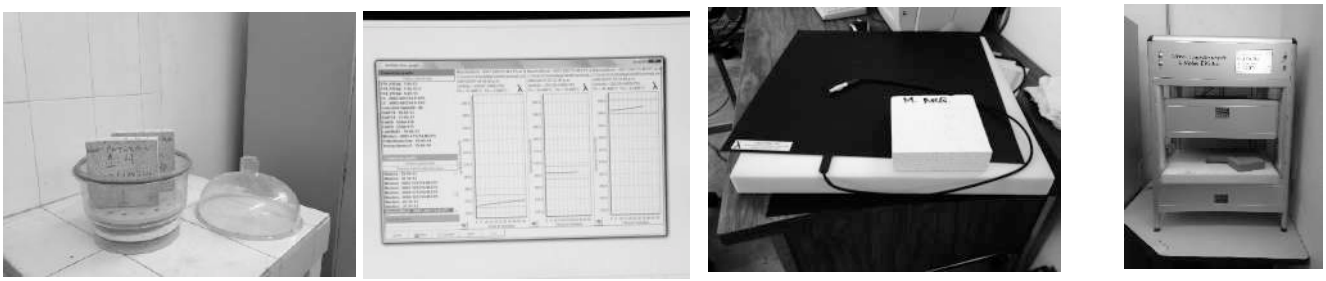


Fig. 2.- Desecación de las muestras y equipo medidor de conductividad térmica para diversos materiales.

Resultados de medición. A continuación se presenta una tabla donde se muestran las características de algunos sistemas constructivos de los más comúnmente utilizados en el Noroeste de la República mexicana y que también se encuentran en otras partes del país.
Se muestra la densidad volumétrica de los sistemas constructivos para dar una idea de lo ligeros o pesados que estos pueden ser, contando así con un criterio para su manejo y diseño de carga muerta.

Se muestra también un precio unitario aproximado por metro cuadrado de tipo de muro, con precios promedio de la ciudad de Hermosillo Sonora para el año 2016, los cuales deberán ajustarse al lugar y tiempo.
También se observan los valores de la conductividad térmica para cada caso donde fueron medidos en laboratorio u obtenidos de la ficha técnica del producto (según se indica). Finalmente se determina la resistencia térmica por metro cuadrado de cada tipo de muro, tomando en cuenta los espesores de las capas así como los valores de conductividad térmica.
El cálculo de la resistencia térmica de los sistemas constructivos a base de diferentes capas de materiales homogéneas y no homogéneas se realiza en base a lo establecido en la norma mexicana NMX-C-460 –ENER-2009.

Tabla 1.- Resumen de características termo físicas de sistemas constructivos tipo muro.

Sistema constructivo de muro	**Densidad volumétrica (kg/m^3)**	**Precio unitario ($\$/m^2$) para el año 2016**	**Resistencia térmica ($ºCm^2/W$)**	**Conductividad térmica (W/mK)**	**Espesor (m)**	**Fuente**	**Sistemas no homogéneos** *
Muro de multypanel de 2" de espesor.	16	935.66	2.34	Aislante = 0.0217 Lámina = 52.0	0.0508 0.001	Ficha técnica proveedor	
Muro insulpanel de 6"	16	819.58	4.35	Aislante = 0.035	0.15	Ficha técnica proveedor	
Tabique recocido 7 x 14 x 28 con placa 1" de poliestireno extruido mas mortero c-a 1:3 de 1 cm.	1700	1413.25	1.17	Tabique = 0.78 Poliestireno=0.035 Mortero = 0.630	0.14 0.0254 0.01	Medido en laboratorio	
Panel W de 1" de espesor mas 3 cm de mortero c-a a cada lado.	48.19	353.80	0.8	Panel= 0.035 Mortero= 0.630		Ficha técnica y laboratorio	
Bloque de concreto hueco de 12 x 20 x 40 mas fibra de vidrio de 1" mas mortero 1 cm.	1530	651.94	0.89	Bloque= 0.70 Fibra de vidrio=0.036		Ficha técnica proveedor Y laboratorio	*
Bloque concreto hueco 15x20x40 mas placa 1" de poliestireno expandido mas mortero c-a de 1 cm.	1540	390.19	0.89	Bloque = 0.70 Placa 0=0.035 Mortero= 0.63		Medido en laboratorio	*
Ladrillo 7x14x28 mas mortero cemento arena 1:4. Ambas caras de 1 cm.	1700	580.76	0.20	Ladrillo = 0.78 Mortero = 0.63 Mortero 0 0.63		Medido en laboratorio	
Bloque aligerado comercial 12 cm.	800	440.64	0.32	Bloque = 0.430		Medido en laboratorio	
Muro de piedra sin emplastes 20 cm	2300	1645.08	0.10	Piedra = 2.0		Fuente bibliográfica	
Ladrillo blanco tipo caravista, comercial 12 cm.	1570	614.61	0.36	Ladrillo blanco = 0.33		Fuente bibliográfica	
Muro de adobe 20 cm.	1530	206.74	0.48	Adobe = 0.25		Fuente bibliográfica	
Concreto celular. Comercial 12 cm.	501	697.39	0.85	Conc. celular = 0.14		Medido en laboratorio	
Ladrillo térmico Comercial de 12 cm.	800	670.00	0.37	Ladrillo térmico = 0.32		Medido en laboratorio	
Ladrillo común 7x14x28 1" de poliestireno enjarre fino y yeso de 1 cm.	1439	869.60	0.93	Ladrillo = 0.78 Poliestireno = 0.035 Enjarre fino = 0.63 Yeso = 0.32		Medido en laboratorio	
Bloque de concreto hueco convencional de 12x20x40 cm.	1500	350.00	0.17	Bloque = 0.7		Medido en laboratorio	*

Muro de ladrillo convencional de 7x14x28 con emplastes ambas caras de 1 cm mortero c-a.	1780	590.00	0.20	Ladrillo = 0.78 Mortero = 0.63 Mortero = 0.63		Medio en laboratorio	
Muro de bloque de concreto hueco 12x20x40, relleno de Core Foam, Aislante comercial.	1520	450.00	0.78	Bloque = 0.78 Relleno = 0.036		Ficha técnica proveedor Y laboratorio	*
Muro a base de bloque de concreto hueco de 12x20 x40 mas placa de superaislante de 0.5 cm.	1500	800.00	0.38	Bloque = 0.70 Placa superaislante = 0.023		Ficha técnica proveedor Y laboratorio	*
Muro de bloque de concreto hueco relleno de tierra y 1 " de placa aislante.	2300	920.00	1.0	Bloque= 0.70 Capa de tierra 0 0.28 Placa aislante=0.034		Medido en laboratorio	*
Muro de bloque de concreto hueco y placa aislante de 1"	1530	1120.00	0.88	Bloque= 0.70 Placa aislante= 0.036		Medido en laboratorio	*
Muro de tabique recocido mas yeso por un lado y mortero fino por el otro de 1 cm.	1730	1430.00	0.22	Tabique 00.78 Yeso =0.32 Mortero 0 0.63		Medido en laboratorio	

Los valores resultado de las mediciones y por fichas técnicas de proveedores de materiales, proporcionan información acerca de la conveniencia de la utilización de estos materiales, componentes y sistemas constructivos. Es importante destacar que los valores que se tomaron de fichas técnicas son materiales certificados y los que no cuentan con certificación fueron medidos para asegurar la veracidad de los resultados.

Conclusión

Los resultados en las mediciones de muros constructivos permiten conocer sus propiedades termosfíscas y orientan en el sentido de saber cuales de sus principales características como pesos volumétricos, y resistencia térmica final en base a los valores de conductividad y espesores, lo cual puede orientar en un momento dado para decidir que tipos de materiales y sus combinaciones son los adecuados dependiendo del objetivo que se persiga, siendo en primera instancia al economía y lograr que los materiales sean ligeros y aislantes.

Agradecimientos.- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Comisión Nacional de Vivienda dentro del proyecto **CONACYT – CONAVI 2014-1-236187.**

REFERENCIAS

Del Río Merino Mercedes; Jaime Santa Cruz Astorqui; Mariano González Cortina. "MORTEROS ALIGERADOS CON ARCILLA EXPANDIDA: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y LA ADICIÓN DE FIBRAS DE VIDRIO AR EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO". *Informes de la Construcción,* Vol. 57, nº 497, mayo-junio 2005.

Miranda Pasos I., J. F. García Arvizu, A. C. Borbón Almada, M. R. Ramírez Celaya, D. Burgos Flores, S. Castro Brockman. **"**ESTUDIO DEL IMPACTO TÉCNICO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO POR LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ZEOLITA**"** *Iberoamerican Journal of Project Management*. Vol. 5, Núm. 1 (2014).

Ozkan Sengula, Senem Azizib, Filiz Karaosmanoglub, Mehmet Ali Tasdemira. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete . *Energy and Buildings* 43 (2011) 671–676 .

NMX-C-460-ONNCCE-2009 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AISLAMIENTO TERMICO-VALOR "R"PARA LAS ENVOLVENTES DE VIVIENDA POR ZONA TERMICA PARA LAREPUBLICA MEXICANA-ESPECIFICACIONES Y VERIFICACION

Algara M. Siller, Ángel Ismael Cárdenas Martínez, Gerardo Javier Arista González y Jorge Antonio Rodríguez Hernández. "Diseño de bloques de suelo estabilizado para uso urbano en San Luis Potosí. CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN. Celaya, Gto., México, 2012. *Academia Journals* Vol. 4 .No.3.

Arambarri G. y Aglietti E. ; "MATERIALES AISLANTES DE PERLITA Y SILICATO DE CALCIO CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y PROPIEDADES"; Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 941-947. Argentina.

ASTM- Designation: C 518 – 98 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus1.

Aouba Laila , Cécile Bories Marie Coutand , Bernard Perrin , Hervé Lemercier . "Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residue". *Construction and Building Materials* 102 (2016) 7–13.

Costa Del Pozo Antonella., Energía y Medio Ambiente. Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Barcelona 2012. Tesina. Universidad Politécnica de Cataluña. Máster en Arquitectura.

Código de Edificación de Vivienda, (CONAVI, 2010).

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SISTEMAS DE EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS UTILIZADOS POR LAS NORMAS Y CERTIFICACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES VIGENTES EN MÉXICO

Israel Tovar Jiménez, Elisur Mogollón, Yazmín Pinacho, Yadira Benítez, Karen Rivera, Manuel Zurita
Posgrado en Diseño Bioclimático, UAM Azcapotzalco, Cd de México.
Tel. +52 5553189189, **orieste@gmail.com**

Manuel Ochoa de la Torre, Irene Marincic Lovriha
Depto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, 83000 Hermosillo, Sonora, México.
Tel. +52 662 2592179, **imarincic@arq.uson.mx**

RESUMEN

Este documento muestra los modelos y procedimientos de estimación de la transferencia térmica en los edificios que siguen los principales sistemas de certificación y normas que tienen presencia en México. Se analizan tres normas mexicanas, dos obligatorias y una voluntaria, así como dos certificaciones nacionales, aplicables a vivienda. Los sistemas de certificación importados analizados son LEDD originario de Estados Unidos y BREEAM de Reino Unido. De manera general se muestra que los sistemas nacionales son más sencillos y limitados en su base de cálculo térmico, pero tienen la ventaja de ser más sencillos de implementar.

ABSTRACT

This document shows the models and estimation procedures of heat transfer in buildings that follow the main certification systems and standards that have a presence in Mexico. Three Mexican standards, two mandatory and one voluntary, and two national certifications applicable to housing are discussed. Imported Certification systems analyzed are LEDD from USA, and BREEAM from the UK. Here it is shown that national systems are more limited than those imported, but have the advantage of being simpler to implement.

Palabras claves: normatividad y certificación, eficiencia energética, cálculo de transferencia térmica.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo muestra las fortalezas y desventajas de los sistemas de evaluación térmica y energética con que contamos actualmente tanto a nivel normativo como certificaciones privadas y voluntarias, para con esto establecer las directrices adecuadas para conformar un sistema de evaluación adecuado a nuestro país que contribuya de manera más eficaz al ahorro energético.

ANTECEDENTES

En México se han implementado diferentes sistemas de evaluación del desempeño energético y sustentable de las edificaciones. A nivel nacional los cinco más relevantes son: Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001; Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011; certificación DUIS (Desarrollo Urbano Integral y Sustentable); Sisevive Ecocasa; y Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013. Son pocos los casos de reglamentos locales de construcción que incorporen criterios bioclimáticos para la adecuación energética de las edificaciones. A la par de estas metodologías, hay sistemas de evaluación como el Software Ener Habitat surgido de un proyecto interinstitucional fondeado por la SENER y el CONACYT, que ofrece una herramienta útil, posible de implementarse.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-008-ENER-2001

En la elaboración de esta norma participaron 21 instituciones, entre instancias gubernamentales, privadas y la UNAM. Es preciso mencionar que esta norma es la base de la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 Eficiencia Energética en Edificaciones - Envolvente de Edificios para uso Habitacional. Se explicará con más detalle debido a que las normas y certificaciones mexicanas la toman como base.

Esta norma titulada "Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no Residenciales", se propone como objetivo lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía a través de un mejor diseño de la envolvente del edificio, lo que hace poner la atención sobre dos temas fundamentales. En su texto introductorio se identifica al aire acondicionado como el principal motivo del gasto energético en las edificaciones, centrando su principal atención en reducir su uso en el norte y las zonas costeras del país. Menciona que la principal fuente de ganancia de calor en las edificaciones es la radiación solar.

Clima y radiación

Se toma en cuenta la ubicación de los proyectos en diferentes regiones del país mediante la tabla del Apénice "A" NORMATIVO (pp. 72) que en el eje de las ordenadas enlista 60 ciudaes de los 32 estados del país (Figura 1).

ESTADO	Ciudad	CONDUCCIÓN																RADIACIÓN					Barrera para vapo
		OPACA											TRANSPARENTE					TRANSPARENTE					
		Coeficiente de transferencia de calor, K (W / m² K)		Temperatura equivalente promedio te (°C)														Factor de ganancia solar promedio FG (W / m²)					
		Techo	Muro	Superficie interior	Techo	Muro masivo				Muro ligero				Tragaluz y domo	Ventanas			Tragaluz y domo					
						N	E	S	O	N	E	S	O		N	E	S	O					
SONORA	Guaymas	0,354	0,521	32	47	33	36	34	35	38	42	40	41	27	28	30	30	30	322	70	159	131	164	Si
	Hermosillo	0,352	0,467	33	48	34	38	35	36	39	43	41	43	28	29	30	31	31	322	70	159	131	164	
	Cd. Obregón	0,357	0,634	31	45	31	35	33	33	36	40	38	40	26	27	29	29	29	322	70	159	131	164	Si
	Navojoa	0,348	0,392	34	50	35	40	37	38	40	45	43	45	29	30	32	32	32	322	70	159	131	164	
	Nogales	0,391	1,557	28	40	27	30	28	28	32	36	35	35	23	25	26	26	26	322	70	159	131	164	
TABASCO	Villahermosa	0,354	0,540	32	46	32	36	34	34	38	42	40	41	27	28	29	30	30	272	102	140	114	134	
	Comalcalco	0,356	0,617	31	45	31	35	33	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	272	102	140	114	134	
TAMAULIPAS	Cd. Victoria	0,357	0,631	31	45	31	35	33	33	36	40	38	40	26	27	29	29	29	272	102	140	114	134	

Figura 1. Fragmento muestra de la Tabla del apéndice "A" Normativo, pp 72 de la Norma

La radiación en los elementos opacos se toma en cuenta de manera indirecta mediante valores de una temperatura equivalente. Aun cuando la norma no lo cita literalmente, la temperatura equivalente es utilizada como una temperatura Sol-aire ($T_{sol\text{-}aire}$) que es la temperatura del aire exterior que, en ausencia de intercambios de calor por radiación, podría generar el mismo flujo de calor a través del cerramiento que el que existiría con la actual combinación de radiación solar incidente (Monrroy, 1995). La ganancia de calor por radiación solar de una componente del edificio con una determinada orientación, queda entonces definida por la ecuación:

$$\phi_{rci} = \sum_{j=1}^{n} [\, K_j \, x \, A_{ij} \, x \, (t_{ei} - t \,) \,] \qquad (1)$$

Donde:

ϕ_{rci} es la ganancia de calor por conducción a través de la envolvente del edificio de referencia, en W;

j son las diferentes partes de la componente de la envolvente del edificio de referencia.

kj es el coeficiente global de transferencia de calor de la envolvente del edificio de referencia j. Para las partes opacas se denomina según la tabla 1 del Apéndice A, y para las partes transparentes de los techos es 5.952 W/m^2 K y para las partes transparentes de las paredes es de 5.319 en W/m^2 K

Aij es el área de cada parte de la envolvente *j*, con orientación *i*, en m^2 lo

tei es el valor de la temperatura equivalente promedio, para la orientación i, determinado según la tabla1 del Apéndice A en °C

t es el valor de la temperatura interior del edificio, que se considera igual a 25°C

Nota: este valor de temperatura interior de 25°C, es sólo una referencia para el cálculo de la ganancia de calo (presupuesto energético)

Confort

La manera en que se estima una temperatura objetivo, o temperatura de confort es mediante el establecimiento de una temperatura interior única para todos los casos calculados, en cualquier parte del país, lo que deja fuera de consideración los rangos locales de adaptación a las temperaturas estacinales (modelos adaptativos de confort). Se maneja de esta manera una temperatura de 25°C (ver ecuación 1), como una temperatura neutra, comúnmente usada como objetivo de diseño de climatización mecánica. Se pierde de esta manera la posibilidad de adaptar bioclimáticamente los edificios.

Transferencia de calor

la evaluación de desempeño energético de las edificaciones se hace mediante la comparación de un edificio de referencia con el edificio con las condiciones propuestas por el proyectista. El edificio de referencia es el mismo que se evalúa, pero ajustado a los requerimiento óptimos según la norma.

La estimación del flujo de calor del exterior a la superficie interior de un edificio se determinac mediante un método de Régimen Estacionario, donde los sistemas constructivosutilizados aportan un coeficiente global de transferencia de calo "K", en función de una sumatoria del aislamiento térmico aportado por cada una de las capas que conforman el sistema constructivo:

$$K = \frac{1}{M} \qquad (2)$$

Donde:

K es el coeficiente global de transferencia de calor de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie, en W/m^2 K

M es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie en W/m^2 K

El aislamiento térmico total de una porción "M" de capas homogéneas y no homogéneas se obtiene con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{hi} + \frac{1}{he} + \frac{\ell_1}{\lambda_1} + \frac{\ell_2}{\lambda_2} + \ldots \frac{\ell_n}{\lambda_n} \qquad (3)$$

Donde:

M	es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie, en m^2 K/W
hi	es la conductancia superficial interior, en W/m^2 K. Su valor es 8.1 para superficies verticales, 9.4 para superficies horizontales con flujo de calor hacia arriba (del piso hacia el aire interior o del aire interior hacia el techo), y 6.6 para superficies horizontales con flujo de calor hacia abajo (del techo al aire interior o del aire interior hacia al piso).
he	es la conductancia superficial exterior, y es igual a 13 W/m^2 K.
n	es el número de capas que forman la porción de la envolvente del edificio
ℓ	es el espesor de cada uno de los materiales que componen la porción de la envilvente del edificio
λ	es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio en W/mK

la norma tiene asimismo un procedimiento en el que va sumando las cargas condcutivas y por radiación. Compara el edificio de referencia con el proyectado, y de la comparación final de las cargas de ambos determina el porcentaje de ahorro energético obtenido, mismo que aparecerá en la etiqueta que se entrega a los edificios que acreditan la norma. Como otra desventajas de esta norma ubicamos que se consideren los materiales únicamente como aislantes mediante análisis de régimen estacional, dejando fuera el efecto de inercia térmica. Al ser limitada la temperatura de confort a 25°C se pierden enormes ahorros energéticos, ya que en zonas templadas se tiene un rango de al menos 5K y oscilaciones de temperaturas de 13.6K en verano (Tovar-Jiménez et al, 2016); así como en zonas cálidas se tienen rangos estacionales de confort de hasta 10.7 K (Ruiz, 2007).

NORMA MEXICANA NMX-AA164-SCFI-2013

Esta norma titulada "Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos" es de carácter voluntario, impulsada por la Secretaría de Economía hace confluir a una gran cantidad de normas en materia energética y ambiental. Para su aplicación y verificación remite a la siguiente cantidad de normas por Institución: 9 de CONAGUA; 17 de la SENER; 4 de SCFI; 2 de SEMARNAT; 1 de SSA; 2 de la STPS; 3 del IMNC; y 1 de ONNCE. De acuerdo con su texto introductorio, aplica a las edificaciones y sus obras exteriores. Ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. Se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento del edificio. La Secretaría de Economía manifiesta promover su implementación mediante el otorgamiento de beneficios fiscales.

Desempeño energético de los edificios

En materia energética, remite a las ters normas de sistemas energéticos de SENER: NOM-008-ENER-2001; NOM-020-ENER-2011; y NOM-007-ENER-1995. Así como a 14 normas energéticas de productos. Por lo que el sistema de cálculo de tranferencia de calor y eficiencia energética es el mismo anteriormente explicado para la NOM-008-ENER-2001. Menciona además que el edificio debe ser al menos 10% más eficiente que el edificio de referencia.

En su apartado 5.2.2.14 (pp 39/153) menciona que Todo edificio debe mantener consumos de energía iguales o inferiores a los valores establecidos en la siguiente tabla (Tabla 1), considerando para ello la clasificación de usos señalada en la tabla referida así como la regionalización del Apéndice Informativo 6, conforme a las definiciones establecidas y a los criterios que se añaden a continuación: Por kWh/m^2*año se entiende el consumo total de energía del edificio facturado en un año, medido en (kWh*año) y dividido entre la superficie total edificada medida en metros cuadrados. Cada uno de los valores indicados en la tabla está referido a las áreas del edificio destinadas a cada uno de los usos indicados, así como a cada una de las cuatro zonas climáticas indicadas en el Apéndice Informativo 6. En el caso de utilizar la clasificación de zonas climáticas de la NMX-C-460-ONNCCE (véase 3 Referencias), se deberá establecer su comparabilidad.

	Zona bioclimática			
Uso del edificio	**Cálido seco**	**Cálido Húmedo**	**Cálido Subhúmedo**	**Templado**
Hoteles	170	200	190	120
Oficinas	120	200	105	70
Escuelas	60	70	55	40
Hospitales	260	350	240	220
Restaurantes	325	350	225	240
Centros comerciales	190	265	250	155
Tiendas de autoservicio	200	290	280	170
Otros	190	265	225	155

NOTA 1: Tomado de: Estrategias regionales y sectoriales para lograr un desarrollo sustentable y de baja intensidad de carbono en México. CMM

Figura 2. Tabla 12 de consumo energético por uso de edificio

En el apartado 5.2.2.17 (pp 41/153) se establece que "La edificación puede estar diseñada con criterios bioclimáticos que favorezcan la iluminación natural dentro del edificio, logrando una buena distribución y organización de los espacios". Sin embargo no se presenta ningún método de gestión, precálculo o evaluación de la efectividad del diseño.

Como herramienta de gestión del proyecto energéticamente eficiente, esta NMX indica el uso del modelo de cálculo de la Certificación Sisevive Ecocasa: “En el caso de vivienda se deberá obtener una calificación “C” o superior en la evaluación del Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde (Sisevive). El sistema de evaluación Sisevive-Ecocasa se comentará más adelante.

DUIS

La Sociedad Hipotecaria Federal n(SHF) El sistema de certificación para Desarrollos Urbanos Integrales Sostenibles (DUIS). Para la aplicación de esta certificación se parte de una Metodología de Evaluación la cual está dividida en dos apartados, la Visión y Evaluación Técnica. En base al apartado de Visión se considera la planeación y estrategias para el Ahorro Energético a nivel macro. En la segunda parte en el apartado de Evaluación técnica se considera la evaluación a nivel Urbano, Barrial y Arquitectónico. a nivel Arquitectónico considera la envolvente térmica del edificio como estrategia de ahorro energético desde una perspectiva bioclimática, así como equipos ahorradores de energía. Para este trabajo nos enfocaremos en la evaluación de la envolvente arquitectónica del edificio.

De manera explícita en su cuerpo metodológico, DUIS menciona algunos aspectos generales que deben cumplir las edificaciones, si bien son tomadas de CONAVI, a la que remite para su verificación:

Para la evaluación técnica de la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica de las edificaciones, DUIS remite a el sistema Sisevive-Ecocasa promovido por CONAVI.

SISEVIVE-ECOCASA

Este programa de certificación tiene como base política la confianza que INFONAVIT, CONAVI y en general el Gobierno Federal mexicano han otorgado a la Agencia Alemana de Cooperación Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) para generar, implementar y evaluar el desempeño energético del parque habitacional de nuestro territorio, con el apoyo y soporte financiero de la Embajada Británica. La base teórica es una adecuación de los programas NAMA que GIZ ha desarrollado anteriormente, entre ellos el propuesto para nuestro país.

Particularmente para la evaluación térmica - egergética de las edificaciones, se ha encargado al Instituto alemán Passive House Institute, el desarrollo del paquete de evaluación energética llamado DEEVi, mismo que se basa en el PHPP (Passive House Planning Package).

Deevi

La hoja de cálculo DEEVi (Diseño Energéticamente Eficiente de la Vivienda) se otorga a Desarrolladores de vivienda que como primer requisito deben contar con un registro en la plataforma del Registro Único de Vivienda (RUV), posteriormente reciben una capacitación para el uso de la hoja de cálculo, y finalmente una revisión por un certificador.

La evaluación de la envolvente térmica se hace mediante la comparación de la vivienda propuesta, con otra vivienda diseñada de manera adecuadamente llamada Linea Base. La calificación final se determina en función del diseño arquitectónico, sistemas constructivos, materiales y tecnologías incorporados a la nueva vivienda.

La metodología de cálculo del balance energético usada por la DEEVi ha sido ajustada a través de mediciones históricas de viviendas en Europa. DEEVi se basa en normas internacionales y mexicanas. El cálculo del valor k se hace basado en la NOM-020-ENER-2011, por lo que la transferencia térmica se basa a su vez en un modelo de Régimen Estacionario, con todas las desventajas que comentamos líneas arriba para la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020- ENER-2011.

De acuerdo con INFONAVIT (2013), el modelo de cálculo DEEVi, considera las siguientes condiciones de la vivienda en el cálculo: Ubiación y orientación; clima basado en la información de INEGI; Coeficiente U de tranferencia térmica; Valores de infiltración y aportaciones convectivas; estimación de uso de equipos de refrigeración y calefacción.

De manera complementaria la corrida de cálculo entrega una evaluación de la vivienda respecto de la NOM-020-ENER-2011, que en este caso es de carácter informativo y no implica su acreditación.

LEED

Se anliza LEED como sistema de certificación, al ser el sistema que más se ha implementado en nuestro territorio y su presencia sigue en aumento. Cuenta en este momento con 212 proyectos registrados y 45 certificados (Revitaliza Consultores, 2012)‥ El sistema LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés) es un programa de certificación voluntario desarrollado por el USGB, el Consejo de Construcción Ecológica de los Estados Unidos de América y ofrece una validación y reconocimiento por parte de un tercero sobre las características sustentables de un proyecto. El interés de los desarroladores por certificar LEED sus edificaciones, radica en ser una estrategia de marketing que genera una gran ventaja para colocar los productos inmobiliarios, e incluso darles un sobreprecio que los clientes aceptan y pagan. Sin embargo sus métodos de gestión y evaluación son más adecuados y completos que los antes mencionados.

El desempeño energético de la construcción para LEED es un tema prioritario que otorga hasta 35 puntos en su apartado de Energía y Atmósfera, de éstos, se pueden obtener hasta 19 punto mediante la demostración de un adecuado funcionamiento energético del edificio mediante simulaciones computacionales. Se debe resaltar que la certificación LEED más básica se puede obtener con 40 puntos; Plata 50, Oro 60, Platino 80 pts. Lo que nos dice que sólo con un buen proyecto energético se está cerca de la certificación.

La eficiencia de la envolvente arquitectónica en LEED se calcula mediante software que tiene como base la modelación tridimensional de los edificios, mismos que se sitúan en una ubicación geográfica, solar y climática. Los arqchivos de clima son complejos y robustos, simulando las condiciones ante las culaes se calcula el comportamiento térmico energético del edificio.

La opción de annálisis energético que más otorga puntos es Opción 1: Whole Building Energy Simulation (1 –19 puntos) basado en ASHRAE 90.1-2007 Appendix G.
La simulación de desempeño energético del edificio es válida mediante el uso del siguiente software:
Equest, Energy-10, DOE-2, Energy PRO, TRACE 700, EnergyPlus, Design Builder y TRNSYS. Algunos de estos gratuitos y otros de costos muy elevados.

Los principales parámetros que se califican en el desempeño energético son: Consumos energéticos totales; Niveles de temperatura interior; Confort térmico; Flujos energéticos; Zonas de mayor consumo; Dimensionado del sistema HVAC; Emisiones contaminantes.

BREEAM

BREEAM por las siglas de Building Research Establishment Environmental Assesstment Methodologyes, es propiedad de BRE Global Ltd (British Research Establishment). Es el método de evaluación líder mundial en sustentabilidad para la planeación de proyectos urbanos, infraestructura y edificaciones. A nivel mundial hay más de 535,400 desarrollos con certificaciones BREEAM, y casi 2.218 millones de edificios registrados para la evaluación desde que fue lanzado por primera vez en 1990" . su presencia domina sobre todo el continente europeo. Este sistema puede ser aplicadoa Plan Mestro, Construcción nueva, Edificios en Uso y Rehabilitación y Acondicionamiento. Las posibles calificaciones que BREEAM otorga a los edificios asigna una estrella en orden ascendente a los siguientes niveles de desempeño: Aceptable, Pasable, Bueno, Muy bueno, Excelente, Sobresaliente. Los impactos térmicos, energéticos y al confort para edificaciones nuevas se evalúan e las categorías 2 y 3 de 10 evaluadas.

La evaluación energética del edificio se desarrolla en la Norma técnica ENE-01, cuyo objetivo general es: Reconocer y promover edificios queminimicen su consumo de energía operativa a través del buendiseño. Se toman en cuenta tres aspectos principales: a) La demanda de energía del edificio en operación; b) Consumo de energía primaria del edificio, y c) El total de las emisiones de CO_2 resultantes.

Un adecuado desempeño energético puede aportar hasta 15 créditos, que son un 26.5% del total de la certificación. La eficiencia energética del edificio se calcula a partir de la información de diseño mediante el cálculo de la energía aprobada (modelada) en software y el número de créditos alcanzados se basan en la eficiencia energética prevista del edificio evaluado en comparación con el rendimiento de un edificio nacional equivalente diseñado para satisfacer, peronomejorar, laeficiencia energética actual del edificio estándar.

BREEAM calcula el desempeño energético de las edificaciones utilizando su propio sistema de checklist, donde el aplicante llena los datos generales, y el certificador de BREEAM asigna un asesor experto que llevará a cabo la evaluación dinámica de desempeño térmico, energético de la edificación. El software utilizado es el mismo usado en LEED. Algunos de los más usados son Design Builder, DOE, y Energy Plus (Figura 3).

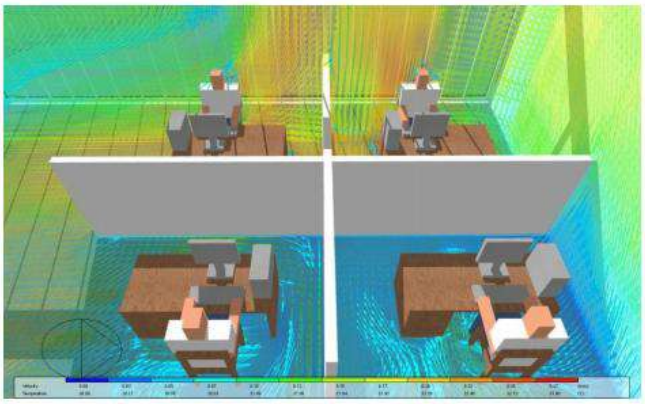


Figura 3. Escena de la evaluación computacional convectiva de un edificio en Design Builder

CONCLUSIONES

Se mostraron de manera general las consideraciones y claves del cálculo de tranferencia de calor, de los que podemos concluir que los sistemas de evaluación de normas y certificaciones nacionales se llevan a cabo mediante análisis de régimen estacional, con una tempera neutra como objetivo y considerando que los lementos aportan únicamente un nivel de aislamiento a la envolvente del edificio.

Las normas y certificaciones nacionales, basadas en el modelo de cálculo estacional de la NOM-008-ENER-2001, tienen la ventaja de ofrece un procedimiento accesible, posible de ejecutarse de manera manual (o con un software sencillo con que ya cuenta la NOM-020-ENER-2011) y basado en una serie de valores precalculados, disponibles en tablas, y por esto la hace viable para ser implementada. A a pesar de ser una NOM (obligatoria en el territorio nacional) los edificios certificados en sus 15 años de vigencia no son más de 20. Esto para nuestro medio nacional es bueno porque hemos constatado que mientras más complejas y especializadas son las normas, se aplican menos, o son más susceptibles a la corrupción para ser acreditadas.

Como se comento anteriormente, la NOM-008- ENER-2001 pierde eficacia también al restringir la temperatura de confort a 25°C y con esto se aumentan los consumos energéticos, por lo que requiere un modelo más adecuado de análisis de confort. Asimismo, una de las grandes desventajas que encontramos en esta norma nacional es que, al ser su objetivo principal evitar el sobrecalentamiento de las edificaciones, en climas fríos, los edificios mal diseñados que promueven temperaturas con déficit de temperaturas, muy por debajo de la zona inferior de la zona de confort, acreditan la norma, debido a que no se sobrecalientan.

Por otro lado, se mostró cómo evalúa LEED, y debemos comentar que resulta efectivamente un sistema de certificación mucho más robusto, complejo y eficaz para la gestión de proyectos sustentables, comparado con los sistemas de certificación y normas nacionales, sin embargo, tiene un nicho de clientes muy dirigido, de alto nivel adquisitivo cuya dinámica comercial le permite incluir la acreditación de esta certificación como una inversión redituable, lo que no resulta aplicable a muchos de los sectores de la edificación de México.

En el mismo sentido BREEAM presenta las mismas ventajas y desventajas que LEED.

Sisevive Ecocasa, con el modelo DEEVi presenta un modelo de cáalculo un poco más cercano a ser un paso intermedio entre la facilidad de aplicación y la integración de un modelo de edificio que integra todas sus componentes térmicas, y pese a tener las mismas limitaciones del modelo estacionario, problemas en considerar los factores del clima y basarse en el comportamiento de viviendas fuera de México, puede ser tomado como una base para que el sector académico integre un sistema de evaluación junto con el sector gubernamental. La base de este sistema puede ser Ener habirat, que mediante su enriquecimiento y su complemento para integrar un modelo de espacios complejos, no sólo paramétricos, puede cubrir las necesidades de nuestras normas y certificaciones.

REFERENCIAS

DUIS. (2012). Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables. Sociedad Hipotecaria Federal. México. En: http://www.duis.gob.mx/concepto/Pages/default.aspx

Monrroy M. (1995). Comportamiento térmico de cerramientos soleados – Un modelo de simulación por diferencias finitas. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de gran Canaria. España.

NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos. SCFI. Secretaría de Economía. México.

NOM-008- ENER-2001. Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no Residenciales. Secretaría de Energía, DOF. México.

NOM-020-ENER-2011 Eficiencia Energética en Edificaciones - Envolvente de Edificios para uso Habitacional. Secretaría de Energía, DOF. México.

Revitaliza Consultores. (2012). Sistema LEED. Disponible en: http://www.revitalizaconsultores.com/leed.html

Sisevive Ecocasa. (2013). Modelo del Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde Sisevive Ecocasa. Programa de Energía Sustentable en México Sener – GIZ. INFONAVIT. México.

Tovar-Jiménez E I, et al. (2016). Comparative analysis of cost and energy performance of earth construction and conventional systems, in two Latin-American cases: México City and Buenos Aires. 36th International PLEA Conference. Los Angeles, USA.

Ruiz R. (2007). Estándar Local de Confort Térmico para la Ciudad de Colima. Universidad de Colima. México.

BREEAM. (2016). Ene 01 Energy efficiency. Accesado en: http://www.breeam.com/BREEAMInt2013SchemeDocument/content/06_energy/ene_01_reduction_of_co2_emissions.htm

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

LA VISIÓN DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA EN PALABRAS DE LOS GRUPOS INVOLUCRADOS EN LA CONSTRUCCIÓN EN MÉXICO

Mtra. Isaura Elisa López Vivero
Departamento de Procesos y Técnicas de Realización División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas, Ciudad de México, Código Postal 02200, México,
Teléfono 53189183, ielv@correo.azc.uam.mx

Dr. Aníbal Figueroa Castrejón
Departamento de Medio Ambiente División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas, Ciudad de México, Código Postal 02200, México,
Teléfono 53824332, afc@correo.azc.uam.mx

Mtro. Juan Carlos Pedraza Vidal
Departamento de Evaluación del Diseño en el Tiempo División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas, Ciudad de México, Código Postal 02200, México,
Teléfono 53189152, jcapv@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

La investigación desarrollada en el presente trabajo implica una serie de entrevistas a diferentes actores involucrados en la industria de la Construcción en México, tanto en dependencias gubernamentales, de educación, particulares y de servicios, que visualizan a la Arquitectura Bioclimática desde sus diferentes campos de acción, convergiendo y divergiendo, lo que da como resultado un panorama amplio de hacia dónde vislumbran los grupos de decisión e influencia en el desarrollo urbano, el escenario de una disciplina cada vez más necesaria en los tiempos de crisis que sufre nuestro medio ambiente.

ABSTRACT

The research developed in this work involves a series of interviews with various actors involved in the construction industry in Mexico , both in government agencies, education , individuals and services that display the bioclimatic architecture from different fields of action , converging and diverging , which results in a broad picture of where glimpse decision groups and influence on urban, development stage of an increasingly necessary in times of crisis discipline afflicting our environment.

Palabras claves: Arquitectura bioclimática, construcción, normatividad, energías renovables.

ANTECEDENTES

La arquitectura es la actividad humana de diseñar, proyectar y construir espacios basados en criterios que usan las energías renovables en favor del espacio habitable y de la salud del usuario, y que a su vez son amigables con el medio ambiente. Sin embargo los alcances de esta actividad han cambiado desde el desarrollo de las actividades industriales, tan sólo en México la industria de la construcción ha aumentado su producción en un 3.1 % en el mes de junio de 2016[1], y a nivel mundial las grandes edificaciones, equipamientos e infraestructura hacen uso de los recursos naturales y energéticos en todo el planeta, lo que ha provocado cambios climáticos significativos en los últimos dos siglos, con efectos nocivos para la conservación del medio ambiente, la salud y la habitabilidad del hombre. No obstante las graves consecuencias están generando cambios de paradigmas, despertar de conciencia social, nuevas disciplinas educativas, productos de alta eficiencia energética, hasta llegar a nuevos panoramas económicos y de desarrollos nacionales e internacionales, lo que trasciende a la necesidad de regular las actividades que tengan relación con esta disciplina.

De aquí que el estudio, manejo y especialización de la Arquitectura se ha segregado en múltiples disciplinas complementarias que implican todos los procesos del desarrollo de una edificación e incluso de la infraestructura que lo contiene, desde su concepción hasta su mantenimiento, operación, reglamentación y legislación, lo que involucra a una amplia gama de profesionales involucrados en la modificación del entorno por la actividad constructiva.

Siendo que la industria de la construcción en México y en el mundo perdió en algún punto de la historia los fines para los que fue concebida, en los últimos dos siglos ha sido productora de grandes beneficios económicos y a la vez importantes afectaciones ambientales; se ha determinado que los edificios son consumidores del 60% de los materiales extraídos del suelo, subsuelo y que su

[1] http://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/

utilización y procesamiento junto a la actividad constructiva, generan aproximadamente la mitad de las emisiones de dióxido de carbono que se desechan a la atmósfera. [2]

Como resultado de la complejidad que implican todas éstas situaciones, en el año 1963 los hermanos Olgyay usan el término "Diseño Bioclimático" para enfatizar los vínculos y múltiples interrelaciones entre la vida y el clima en relación con el diseño arquitectónico, y desarrollan una metodología por la cual el diseño es capaz de responder satisfactoriamente a las necesidades climáticas de un proyecto[3].

Surge entonces la prioridad de la construcción bioclimática, con el objetivo principal de armonizar los espacios y para propiciar las condiciones de confort y bienestar para sus usuarios. Logrando un diseño lógico, con sentido común mediante el análisis de las variables climáticas y su relación con el metabolismo humano, abarcando también el uso óptimo de las energías renovables en pro del gasto energético, limitando a los climas extremos el uso de sistemas activos de climatización.

Normativamente su evolución ha sido un tanto dispersa, las autoridades buscan por diferentes instrumentos acercar a la sociedad al uso de la Arquitectura Bioclimática, partiendo desde estímulos económicos y fiscales, hasta generación indiscriminada de normas que en su mayoría son desconocidas o malinterpretadas por los profesionales encargados de aplicarlas y supervisarlas.[4]

Es entonces la intención de este artículo citar la voz de los actores en el ámbito nacional en materia de Arquitectura Bioclimática, como la batuta para establecer un diálogo que lleve a la comprensión y mejor ejercicio de nuestra disciplina en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

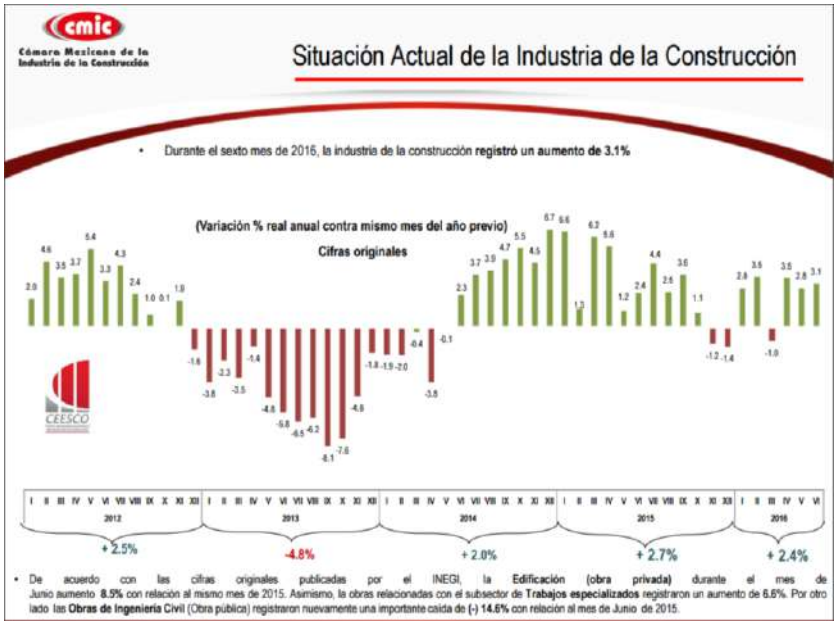


Figura 1 Gráfica de la situación actual de la Industria de la Construcción año 2016. INEGI 2016. CEESCO, CMIC.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron diversos especialistas con una importante trayectoria en materia de construcción, sustentabilidad, economía, investigación y normatividad. Las personas entrevistadas tendrían que estar inmersas en la toma de decisiones con respecto a la normatividad de la construcción en México y/o a nivel internacional en materia de sustentabilidad, bioclimatismo, construcción y energía; vinculados con el ámbito académico por la difusión y manejo de temas de actualidad hacia las nuevas generaciones; ejercer la profesión de la arquitectura desde el diseño, proyecto y ejecución de la arquitectura bioclimática a nivel nacional e internacional al menos durante los últimos diez años; tener una visión económica del impacto que la actual forma de construcción está repercutiendo en la selección de materiales, uso de nuevas tecnologías y rentabilidad de la edificación.

Las personalidades entrevistadas en los diferentes ámbitos fueron:

1. Oscar Manuel González Cuevas[5]
   Participante en el Comité encargado de las modificaciones a las NCT del RCDF

[2] Elisa Campbell Consulting &Innes Consulting (2006). Assessment of tools for rating the performance of existing buildings: a report on the options. GVRD.

[3] Olgyay, G. Victor /ARQUITECTURA Y CLIMA. MANUAL DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO PARA ARQUITECTOS.

[4] GIZ-INFONAVIT. (2011) Taller Hipoteca verde para el Sistema de calificación de las viviendas en materia energética y ambiental. México D.F: GIZ

[5] http://www.azc.uam.mx/prof_distinguidos/oscar_gonzalez.php

2. Julieta Boy Oaxaca[6][7]
   Gerente de Proyectos Torre Reforma LEED Platino Grupo LBR&A
3. Isaura González Gottdiener[8]
   Secretaria Técnica Coordinación de Investigación en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje. Facultad de Arquitectura UNAM
4. Raúl Huitrón Riquelme[9]
   Director General BIOMAH. Consultoría y Proyecto por más de 20 años en Arquitectura Bioclimática
5. Silvia de Schiller[10]
   Profesor Consultor UBA. Co-Director CIHE. Centro de Interpretación Hábitat y Energía
   Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires
6. José Picciotto Cherem[11]
   Director PICCIOTTO Arquitectos. Experto en Comisiones Nacionales e Internacionales de Cambio Climático
7. David Morillón Gálvez[12][13]
   Instituto de Ingeniería UNAM. Elaboración de certificaciones nacionales y guías CONAFOVI, CONAVI y Código de Edificación en Vivienda
8. Silvia Narváez Contreras[14]
   Consultoría en Finanzas y economía sustentable para los proyectos CIEMAAD, COBI, CONANP entre otros.
9. Odón de Buen Rodríguez[15]
   Director CONUEE
10. José Sarukhán Kermez[16][17]
    Director CONABIO

Se diseñó un cuestionario que sería contestado por los entrevistados, abarcando diferentes aspectos de tipo profesional, normativo, económico, social y finalmente contemplando aportaciones derivados de su función y/o ejercicio profesional.

Figura 2 Aspectos considerados en el diseño del cuestionario tipo para las entrevistas. López V. 2015

El cuestionario fue contestado de manera sistemática por los entrevistados, y del cual se ha analizado, concentrado y extraído la respuesta que representa ampliamente la opinión del panel:

[6] http://www.revistacyt.com.mx/index.php/contenido/avance-de-obra/65-los-detalles-de-la-grandeza
[7] http://noticias.arq.com.mx/Detalles/12919.html#.V7uz-5jhCUk
[8] http://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/semblanza_isaura_gonzalez_gottdiener_1.pdf
[9] http://biomah.wix.com/home
[10] https://www.researchgate.net/researcher/979945_Silvia_de_Schiller
[11] http://www.picciotto.com/
[12] http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/Entrevistas/Paginas/DavidMorillonGalvez.aspx
[13] http://www.posgrado.unam.mx/urbanismo/Doc/tutores/DavidMorillonGalvez.pdf
[14] https://www.linkedin.com/in/silvia-narv%C3%A1ez-contreras-31480087
[15] http://www.gob.mx/conuee/
[16] http://conacytprensa.mx/index.php/sociedad/personajes/2017-entrevista-de-semblanza-jose-sarukhan
[17] http://www.conabio.gob.mx/

PREGUNTA	RESPUESTA
2. ¿Consideraría que el manejo, implementación y evaluación de los criterios de la Arquitectura Bioclimática son exclusivos de especialistas?, ¿porqué?	2. No, la generación de criterios han salido por especialistas con el objeto de que se generalicen, popularicen en su uso y que el estudiante, técnicos, constructores, arquitectos, ingenieros y sobretodo los relacionados con los permisos de construcción puedan utilizarlos; han hecho los criterios especialistas pero para que sean utilizados por todos.
4. ¿Cuáles son los principales obstáculos que enfrenta la Arquitectura Bioclimática en materia de normatividad?	4. Se ha avanzado mucho en México en cuanto a normatividad pero sí creo que hacen falta incentivos para quien lo aplique, porque no me parece justo que un edificio que no ahorra energía pague los mismos impuestos que uno que si ahorra, esto debería acelerarse más, va muy lento y debería haber más incentivos para que a la gente le convenga que su edificio sea bioclimático porque al final todo esto puede implicar más inversión para la gente que construye y si realmente hay un incentivo tanto en la construcción como en la operación del edificio se va a tender más a adaptar las normas, igualmente hay que llevarlo del plano voluntario al obligatorio.
5. ¿Quiénes considera deberían ser los sectores más involucrados en la normatividad de Arquitectura Bioclimática y en qué aspectos?	5. La autoridad responsable de normar y plantear las modificaciones al RCDF, ya permitiéndose pasar de lo que puede ser una NOM a un reglamento que indica con que tienes que cumplir, ya que hay un grave rezago de lo que la autoridad pudiera plantearse, que finalmente va a ser en beneficio de nuestra sociedad porque tiene muchas consecuencias, no solamente medibles en energía, tiene consecuencias sociales, biológicas, psicológicas, económicas, de salud y demás. La autoridad sería la encargada de coordinar su elaboración, apoyados de una Comisión de diferentes especialistas realmente inmersos en el tema, estableciendo un tiempo finito para dar resultados.
6. En las actividades de su profesión ¿ha observado algún beneficio (económico, energético, social, cultural) al aplicar estrategias o mecanismos que se guíen por los principios de la Arquitectura Bioclimática?	6. Sí, claro, empecemos con que al usuario le llegan los beneficios económicos de las buenas prácticas de consumo, pero obviamente esto tiene un efecto multiplicador en términos de ahorro en un plazo aún largo pero constante, incluyendo una menor cantidad de huella ecológica con un menor impacto sobre el medio ambiente, además de que a nivel empresarial se crea un nicho de mercado cada vez más crítico, exigente, pero cada vez más dispuesto a pagar por sus productos como clientes de perfil económico alto, que por supuesto promueve afectaciones sociales positivas, mediante el convencimiento de las buenas prácticas que influyen culturalmente al personal que las usa.
7. ¿Cuál es su opinión de las certificaciones internacionales?[18]	7. Me parecen un buen instrumento y en general se utilizan para edificios muy caros, la certificación es cara, es algo que hay que entender y es necesario, hay opiniones que dicen que no aseguran un rendimiento energético, es decir, a la hora de estar dando el peso a una serie de elementos, puede no estar resultando tener esa reducción de consumo. Existen normas nacionales que pueden ser muy útiles en este respecto, pero que se encuentran perdidas en la práctica de los reglamentos, en este momento es importante llevar normas como una línea base, por lo menos la norma asegura ciertas prácticas mínimas.
10. ¿Existen en sus proyectos aportaciones de AB encaminadas a lograr un cambio de pensamiento o conciencia social respecto del uso de la misma?	10.Tiene que ver mucho con la participación de los usuarios en los proyectos, en nuestro caso particular son las escuelas, vamos a iniciar una norma para escuelas sustentables, donde una parte muy importante es el diseño bioclimático, como ya abordamos al usuario, las autoridades tienen la idea de que el alumno sea productivo y saque buenas calificaciones, con ellos tenemos muy definido el caso mediante un diagnóstico que hicimos en todos los climas del país, entonces en ese caso vamos encaminados a lograr una conciencia sobre la necesidad de tener mejores condiciones térmicas y a la vez tener un costo energético menor y económico.
13. ¿Qué impacto considera que tendría en el RCDF la inclusión de más normas propias de la Arquitectura Bioclimática?	13. Sería un impacto positivo, siempre y cuando exista un mecanismo de verificación adecuado; un efecto positivo en el aspecto ambiental en un corto plazo, tal vez en el sentido económico no sería inmediato porque su aplicación implica un gasto inicial elevado pero aquí entran dos factores fundamentales: uno es la empresa y otro el gobierno, este último si quiere convencer a las empresas de instaurar este tipo de arquitectura y de que se apeguen al reglamento tendrá que otorgar incentivos que convenzan y ayuden a llevarla a cabo.

[18] Garrido N. Certificación energética de los edificios. Sector terciario. Universidad Politécnica de Cataluña.

14. ¿Qué aspectos cree que serían los más relevantes en materia de Arquitectura Bioclimática en las construcciones actuales? (calidad del aire, control de niveles de ruido, ahorro de energía y servicios, humedad interior y temperatura)	14. Los aspectos mencionados en la pregunta son todos relevantes e interactúan entre sí. Lo importante en la valoración relativa de los mismos radica en atacar y resolver el origen del problema detectado o previsto. Es interesante considerar que, en todos y cada uno de los aspectos mencionados en la pregunta, la energía juega un rol inicial que produce un punto de partida y es la base de sustentación para los demás aspectos involucrados. Importante aclarar que no se trata solamente de 'ahorro', de por sí valioso, sino de 'eficiencia' en la producción de un hábitat edificado más acorde con el Desarrollo Sustentable.

CUESTIONARIO

1. ¿Qué es lo que hace Ud. en relación a la construcción?
2. ¿Consideraría que el manejo, implementación y evaluación de los criterios de la Arquitectura Bioclimática son exclusivos de especialistas?, ¿porqué?
3. ¿Qué modificaciones considera Ud. importantes en el Reglamento de Construcciones del DF y en las Normas Técnicas Complementarias?
4. ¿Cuáles son los principales obstáculos que enfrenta la Arquitectura Bioclimática en materia de normatividad?
5. ¿Quiénes considera deberían ser los sectores más involucrados en la normatividad de Arquitectura Bioclimática y en qué aspectos?
6. En las actividades de su profesión ¿ha observado algún beneficio (económico, energético, social, cultural) al aplicar estrategias o mecanismos que se guíen por los principios de la Arquitectura Bioclimática?
7. ¿Cuál es su opinión de las certificaciones internacionales?
8. ¿Cree Ud. que las certificaciones aportan beneficios sociales a los proyectos que las implementan?
9. En los proyectos que ha participado ¿se toma en cuenta y/o entrevista al usuario implicado en ellos, en qué forma?
10. ¿Existen en sus proyectos aportaciones de AB encaminadas a lograr un cambio de pensamiento o conciencia social respecto del uso de la misma?
11. ¿Cuáles son las formas de evaluación de un proyecto en materia de Arquitectura Bioclimática?
12. ¿Cuál considera que es la vía correcta para la implementación de la normatividad en materia de AB?
13. ¿Qué impacto considera que tendría en el RCDF la inclusión de más normas propias de la Arquitectura Bioclimática?
14. ¿Qué aspectos cree que serían los más relevantes en materia de Arquitectura Bioclimática en las construcciones actuales? (calidad del aire, control de niveles de ruido, ahorro de energía y servicios, humedad interior y temperatura)

Figura 3 Cuestionario tipo para las entrevistas. López V. 2015

CONCLUSIONES

El material obtenido de las entrevistas es de suma riqueza intelectual, ya que permite vislumbrar la apreciación personal de cada actor, los cuales de una manera lógica se inclinan por su área de desarrollo, sin embargo sus coincidencias son sustanciales y concretas.

Este estudio nos permite direccionar la intencionalidad de varios aspectos relacionados con la Arquitectura Bioclimática, como son:

1. La ética: Es clara la definición de un bien común por parte de todos los entrevistados: las buenas prácticas de la arquitectura, ya que lejos de citar a la Arquitectura Bioclimática como una disciplina innovadora y de creación reciente, la identifican como el buen ejercicio de la profesión, el más antiguo, el más lógico, siendo en esencia arquitectura en su más pura expresión, sin convertirla en una profesión elitista y excluyente, por el contrario con una responsabilidad social y ambiental perenne, que requiere de un rescate de sus objetivos originales por sobre los intereses económicos de unos pocos; estos personajes han sobrepasado el estereotipo del ego profesional por el de la conciencia y en su quehacer diario han plasmado el carácter del profesionista bioclimático sin querer ser estereotipado en ello.

2. La normatividad: Se ha hecho presente identificando a las autoridades y los instrumentos que los profesionales involucrados aceptan como efectivos y acertados para la ejecución de los criterios bioclimáticos, sin el prejuicio de una imposición con beneficios políticos y/o económicos por parte del gobierno o particulares. De esta forma no se está en contra de las reglamentaciones y normatividades; es el Reglamento de Construcción el documento más aceptado en las entidades para normar y obedecer, pero debe ir acompañado de mecanismos de verificación eficientes, que exige la preparación de quienes se encargan de aplicarlo.[19]

   "*CumpliendoPlasPnormasPpodemosPhacerPbuenaPArquitectura".*

   I.Gottdiener

3. La tecnología: El uso de recursos tecnológicos para la realización de un proyecto no sólo es innovador sino necesario, los edificios son consecuencia de un análisis, debe haber cálculo y simulación acompañada de la correcta intuición en el desarrollo de cualquier obra, cada etapa: construcción, operación y mantenimiento cumplen un compromiso. El uso de la tecnología debe ir ligada al usuario ya que es parte fundamental de la operación del edificio, de nada vale implementar los últimos avances tecnológicos si la ignorancia o inoperabilidad prevalece.

[19] Arnal, Betancourt (2004). Reglamento de Construcciones del DF. Código Administrativo del Estado de México. (2009). Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Reglamento de construcciones del Distrito Federal (2016) fecha de publicación 17 de junio de 2016, No. 96 Bis, décima novena época.

4. La economía: Es un factor que no sólo interesa a la industria, el usuario es susceptible de apreciar que las buenas prácticas en el diseño, uso de materiales y sistemas de eficiencia energética en la vivienda que habita conlleva beneficios económicos que se reflejan en su pago de energía eléctrica, consumo de gas y agua principalmente. Tenemos muchas veces que convencer a los usuarios y/o empresarios que la Arquitectura Bioclimática responde a las necesidades de sus proyectos, la mayoría de las veces no piden un proyecto bioclimático, hay que sugerirlo y aportar pruebas que respalden lo dicho.

5. La calidad: "*Un edificio tiene que ganarse el derecho a existir lo que significa que está respondiendo a su lugar, sin afectarlo y sin afectar los intereses naturales de la zona, cada detalle tomado en cuenta en su diseño hará la diferencia entre una buena decisión y una mala decisión. La evaluación y monitoreo de los factores que condicionan un edificio son obligatorios en cualquier proyecto, sino le das seguimiento a una obra y algo sale mal, no te preocupes, ella te llamará y te recordará tú descuido".*

Raúl Huitrón Riquelme.

6. La sociedad: Ha cambiado, la cultura de la sustentabilidad está presente, tenemos una sociedad más informada y es necesario que también sea crítica y participativa en los temas relevantes relacionados con el medio ambiente, la salud y el uso de los recursos; las últimas generaciones han crecido con la zozobra de la escasez de recursos, condicionados cada vez más a los cambios de mentalidad, no son responsables de los derroches energéticos ni devastaciones naturales pero son factor clave en la recuperación y la evolución de las mismas, son más fuertes, ya no buscan sobrevivir, se adaptan a el medio, las normativas y restricciones, aún no razonan porque deben hacer o no hacer algo pero sin duda son más abiertos y receptivos al uso de las ecotecnologías y la Arquitectura Bioclimática.

7. El futuro: Está aquí, existe una crisis energética que es una buena oportunidad para cambiar, de paradigmas, de cultura, de energías, es tiempo, la normatividad ambiental, energética, sustentable ha sobrepasado a la conciencia, como parte de una necesidad en beneficio de la sociedad, el arquitecto está obligado a hacer diseño bioclimático porque es la esencia de la Arquitectura, no hay obstáculos para normar la Arquitectura Bioclimática, está bien hecha, la sustentabilidad es ya parte de nuestro lenguaje común, aunque verde no es certificación ni eficiencia tampoco, la construcción vertical es una realidad en diversos estados de la República Mexicana enfrenta retos y sus aciertos están en función de una adecuada planeación y regulación.

REFERENCIAS

1. Arnal, Betancourt (2004). Reglamento de Construcciones del DF.
2. Código Administrativo del Estado de México. (2009)
3. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (2005). Uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales.
4. Elisa Campbell Consulting &Innes Consulting (2006). Assessment of tools for rating the performance of existing buildings: a report on the options. GVRD.
5. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Reglamento de construcciones del Distrito Federal (2016) fecha de publicación 17 de junio de 2016, No. 96 Bis, décima novena época.
6. Garrido N. Certificación energética de los edificios. Sector terciario. Universidad Politécnica de Cataluña.
7. GIZ-INFONAVIT. (2011) Taller Hipoteca verde para el Sistema de calificación de las viviendas en materia energética y ambiental. México D.F: GIZ
8. Olgyay, G. Victor /ARQUITECTURA Y CLIMA. MANUAL DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO PARA ARQUITECTOS.
9. J.M. Evans y S. de Schiller. (1988) Diseño Bioambiental y arquitectura solar. Eudeba. Ediciones Previas.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

http://www.azc.uam.mx/prof_distinguidos/oscar_gonzalez.php
http://www.revistacyt.com.mx/index.php/contenido/avance-de-obra/65-los-detalles-de-la-grandeza
http://noticias.arq.com.mx/Detalles/12919.html#.V7uz-5jhCUk
http://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/semblanza_isaura_gonzalez_gottdiener_1.pdf
http://biomah.wix.com/home
https://www.researchgate.net/researcher/979945_Silvia_de_Schiller
http://www.picciotto.com/
http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/Entrevistas/Paginas/DavidMorillonGalvez.aspx
http://www.posgrado.unam.mx/urbanismo/Doc/tutores/DavidMorillonGalvez.pdf
https://www.linkedin.com/in/silvia-narv%C3%A1ez-contreras-31480087
http://www.gob.mx/conuee/
http://conacytprensa.mx/index.php/sociedad/personajes/2017-entrevista-de-semblanza-jose-sarukhan
http://www.conabio.gob.mx/
http://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE LA ARQUITECTURA TRADICIONAL Y LA AUTOCONSTRUCCIÓN CONTEMPORÁNEA EN TRES REGIONES DE MÉXICO MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ENERGÉTICO

Guillermo Ivan Lastra García y Kenzo Mauricio Arvizu Hayama
Posgrado en Diseño Bioclimático, Edificio D, 1er. piso. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
Av. San Pablo 180 Col. Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Ciudad de México, 5318 9110, ivanlastra@hotmail.com.

Gloria María Castorena Espinosa
Área de Arquitectura Bioclimática, Departamento de Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
Av. San Pablo 180 Col. Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Ciudad de México, 5318 9110, gmce@correo.azc.uam.mx.

RESUMEN
Ante el alto costo energético y ambiental que representa la adopción de los sistemas de aire acondicionado en un futuro cercano en todo el territorio nacional, equivalente a 50 millones de toneladas de CO_2 adicionales al año, es urgente la implementación y difusión de materiales más eficientes como parte de un plan de construcción de vivienda. La reincorporación de la tecnología basada en el uso tradicional de la tierra representa significativos ahorros energéticos y, en consecuencia, una sustancial disminución en la emisión de CO_2 por metro cuadrado construido, particularmente en los climas cálidos del país que representan el 76.8% del total del territorio nacional. Mediante dos herramientas de evaluación energética (EnergyPlus y Ener-Habitat), se ha comprobado la alta eficiencia del adobe frente al block de hormigón celular en tres ciudades del país que se suman a la cada vez mayor evidencia que demuestra su alta eficiencia y viabilidad como material de construcción para la mayor parte del territorio nacional.

ABSTRACT
Considering the high energetic costs and the environmental consecuences that could represent the adoption of HVAC systems in the future for mexican territory, equivalent to 50 million tons of CO2 a year, it is urgent to deploy the use of more efficient construction materials as a part of a national plan of building dwelling. The use of traditional mudbricks represents a significant energy savings and consequently, a substantial reduction in CO2 emissions per square meter built, particularly in hot climates, that represent 76.8 % of total national territory. Through two energy analysis tools (EnergyPlus y Ener-Habitat), it has been proved the high efficiency of adobe against the Autoclaved aerated concrete (AAC) in three mexican cities which add to the growing evidence demonstrating its high efficiency and viability of this construction material for most of the country.

Palabras clave: Adobe, block, AAC, confort térmico, eficiencia energética, Acapulco, Monterrey, Ciudad de México, Ener-Habitat, EnergyPlus, Open Studio.

INTRODUCCIÓN
Las ciudades consumen alrededor del 80% de la energía global y son responsables de aproximadamente el 60% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ash *et al*., 2008; Ceron-Palma, *et al.*, 2013). Entre los mayores emisores de CO_2, el sector de la construcción destaca por ser el responsable de aproximadamente el 40% del consumo mundial y más del 30% de las emisiones de CO_2, de las cuales, la mayoría se atribuye a los sistemas de aire acondicionado (Meggers *et al.*, 2012; Yang, Yan & Lam, 2014; Hernández-Pérez *et al*., 2014). Esta tendencia, aunque mundial, difiere en las diferentes regiones, *e.g.* en la Unión Europea, el 57% de la energía utilizada es para la calefacción, el 25% para calentar el agua, el 11% para los electrodomésticos y el 7% para cocinar (Airaksinen & Matilainen, 2011) mientras que en las zonas más cercanas al Ecuador los valores se invierten casi por completo.

Particularmente en México, la energía consumida en el sector de la vivienda se utiliza principalmente para el calentamiento de agua (29%), la preparación de alimentos (52%), la iluminación y el uso de artefactos eléctricos (19%), mientras que las emisiones de gases de efecto invernadero asociados con el consumo de electricidad varía en función de la necesidad de sistemas de refrigeración artificiales y/o sistemas de calefacción en cada región (Ceron-Palma *et al*., 2013), que hasta este momento se encuentran en niveles relativamente bajos. No obstante, se estima que este panorama se modificara radicalmente en las próximas décadas, pues la mayor demanda energética tendrá su origen en los países de ingresos bajos y medios debido al aumento en el uso de los sistemas de aire acondicionado (Yang, Yan & Lam, 2014; Davis & Gertler, 2015), asociado tanto a la demanda de vivienda por el crecimiento total de la población, como al acceso económico de estas tecnologías conforme la industria se expanda territorial y comercialmente.

Se calcula que para el año 2050, México tendrá 160 millones de habitantes distribuidos en 50 millones de hogares. Para satisfacer la demanda de vivienda deberán ser construidos cerca de 11 millones de hogares en 2030 y se tendrán que reemplazar, parcial o totalmente, alrededor de 9 millones (Schwanse, 2014), lo que elevará considerablemente la emisión de CO2 en México, sobretodo si se considera el origen de la generación energética y las practicas constructivas del país.

En México, los combustibles fósiles representan el 79% del origen energético nacional, mientras que las energías renovables representan el 16.5 % y la generación nuclear el 4.5 % (Ceron-Palma, *et al.*, 2013). Esto mantuvo el costo en emisiones de CO_2 con pocos cambios entre 2002 y 2011, con 480 gCO_2/kWh (SEMARNAT, 2013; ABB, 2012), hasta alcanzar los 454 gCO_2/kWh en 2015 (SEMARNAT, 2015).

Por otro lado, bajo proyecciones conservadores, se estima que en las siguientes décadas, el uso de aire acondicionado en las regiones más cálidas del país crecerán, del 13% registrado en 2010, hasta el 71%, lo que implicaría un aumento en el consumo de electricidad del 64% y una emisión anual de 20 millones de toneladas extra de CO_2 (Davis & Gertler, 2015).

Por último, la forma de construcción México se encuentra en constante proceso de regulación, por lo que solo el 40% de las viviendas están formalmente registradas y cumplen con los requerimientos constructivos, mientras que el 60% restante corresponde a la autoconstrucción (Schwanse, E., 2014). El 40% registrado está compuesto, en su mayor parte, por las viviendas construidas bajo los esquemas gubernamentales de vivienda que han tendido a la réplica constructiva (en diseño y sistemas constructivos) en todo el país, sin tener en cuenta su enorme diversidad climática (Ceron-Palma *et al.,* 2013; Ochoa *et al.*, 2014), lo cual ha elevado el uso de energía en las viviendas que cuentan con aire acondicionado y podría representar un grave problema para la regulación de las emisiones de CO_2 en las siguientes décadas. El otro 60% de las viviendas, corresponde a la autoconstrucción (Schwanse, 2014) que, si bien constituye un grave riesgo para la seguridad y el consumo energético, representan la realidad de la construcción en México y una oportunidad para la implementación de estrategias sustentables, pues parte de la capacidad de la comunidad para colaborar en el diseño y toma directa de decisiones.

Bajo el esquema de la autoconstrucción, aproximadamente el 70% de las viviendas se construyen con blocks de hormigón celular (*Autoclaved Aerated Concrete*, AAC), que se considera una opción viable y económica, pero también sinónimo de modernidad y bienestar (Fry, 2008) en comparación con los sistemas tradicionales (como el Adobe, el bahareque o incluso el ladrillo), aunque la evidencia disponible (*e.g.* Porta-Gándara, Rubio & Fernández, 2002; Ochoa *et al*., 2014) demuestra su bajo desempeño térmico para los diversos climas en México. Particularmente en las zonas cálido secas del país, esto puede representar un aumento en la demanda energética, lo que eleva la vulnerabilidad de la comunidad y compromete la capacidad del país para reducir más el costo del CO_2 por la generación energética.

METODO

Se evaluaron tres ciudades: Acapulco, Ciudad de México y Monterrey, que si bien, no todas cumplen las características óptimas para el uso de la masividad, constituyen una posibilidad para comparar un amplio espectro de los climas predominantes del país;
Bajo 2 diferentes sistemas constructivos: S.C.1. Adobe y S.C.2. AAC (block de hormigón celular);
En 2 condiciones: Con sistemas de aire acondicionado y calefacción (HVAC) y sin estos sistemas;
Para evaluar el desempeño térmico de las edificaciones en estas condiciones, se utilizaron dos diferentes herramientas de análisis térmico: EnergyPlus, por medio de Open Studio y Ener-Habitat.

Sistemas Constructivos

El Sistema Constructivo 1. Adobe (S.C.1.), representa el sistema tradicional empleado en todo el país y el Sistema Constructivo 2. Block de hormigón celular (S.C.2.), el sistema más utilizado actualmente en todo el territorio mexicano. Los componentes de cada sistema constructivo, así como sus características, se presentan en las tablas 1 y 2.

		Acabado	Espesor (m)	Cond. (W/m•K)	Densidad (kg/m³)	Calor esp. (J/kg•K)	Absortancia térmica	Abs. Solar y visual
S.C.1. Adobe	*Loseta de barro*	Media liso	0.015	0.7	1970	800	0.9	0.7
	Capa de barro	Rugosa	0.15	0.58	1500	1480	0.9	0.7
	Mortero de cal	Medio liso	0.015	0.87	1600	870	0.9	0.2
	Adobe	Rugosa	0.3	0.58	1500	1480	0.9	0.7
S.C.2. Block de hormigón (AAC)	*Cemento Portland*	Medio liso	0.2	1.35	1800	1000	0.9	0.7
	Mortero de cemento	Medio liso	0.015	1	1800	1000	0.9	0.7
	AAC	Rugosa	0.15	0.12	550	1004	0.9	0.7

Tabla 1. Características de los sistemas constructivos.

S.C.1. Adobe		*S.C.2. AAC*	
Techos	**Muros**	**Techos**	**Muros**
Loseta de barro	Mortero de Cal	Cemento Portland	Mortero de Cemento
Capa de lodo	Adobe		Block AAC
Loseta de barro	Mortero de Cal		Mortero de Cemento

Tabla 2. Sistemas constructivos y componentes.

Localidades

	Acapulco	CDMX	Monterrey
Locación	16.51, -99.54	19.43, -99.1	25.40, -100.16
Elevación	30	2,234	495
Köppen-García	Aw1(w)igw" Cálido húmedo isotermal tipo ganges con canicula	Cb w1(w)(i')g Templado con poca oscilación, tipo Ganges sin canicula	(A)Ca(w0)(e')w" Semi cálido extremoso, no tipo Ganges, con canicula
Temp Max	29.5ºC	27.8ºC	28.3ºC
Temp Prom	25.1ºC	24.8ºC	22.6ºC
Temp Min	17.4ºC	22.1ºC	16.8ºC
Precipitación	750mm	912.9mm	63mm

Tabla 3. Características de las tres diferentes ciudades.

Herramientas de Análisis Energético

Open Studio es un conjunto de herramientas de diseño para la evaluación energética de las edificaciones utilizando EnergyPlus, fue diseñado por el Departamento de EE.UU. de Energía (DOE).

Ener-Habitat es una herramienta de análisis diseñada por un grupo de seis universidades mexicanas (UNAM, UNISON, UAT, UCOL, CENIDET y UAM) coordinadas por el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM.

Ambas herramientas de análisis permiten el análisis en condiciones naturales y con los sistemas de HVAC. En ambos modelos de simulación, los valores de los materiales son los mismos, sin embargo, Ener-Habitat solo puede evaluar un elemento a la vez, por lo que el análisis del modelo constructivo completo solo fue posible en Open Studio y EnergyPlus, y consistió en una cubierta cubica sin aberturas de 5x5m y una altura de 3.1m. Se mantuvieron los elementos constructivos por default para "Midrise Apartment", excepto los que corresponden a muros y pisos, en cuyos casos se reemplazaron por S.C.1. y S.C.2.

Con Sistemas de HVAC

La evaluación se realizó mediante Open Studio utilizando los sistemas recomendados por *default* para la categoría "Midrise Apartment", basado en las especificaciones de ASHRAE (2004) para equipos de climatización en edificaciones construidas después de 1981 (Deru *et al*., 2011).

Sin Sistemas de HVAC

La comparación de los dos sistemas en condiciones sin aire acondicionado consistió, en Ener-Habitat, en la evaluación del día típico de marzo, junio, septiembre y diciembre. En EnergyPlus las simulaciones corresponden a los equinoccios y solsticios de 2016. Las figuras muestran las mismas variables: sistemas constructivos, temperatura exterior y rango de confort, que corresponde, en EnergyPlus al *Adaptative-Average* de Ecotect y en Ener-Habitat al rango propuesto por Morillón-Gálvez (2004) adaptado para México a partir del modelo de Humphreys y Nicol (Huelsz, Barrios & Rojas, 2014).

En Ener-Habitat, los resultados de las simulaciones en condiciones naturales se han realizado tomando exclusivamente el muro sur, por ser el más critico para el territorio mexicano y en EnergyPlus el mismo modelo que el utilizado para las simulaciones con sistemas de HVAC.

RESULTADOS

Las figuras muestran las mismas variables en ambas herramientas: materiales de construcción, la temperatura exterior y la zona de confort que, para EnergyPlus se utilizó el Confort Adaptativo Promedio de Ecotect y en Ener-Habitat del modelo propuesto por Morillón Gálvez, adaptada para México a partir del modelo de Humphreys y Nicol (Huelsz, Barrios & Rojas, 2014) .

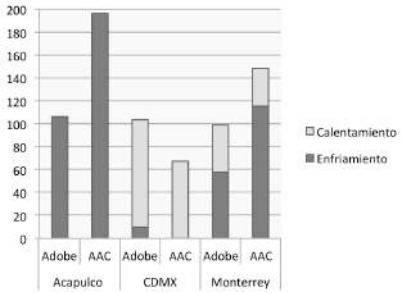
Con el objetivo de mantener las mismas unidades para facilitar el análisis, los datos de EnergyPlus, en J/m^2 han sido convertidos a kWh/m^2.

Rendimiento Con Sistemas de HVAC

Como se puede observar en la tabla 4 y la gráfica 1, Open Studio muestra un desempeño anual superior del Sistema Constructivo 1. Adobe, en las zonas cálidas (Acapulco y Monterrey) y un desempeño inferior para la zona templada (Ciudad de México) en condiciones con sistemas de HVAC.

		Enfriamiento	Calentamiento	Total	Ahorro energetico
Acapulco	*S.C.1. Adobe*	106.33	0.00	106.33	**45.85%**
	S.C.2. AAC	196.37	0.00	196.37	
CDMX	*S.C.1. Adobe*	9.75	94.38	104.13	**-53.77%**
	S.C.2. AAC	0.00	67.72	67.72	
Monterrey	*S.C.1. Adobe*	57.59	42.01	99.59	**32.67%**
	S.C.2. AAC	115.61	32.33	147.94	

Tabla 4. Rendimiento energético por unidad en HVAC (kWh/m^2).

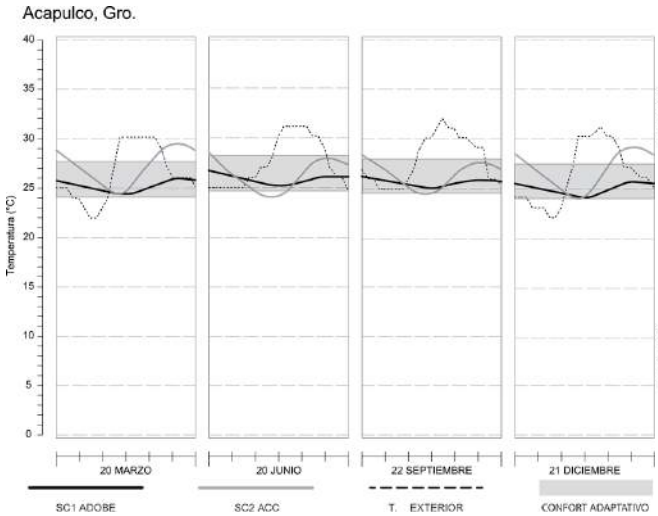


Gráfica 1. Consumo energético por unidad con HVAC (kWh/m^2).

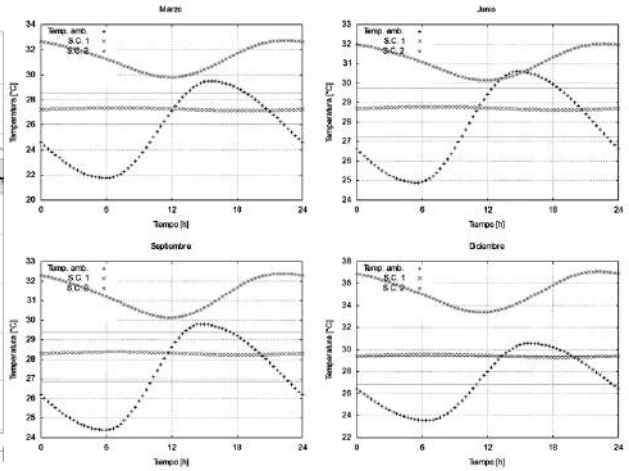
La gráfica 1 muestra el desempeño de cada sistema constructivo en relación a las necesidades de calentamiento y enfriamiento. Se puede observar como el S.C.1., reduce significativamente el consumo por concepto de enfriamiento en Acapulco y Monterrey, con una significativa reducción de más del 45% y del 32% respectivamente, mientras que en la Ciudad de México se observa un mayor gasto energético (de 53.77%) en el desempeño energético con el Sistema Constructivo 1.

Rendimiento Sin Sistemas de HVAC

Como se puede observar en la gráfica 2, en la simulación de EnergyPlus sin HVAC para Acapulco, el S.C.1. (adobe) muestra una oscilación cercana a la horizontal y completamente dentro de la zona del confort adaptativo a lo largo de todo el año, con oscilaciones que no superan los 2ºC, a pesar de que la temperatura exterior llega a alcanzar hasta los 9º en marzo. En contraste, el S.C.2. (AAC) muestra una oscilación de casi 5ºC en los cuatro periodos.



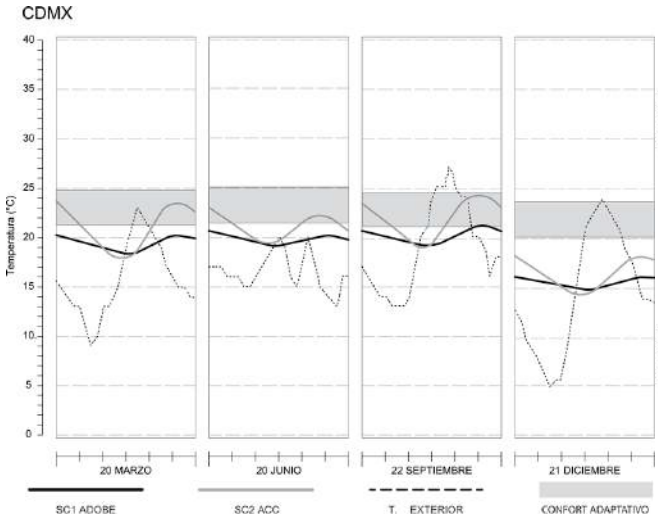
Gráfica 2. Acapulco sin HVAC: Open Studio.



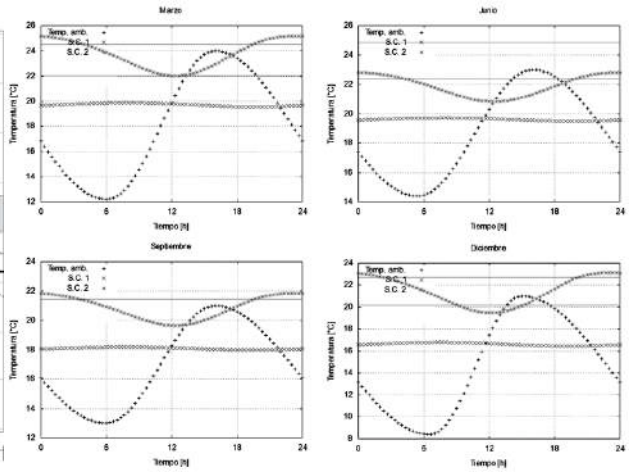
Gráfica 3. Acapulco sin HVAC: Ener-Habitat.

Por otro lado, la simulación en Ener-Habitat para el muro sur mantiene la tendencia del S.C.1 dentro del rango de confort a lo largo de todo el año, mientras que el S.C.2. muestra un retardo térmico que alcanza los 33ºC en la media noche de marzo y junio y de hasta 37ºC en las noches de diciembre.

En la gráfica 4 se observa cómo, de acuerdo a la simulación con EnergyPlus, ninguno de los dos sistemas constructivos se encuentra dentro del rango de confort adaptativo, no obstante, el S.C.1. mantiene una oscilación menor de hasta 3º en marzo y de alrededor de 2º en diciembre, mientras que el S.C.2. rebasa las oscilaciones de 5ºC durante septiembre. Se puede observar como, la Ciudad de México es la localidad con un comportamiento térmico exterior más inestable en relación a las otras dos ciudades y cómo, solo durante los picos más altos por las tardes, entran por pocas horas al rango de confort durante septiembre y diciembre.



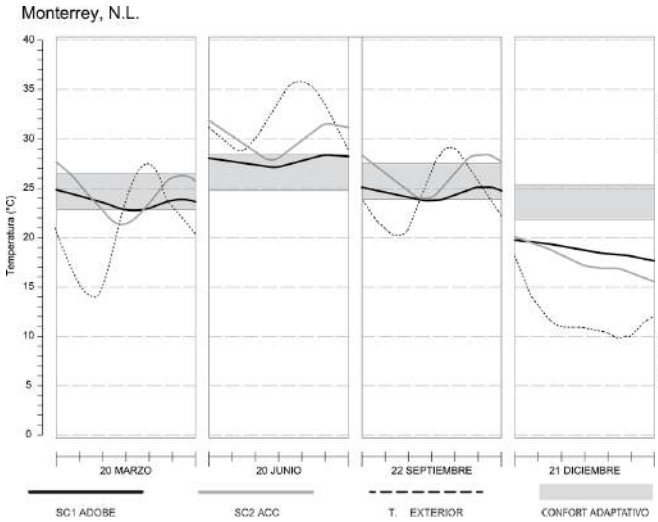
Gráfica 4. Ciudad de México sin HVAC: Open Studio.



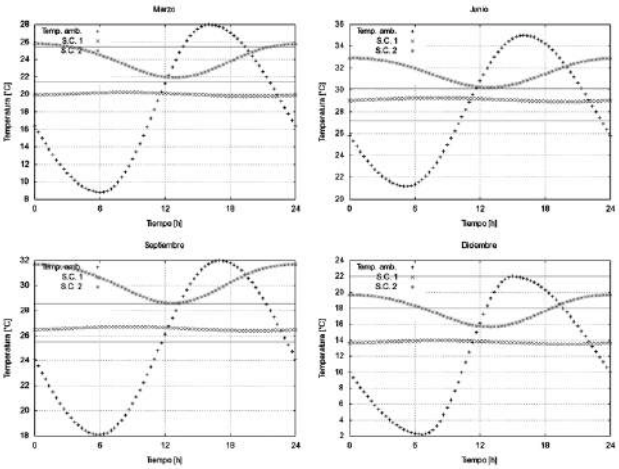
Gráfica 5. Ciudad de México sin HVAC: Ener-Habitat.

Las simulaciones en Ener-Habitat (gráfica 5) confirman la mayor estabilidad del S.C.1. a lo largo de todo el día de los días típicos para cada mes, pero muestran cómo el S.C.2., aunque más oscilante, se mantiene por más tiempo dentro del promedio de rango de confort adaptativo.

En la simulación de EnergyPlus para Monterrey se distingue como, durante marzo, junio y septiembre, el S.C.1. se mantiene dentro del rango de confort durante todo el día a pesar de las oscilaciones de alrededor de 3º en marzo, y 2º en junio y septiembre. Específicamente en la simulación correspondiente a diciembre, se observa como las temperaturas descienden significativamente, hasta llegar a los 13ºC por debajo del rango inferior de confort, lo que se puede atribuir a la predominancia de vientos del norte pues, en la simulación en el muro sur hecha con Ener-Habitat (gráfica 5), se observa la misma tendencia térmica de la temperatura ambiente, aunque también, con un desempeño en el S.C.1. Adobe, de hasta 4ºC por debajo del rango mínimo de confort.



Gráfica 4. Monterrey sin HVAC: Open Studio.



Gráfica 5. Monterrey sin HVAC: Ener-Habitat.

DISCUSIÓN

Incluso bajo el esquema más conservador, la adopción del sistema constructivo tradicional (S.C.1. Adobe) ayudaría a reducir significativamente la demanda energética en los climas cálidos y secos de México que, combinados, ocupan el 76.8% del territorio total del país (CONAGUA, 2016).

		Enfriamiento	Calentamiento	Total	Ahorro energetico
Acapulco	*S.C.1. Adobe*	10,633	-	10,633	**45.85%**
	S.C.2. AAC	19.636.67	-	19,637	
CDMX	*S.C.1. Adobe*	975	9,438	10,413	**-53.77%**
	S.C.2. AAC	-	6,772	6,772	
Monterrey	*S.C.1. Adobe*	5,759	4,201	9,959	**32.67%**
	S.C.2. AAC	11,561	3,233	14,794	

Tabla 5. Rendimiento y ahorro energético con sistemas de HVAC por un departamento de 100m^2 (kWh/m^2).

	Adobe	AAC	Ahorro en CO_2 (tons)
Acapulco	4.83	8.92	**4.09**
CDMX	4.73	3.07	**-1.65**
Monterrey	4.52	6.72	**2.19**

Tabla 6. Ahorro al año de emisiones de CO_2 por un departamento de 100m^2.

En México, con un costo de 454gCO_2 por kWh ((SEMARNAT, 2015).), el costo en reducción de emisiones de CO_2 por un apartamento de 100m^2 seria de 4.09 toneladas en Acapulco y 2.19 toneladas para Monterrey. Considerando que las emisiones *per capita* en el país era de 3.9 toneladas en 2011 (World Bank, 2016), el ahorro de las emisiones es muy significativo.

Por otro lado, el déficit en el desempeño energético que se observa en la Ciudad de México hace evidente la posibilidad de flexibilizar los criterios de los sistemas de climatización artificial pues, paradójicamente, es la única ciudad de las tres evaluadas donde casi ninguna vivienda cuenta con sistemas de HVAC, como ocurre en las zonas más templadas y frías de todo el país (Davis & Gertler, 2015). E incluso, en las zonas más cálidas del país, se puede asegurar que la gran mayoría del 60% de las viviendas construidas bajo el esquema de la autoconstrucción, no cuentan con ningún sistema de aire acondicionado, por lo que la adopción de un sistema más eficiente puede representar no solo una disminución en el consumo de energía y la emisión de CO_2, sino también una forma para elevar la calidad de vida de los habitantes.

La factibilidad del S.C.1. para mantener la sensación de confort sin necesidad de aire acondicionado, incluso en las condiciones donde se encuentra por debajo de la zona de confort adaptativo se debe, por un lado, al alto valor del calor específico de la tierra (1480 J/kgK, tabla 1) que incrementa su capacidad de retardo térmico y evita los cambios abruptos en la temperatura del aire interior, favoreciendo la sensación de confort (Evans, 2007) y, por otro, a la habilidad de los mismos individuos para ampliar su rango de confort de forma consciente gracias a los patrones culturales que disminuyen la necesidad del aire acondicionado (Yang, Yan & Lam, 2014) como ocurre, por el momento, en la Ciudad de México.

Estos resultados se suman a los hechos en otras ciudades del territorio nacional (*e.g.* Lastra & Castorena, 2016) que demuestran que, si bien las características de la arquitectura tradicional en las diferentes ciudades es muy diversa (especialmente por las diferencias en los

índices de humedad), la simulaciones de la misma configuración, han demostrado que la readopción de los sistemas constructivos basados en el uso de la tierra (adobe, tapial y las variantes de bahareque), representan un ahorro significativo en términos de energía consumida y emisiones de CO_2 al año bajo los esquemas de aire acondicionado y que, su uso en condiciones sin aire acondicionado es viable bajo los esquemas culturales actuales que permiten la flexibilización del rango de confort.

Considerando que por ahora solo el 13% de las viviendas cuenta con un sistema de HVAC, los esfuerzos en cuanto a investigación y difusión deberían dirigirse a elevar la eficiencia de la vivienda mexicana sin la necesidad de recurrir a sistemas que elevarían el consumo energético y el gasto familiar. En este sentido, la autoconstrucción del 60% de las edificaciones en México representa una gran posibilidad para la implementación de sistemas pasivos a través de la participación activa de los habitantes y la difusión de las características de los sistemas constructivos, particularmente en un país como México, donde coinciden las condiciones climáticas favorables, la participación activa en la construcción y el alto índice de la población con acceso a la educación universitaria, con 23%, mientras que países como Austria e Italia tienen el 21%, Turquía el 19% y Brasil el 13% (OCDE, 2013).

REFERENCIAS

ABB. (2012). Trends in global energy efficiency 2011 http://goo.gl/pVXhq7 Consultado el 06.11.15

Airaksinen M. & Matilainen P. (2011). A Carbon Footprint of an Office Building, Energies, Vol. 4, No. 1, p. 1197-1210.

Ash C., Jasny B., Roberts L., Stone R. & Sugden A. (2008). Reimagining cities e introduction. Science, Vol. 319, p. 739.

Ceron-Palma I., Sanye-Mengual E., Oliver-Sola J, Montero J. I., Ponce-Caballero C. & Rieradevall J. (2013). Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico, Habitat International, Vol. 38, No. 1, p. 47-56.

CONAGUA. (2016). El Clima en México. http://goo.gl/4vz7nT. Consultado el 14.07.16.

Davis L. W. & Gertler P. J. (2015). Climate change could drive air conditioning to boost carbon emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 112, No. 19, p. 5962-5967.

Evans J. M. (2007). The Comfort Triangles: A New Tool for Biocliatc Desgin p. 66, Technische Universiteit Delft.

Fry, M. (2008). Mexico's Concrete Block Landscape: A Modern Legacy in the Vernacular. Journal of Latin American Geography, 7(2): p. 35-58.

Hernández-Pérez I., Álvarez G., Gilbert H., Xamán J., Chávez Y. & Shah B. (2014). Thermal performance of a concrete cool roof under different climatic conditions of Mexico, Energy Procedia, Vol. 57, No. 777, p. 1753-1762.

Huelsz G., Barrios G. & Rojas J. (2014). Ener-Habitat. Manual de uso, p. 53, Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México.

Lastra G.I. & Castorena G.M. (2016). Assessment the traditional building materials as an effective alternative to face the climate change challenges in Mexico. A comparative study with free available analysis tools. PLEA 2016 Los Angeles – 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments, p. 444-451

Meggers F., Leibundgut H., Kennedy S. Qin M., Schlaich M., Sobek W. & Shukuya M. (2012). Reduce CO_2 from buildings with technology to zero emissions, Sustainable Cities and Society, Vol. 2, No.1, p. 29-36.

Morillón-Gálvez D., Saldana-Flores R. & Tejeda-Martínez A. (2004). Human bioclimatic atlas for Mexico, Solar Energy, Vol. 76, No. 6, p. 781-792.

OCDE (2013). Panorama de la Educación 2013. https://goo.gl/yMpdsO. Consultado en 04.05.16.

Ochoa J. M., Marincic I., Alpuche M. G., Duarte E. A., Gonzalez I., Huelz G. & Barrios G. (2014). Cost benefit energy analysis of the building envelope systems with Ener-Habitat. In Energy Procedia, Vol. 57, No.1, p. 1792-1797.

Porta-Gándara M. Á., Rubio E. & Fernández J. L. (2002). Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja California dwellings Building and Environment, Vol. 37, No. 10, p. 993-1001.

Schwanse, E. (2014). The Mexican Experience in the Social Housing Sector and Programs for Green Housing, Journal of Architectural Engineering Technology, Vol.3, No. 2, p. 1-5.

SEMARNAT. (2013). Programa GEI México. http://goo.gl/0auLPg. Consultado el 25.02.16.

SEMARNAT. (2015). AVISO para el reporte del Registro Nacional de Emisiones. http://goo.gl/XyNQor. Consultado el 14.07.16.

Yang L., Yan H. & Lam J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - A review, Applied Energy, Vol. 115, No. 1, p. 164-173.

World Bank (2016). Emisiones de CO_2 (toneladas métricas per cápita). http://goo.gl/4gNMfM. Consultado el 29.06.16.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS Y EVALUACION LUMINICOS DE ESPACIOS ESCOLARES EN FUNCIÓN DE LA RELACION VANO-MURO

José Roberto García Chávez
Departamento de Medio Ambiente. Posgrado en Diseño Bioclimático.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
San Pablo 180. Colonia Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Ciudad de México
México. Tel. 52 55 5318-9110
e-mail: joserobertogsol@gmail.com

Francisco Ramírez
Posgrado en Diseño Bioclimático.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
San Pablo 180. Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, Ciudad de México
México. Tel. 55318-9112
e-mail:arquifram@gmail.com

Salvador Islas Barajas
Departamento de Medio Ambiente. Posgrado en Diseño Bioclimático
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
San Pablo 180. Colonia Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Cd. México, México
e-mail: sislas@correo.azc.uam.mx

RESUMEN
La iluminación natural juega un importante papel en la arquitectura, y después de un período de letargo debido al uso extensivo de sistemas de iluminación eléctrica, a partir de mediados del siglo veinte, ha resurgido el interés por su utilización en las edificaciones, y, además, por el deterioro del medio ambiente debido al excesivo consumo de los combustibles fósiles, es necesario implementar nuevas alternativas sustentables a esta situación. En los edificios educativos, la utilización adecuada de la iluminación natural es un factor esencial para lograr confort lumínico y ahorro de energía eléctrica. En este trabajo, se analizó y evaluó la calidad de la iluminación natural en aulas escolares de acuerdo a la proporción vano-muro. Para ello, se tomaron como casos de estudio dos aulas de la UAM Azcapotzalco, considerando los factores que intervienen en la incidencia de la luz natural hacia el interior de estos espacios: Reflectancias de las superficies, transmitancias de los cristales, dimensiones, alturas, obstrucciones y características del entorno inmediato. Para analizar y evaluar diferentes proporciones, condiciones geométricas y posiciones de vano-muro, se construyeron modelos físicos tridimensionales escala 1:20, calibrados de acuerdo a las características de las aulas reales. Los resultados obtenidos indican que la iluminación no es adecuada para la realización de las tareas visuales de los ocupantes al interior de las aulas reales analizadas y después de realizar las pruebas experimentales con las alternativas evaluadas en los modelos físicos tridimensionales, se concluyó que hay relaciones vano-muro que tienen un mejor desempeño que el que actualmente tiene la proporción existente en los espacios reales, tanto cantidad y calidad de la iluminación. La implementación de estos resultados en espacios arquitectónicos similares puede coadyuvar a mejorar las condiciones de confort visual de los ocupantes y a lograr ahorro y un uso eficiente de la energía eléctrica utilizada en espacios educativos y a mitigar el cambio climático global.

Palabras clave: Iluminación natural, cantidad y calidad lumínica, proporción vano-muro, edificios educativos.

ABSTRACT
Natural lighting plays an important role in architecture, and after a long lethargy period due to the extensive use of electric lighting systems, since the mid-twentieth century, the interest for the utilization of daylighting in buildings has re-emerged, and because of the environmental damage provoked by the consumption of large quantities of fossil fuels and the corresponding emission of greenhouse gasses (GHG), it is necessary to investigate new sustainable alternatives to this situation. In educational buildings, the correct use of natural lighting is an essential factor to achieve luminous and visual comfort conditions for the occupants and electric lighting savings.

This work presents the analysis and evaluation of daylighting conditions in educational spaces relative to the wall to window ratio. The case study is located the Metropolitan Autonomous University at Azacapotzalco campus in Mexico City. Two classrooms were selected for investigation. The methodology of this research consisted of measuring the exiting daylighting conditions relative to the wall to window ratio. The results indicated low daylighting levels on both classrooms. Subsequently, 3D 1:20 physical models were built with the same geometrical and optical properties of the current classrooms, and calibration of these was conducted to make sure the scale models had the same lighting performance as the real classrooms. The calibration carried out proved that the scale models had the same luminous performance as the real classrooms. Reflectances of interior envelope surfaces and glazing transmittances were replicated in the 3D physical scale models. Results in the 3D scale models indicated and confirmed that the daylighting conditions were unsuitable for the fulfillment of the visual tasks of the occupants and that by implementing other wall to window ratio alternatives these conditions could be quantitatively and qualitatively improved. The implementation of the results of this work in similar educational buildings can contribute to improve the visual and luminous comfort conditions of the occupants and to achieve electric energy savings, and eventually to mitigate the global climate change.

Keywords: Daylighting, luminous quantity and quality, window to wall ratio, educational buildings.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los muchos parámetros con los que se miden el nivel de desarrollo de un país, se encuentra el rendimiento escolar. No basta simplemente con tener oferta educativa diversa, sino que cada día toma mayor grado de importancia el rendimiento de los alumnos, así como la calidad en la enseñanza que brinda la planta docente. Mientras que países como Suiza, Singapur y Finlandia ocupan los primeros lugares en calidad educativa, en 2015, México ocupó el lugar 107, por abajo incluso de países como Chile, Panamá y Costa Rica. Esto según un estudio realizado por el Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés) (WEF, 2015) Ésta situación se debe a diversos factores: Deficiencias en la calidad de los docentes y en infraestructura inadecuada, entre otros. Se han realizado estudios que demuestran que uno de los factores, en cuanto a infraestructura se refiere, que más afecta en el rendimiento de los estudiantes (Schmelkes, 1994), es el relacionado con las condiciones ambientales intramuros de los espacios educativos, tales como el ruido excesivo, la falta de iluminación y ventilación, la forma en la que están acomodadas las bancas y la falta de mantenimiento, entre otros. El presente trabajo se enfocó a analizar y evaluar los aspectos cuantitativos y cualitativos de la iluminación natural en relación a la proporción vano-muro de los casos de estudio y presentar alternativas de solución para coadyuvar a mejorar las condiciones de confort lumínico de los ocupantes.

1.1. PROPORCIÓN VANO-MURO

El área de ventana en relación al área de muro, o la relación vano-muro (Window to Wall ratio (WWR)), es una de las claves de interrelación cuando se diseña la penetración de la iluminación natural dentro de un espacio arquitectónico. Generalmente, la efectiva distribución de la luz de día de las ventanas perimetrales es una función que se toma en cuenta a partir de la altura de cerramiento de las ventanas. Sin embargo, varias cuestiones surgen cuando se considera la posición, configuración y tamaño del área de ventanas ideales para un espacio arquitectónico en particular. Según estudios realizados por el Departamento de Arquitectura de la Universidad de Washington (Meek, et al), las ventanas verticales, tienden a proveer una distribución más uniforme de la iluminación natural a través del área de piso en áreas acristaladas bajas (menor al 40%). En áreas de ventanas superiores al 40%, la distribución de la luz natural es similar, debido a que el acristalamiento del muro es equivalente cuando la ventana se ubica a una altura de 75 centímetros o más. En áreas de ventanas menores al 30%, las ventanas brindan una distribución de la luz de día limitada al área inmediata (aproximadamente a una distancia de 4.5 metros). Sin embargo, el acristalamiento en bandas horizontales ayuda a proveer vistas más directas hacia el exterior. Además, cuando el acristalamiento de la ventana se concentra en una parte limitada del muro, el contraste entre las vistas al exterior y el muro circundante, pueden ocasionar en los ocupantes falta de confort lumínico.

1.2. IMPORTANCIA DE LA ILUMINACIÓN NATURAL Y EFECTOS POSITIVOS EN LOS OCUPANTES

La mayoría de los estudios hechos en materia de iluminación natural, se centran en la cantidad, y no tanto en la calidad. Si bien es cierto que el nivel lumínico es importante en cualquier tipo de edificio, lo cierto es que, al analizar sólo los aspectos cuantitativos, no se consideran factores cualitativos importantes, como el deslumbramiento, el contraste, la falta de uniformidad y las vistas hacia el exterior, entre otros. Aparte de los ya mencionados, existen también otros elementos que forman parte de la arquitectura misma de las escuelas, que afectan en cierto nivel tanto la cantidad como la calidad de la iluminación en espacios arquitectónicos educativos. Otros factores, como la altura del plafón, la forma de las edificaciones, las superficies reflejantes interiores, la orientación y la misma disposición del mobiliario, deben considerarse (STPS, 2010). Algunos estudios previos han identificado efectos positivos al utilizar adecuadamente la luz natural en espacios educativos, tales como: Mejoría generalizada de rendimiento escolar de los alumnos, del 5 al 14%, disminución de ausentismo escolar, 26% mayor rapidez en pruebas de lectura y mejoramiento general de estado de salud, entre otros (Nicklas, Bailey, 1996).

1.3. CALIDAD DE LA LUZ NATURAL

Existen indicadores que determinan la calidad en la iluminación. En un estudio previo se han identificado 6 factores principales para definir cualitativamente la iluminación natural dentro de un espacio arquitectónico en particular (Dubois, 2006). En la Tabla 1, se define la calidad de la luz natural, como aquella iluminación que ofrece el mejor equilibrio de los seis factores incluidos.

Tabla 1. Lista de indicadores de calidad de la iluminación natural. (Dubois, 2006)

INDICADOR	VALOR	INTERPRETACIÓN
FACTOR DE LUZ DE DÍA	Ver recomendaciones por el tipo de espacio en los estándares de iluminación.	
	< 1%	Demasiado Obscuro
	2%	Mínimo Aceptable
	> 5%	Se aprecia substancialmente iluminado de manera natural
	> 10%	Riesgo de sobrecalentamiento
ILUMINANCIA HORIZONTAL	Ver recomendaciones por el tipo de espacio en los estándares de iluminación.	
	> 500 lux	Demasiado brillante para trabajo en computadora, estabilización de la curva de desempeño visual
	> 1000 lux	Apropiado para el ciclo circadiano
LUMINANCIA ABSOLUTA	10^{-5} cd/m^2	Umbral para visibilidad
	< 30 cd/m^2	Demasiado obscuro para muros verticales
	> 500 cd/m^2	Demasiado brillo para arte. Luces centrales para campo visual
	> 1000 cd/m^2	Demasiado brillo para arte. Luces en campo visual
	> 2000 cd/m^2	Demasiado brillo para arte.
	> 5000 cd/m^2	Inaceptablemente brillante.
RADIOS DE LUMINANCIA	1:3	Transición suave entre dos superficies.
	1:10	Límite aceptable para transición entre superficies adyacentes.
	1:40	Contraste máximo aceptable en el espacio.
	1:13	Radio aceptable para interés visual en el rango de 40°.
ILUMINANCIA VERTICAL A HORIZONTAL	2-3	Iluminación 3d balanceada
ÁREAS DE LUZ SOLAR DIRECTA		Algunas son necesarias para la simulación y la ambientación. Evitar grandes áreas que puedan causar deslumbramiento

2. CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio se localizan en Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ed. “F”, específicamente en las aulas 004 y 205 del edificio F (Figuras 2 y 3).

2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AULAS

1) Aulas con incidencia de luz natural fachadas Norte: es la orientación que más se recomienda en la latitud del lugar analizado por tener baja incidencia de irradiación solar directa y por la mayor uniformidad de luz natural que esta orientación proporciona diurna y estacionalmente.
2) Aulas alineadas verticalmente en el mismo edificio: es decir, una de las aulas está ubicada en un nivel superior, para tener las mismas condiciones del entorno, variando sólo la reflectancia de los materiales exteriores con influencia al interior de las aulas.
3) Tener las mismas características de dimensiones, así como de propiedades ópticas de los materiales y acabados en el interior de las aulas de los casos de estudio, para que los resultados del monitoreo de las condiciones lumínicas sean confiables y válidos.
4) Factibilidad para que todas las mediciones sean realizadas a una altura de 75 cm sobre el nivel de piso terminado (altura del plano de trabajo): ya que es la altura en el que el alumno realiza su actividad visual en las aulas.

Figura 2. Ubicación de los casos de estudio en la UAM Azcapotzalco, aulas F004 y F205, ubicadas en la fachada principal del edificio F (Google Earth, 2016)

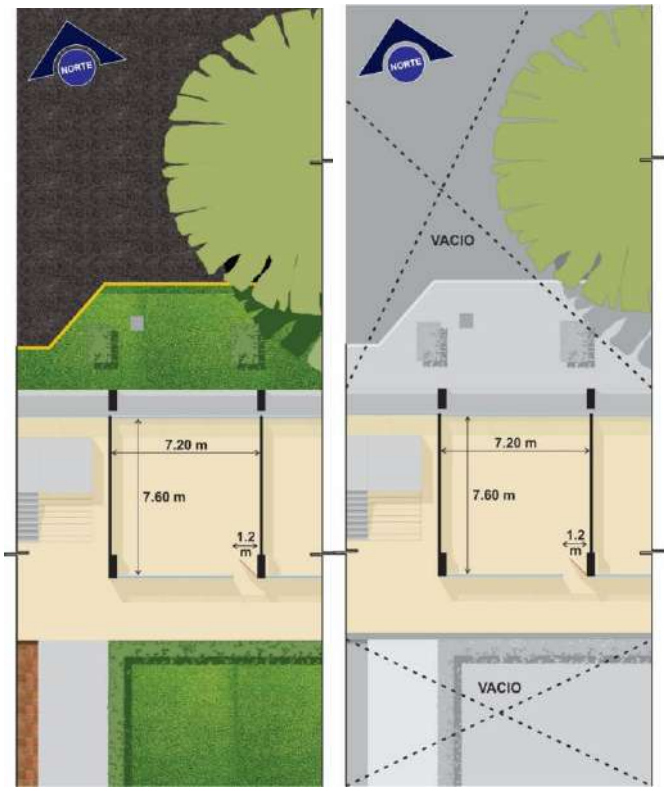


Figura 3. Características del aula F004 (izquierda) y F205 (derecha) en planta, considerando el entorno inmediato

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Durante la primera etapa del trabajo experimental, se realizó un monitoreo de los niveles de iluminancia en los espacios de los casos de estudio, se obtuvieron los valores de las propiedades ópticas de las superficies de muros, plafones y pisos. Con estos valores, se construyeron modelos físicos tridimensionales de los dos espacios de los casos de estudio, con idénticas propiedades ópticas en sus superficies interiores y se realizó la calibración correspondiente para asegurar que los espacios del edificio existente y los de los modelos a escala fuesen idénticos y equivalentes en sus propiedades geométrica y ópticas. Se consideraron también los valores de las propiedades ópticas de reflectancia de las superficies del entorno exterior circundante inmediato. Las mediciones de iluminancias, luminancias y cálculo del factor de día se realizaron tanto al exterior bajo condiciones de cielo despejado y de cielo cubierto, así como en el cielo artificial del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática (LAB) de la UAM Azcapotzalco (Figuras 4, 5 y 6).

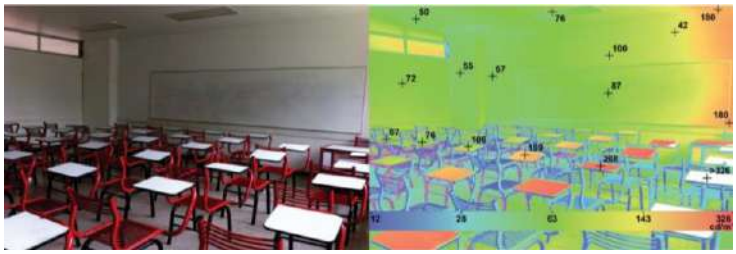
Es importante mencionar que las dimensiones de los muros en la maqueta se construyeron los muros de las maquetas con una altura y geometría variable para evaluar la relación vano-muro**.**

Se elaboraron diferentes muros norte, cada uno con una relación de vano diferente y con tres patrones de vano generales:

1) Patrón tipo "A": vano horizontal de lado a lado, siendo la altura del mismo modificada por cada relación del centro hacia afuera.
2) Patrón tipo "B": vano horizontal de lado a lado, siendo la altura del mismo modificada por cada relación de arriba hacia abajo.
3) Patrón tipo "C": tres vanos verticales distribuidos de manera equidistante en sentido horizontal del muro, y respetando el antepecho existente. La relación de cada muro es modificada por la anchura de dichos vanos.

Las proporciones en cada caso varían desde el 10% al 80%, a excepción del patrón tipo "C", cuya relación máxima es del 60%, debido a que se conservó el antepecho existente.

Figura 4. Modelos Físicos Experimentales a Escala Evaluadas en el Cielo Artificial



Figuras 5 y 6. Espacio real y mediciones de niveles de luminancias

4. EXPERIMENTACIÓN CON PROPIEDADES DE LA RELACIÓN VANO-MURO

Las pruebas experimentales con los modelos a escala incluyeron la evaluación de las diferentes relaciones de vano-muro mencionadas anteriormente para cada una de las dos aulas analizadas y los resultados con los valores de luminancias para evaluar la calidad de la iluminación se presentan en la Figura 7.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

1) Los resultados experimentales con los diferentes porcentajes de la relación vano-muro, indicaron que el patrón en el que se ubica el vano a partir de la parte superior del muro, es el que mejor distribución lumínica presentó, sin embargo, es el que aporta la menor cantidad de luz al interior.

2) Los vanos verticales, también aportan una adecuada distribución de luz al interior, y con mejores niveles lumínicos que los del patrón en el que se ubica el vano en la parte superior del muro. Los niveles de deslumbramiento y contraste son también menores con los vanos verticales, en comparación con los indicados en el vano ubicado en la parte superior del muro norte.

3) Los vanos horizontales, con el patrón en el que se parte desde el centro del muro hacia los extremos, es el que aporta la mayor cantidad de niveles de iluminancia, pero presentó los contrastes y deslumbramiento más desfavorables.

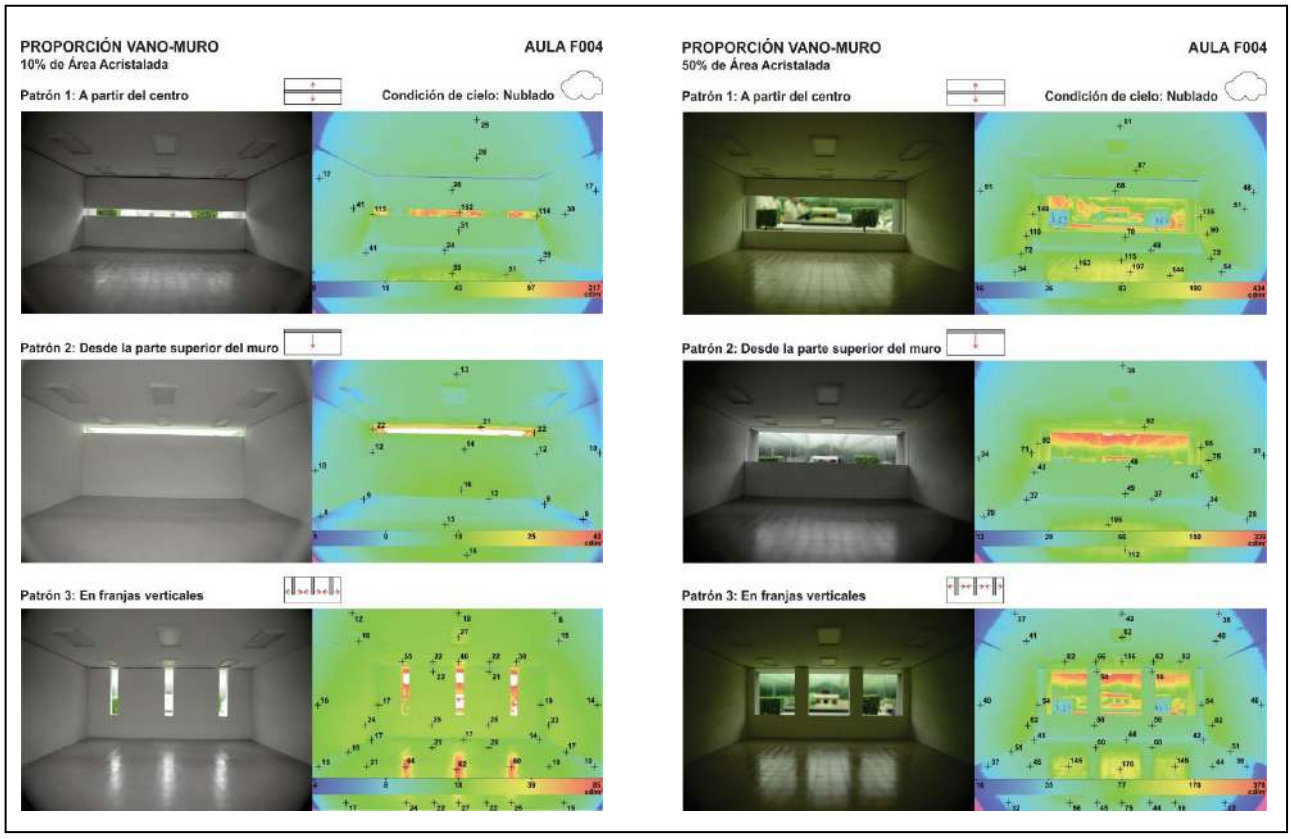


Figura 7. Experimentación de diferentes proporciones vano-muro con gráfica de colores falsos indicando luminancias

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos permiten inferir que la relación de la proporción vano-muro es un factor importante para la iluminación de los espacios interiores en aulas escolares y puede incrementar desempeño de los alumnos. La configuración de los vanos en un edificio, conlleva diferentes características lumínicas que, de acuerdo a las actividades que se realicen dentro del espacio, se debe seleccionar cuidadosamente, considerando las características físicas y espaciales del espacio a iluminar. Es recomendable considerar la configuración y características tanto de los vanos como del espacio, desde la etapa conceptual de los proyectos arquitectónicos, para evitar hacer modificaciones posteriores a la construcción de las edificaciones. Para el caso de edificios ya construidos, se debe hacer un estudio detallado para determinar qué características son viables de modificar, enfocadas, no solo a mejorar los niveles de iluminancias, sino a optimizar también la calidad de la iluminación natural, y de ésta manera, mejorar el confort lumínico de los ocupantes y su rendimiento escolar, en sus espacios de trabajo, así como coadyuvar al ahorro y uso eficiente de la energía y al mejoramiento del medio ambiente con un enfoque sustentable a nivel nacional y global.

REFERENCIAS:

Foro Económico Mundial (WEF); (2015); "Calidad del Sistema Educativo"
Meek, Christopher and Van Den Wymelenberg, Kevin G. (2012); "Daylight Design in the Pacific Northwest"; University of Washington Press, USA
Nicklas, Bailey (1996); "Energy Performance of Daylit Schools in North Carolina"; Innovative Design, North Carolina, USA
Schmelkes, Sylvia; (1994). "Hacia una Mejor Calidad de Nuestras Escuelas"; PRODEBAS; Argentina
STPS; (2010); "Condiciones de Iluminación en los Centros de Trabajo"; Guía Informativa de la Norma Oficial Mexicana. NOM-025-STPS-2008, México.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

FACTORES NO INCLUIDOS EN LA NORMATIVIDAD QUE AFECTAN LOS NIVELES DE ILUMINANCIA Y EL CONFORT LUMINICO DE OCUPANTES EN EDIFICIOS EDUCATIVOS

José Roberto García Chávez
Departamento de Medio Ambiente. Posgrado en Diseño Bioclimático. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. San Pablo 180. Colonia Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Ciudad de México, México. Tel. 52 55 5318-9110
e-mail: joserobertogsol@gmail.com

Luis Ángel Meza Zárate
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco Posgrado en Diseño. Arquitectura Bioclimática
San Pablo 180. Colonia Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, México, D.F. Tel. 52 55 5318-9110
e-mail: mzarate2444@hotmail.com

RESUMEN

Con base en estudios previos de las condiciones de la iluminación natural realizados en edificios educativos, se han identificado factores que no se incluyen en la normatividad vigente en México y afectan los niveles de iluminancia al interior de los espacios y el confort de los ocupantes en la realización de diversas tareas visuales características en este género de edificios. Algunos de estos factores no considerados en la normatividad incluyen: La disponibilidad del recurso solar lumínico, tanto de la componente directa como la difusa, que varían en relación a la ubicación y a las coordenadas geográficas de cada lugar; tipos de cielo; ubicación espacial dentro del edificio analizado; orientaciones de las aberturas; contexto urbano circundante, de obstrucciones naturales y artificiales; propiedades ópticas de las superficies (reflectancias); sistemas de ventanería y sus propiedades de transmitancia de los cristales que la componen; así como niveles de mantenimiento en los espacios, entre otros. Estos factores afectan de manera significativa los niveles de iluminancia en el interior de los espacios arquitectónicos de edificios educativos, y en consecuencia las condiciones de confort lumínico de los ocupantes. La normatividad vigente no considera estos factores y al aplicarla los niveles de iluminancia son bajos e inadecuados. Por ejemplo, la normatividad local vigente solo considera para el área de la ventana para iluminación, un porcentaje mínimo en relación al área del piso del local para todos los géneros de edificaciones. Al aplicar estas disposiciones de la normatividad, y considerando los factores previamente mencionados, en la mayoría de los casos no se alcanzan los valores mínimos de niveles de iluminancia que establece la misma normatividad. En consideración a lo anterior, es necesario analizar los factores no incluidos y plantear alternativas que los consideren y apliquen en la práctica constructiva real, particularmente en edificios educativos. En este trabajo se analizaron y evaluaron varios de éstos factores en espacios educativos reales y en modelos físicos tridimensionales. Los resultados indicaron que al considerar y aplicar estos factores es posible alcanzar niveles de iluminancia adecuados para la realización de las diversas tareas visuales de los ocupantes en el edificio educativo representativo analizado. Por lo tanto, es necesario que estos factores sean incluidos en subsecuentes modificaciones de la normatividad en México. La aplicación práctica de estas estrategias lumínicas, también puede contribuir al ahorro y uso eficiente de la energía, y a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y a la preservación y mejoramiento del medio ambiente, conceptos compatibles con criterios sustentables a nivel global.

Palabras clave: Niveles de iluminancia, confort lumínico, normatividad, edificios educativos, ocupantes.

ABSTRACT

Based on previous studies of the conditions of natural lighting made in educational buildings, various factors not included in the current standards and regulations in Mexico have been identified. These factors affect the provision of suitable illuminance levels in the interior spaces and consequently provoke occupants´ visual discomfort conditions to realize their activities, particularly in these type of buildings. Some of these factors not considered in the regulations include: The availability of the luminous solar resource, both the direct and the diffuse components, which vary in relation to the site and the geographical coordinates of each location; the types of sky; the location of the spaces within the building analyzed; orientations of the openings; surrounding urban context, relative to natural and artificial obstructions; optical properties of interior building envelope surfaces (reflectances of walls, ceiling and floors); fenestration systems and transmittance properties of their glazings; maintenance levels in spaces, among other factors. These factors considerably affect illuminance levels in educational buildings interiors, and therefore the visual comfort conditions of the occupants. The current standards and regulations do not consider these factors, and when applied, the results are usually dimmed spaces and inadequate low illuminance levels. For example, the current local regulations consider for the window area for lighting, a minimum percentage of the floor area for all buildings types. In applying the regulations, and considering the factors indicated previously, in most cases the minimum values of illuminance levels established by the same standards are not fulfilled. In consideration of the above, it is necessary to analyze the not included factors and propose alternatives that consider and implement them in real construction practice, particularly in educational buildings. In this work, some of these factors were analyzed and evaluated in real educational spaces and assessed in three-dimensional physical models. The results indicated that if considering and applying these factors properly, it is possible to achieve adequate levels of illuminance to perform the various visual tasks of occupants in the representative educational building analyzed. Therefore, it is necessary that these factors are included in subsequent modifications of the standards and regulations in Mexico. The practical implementation of these luminous strategies can also contribute to savings and energy efficient use, and to reduce the emission of greenhouse gasses to the atmosphere as well as to the preservation and improvement of the environment, well-suited sustainable concepts at global level.

Keywords: illuminance levels, luminous comfort, standards, regulations, educational buildings, occupants.

1 INTRODUCCIÓN

La arquitectura está directamente relacionada con la luz natural. Hasta antes del uso histórico de diversas fuentes artificiales de iluminación, la luz del día fue la única fuente eficiente de luz disponible y la arquitectura tuvo como premisa, la utilización de la luz natural en los diversos géneros de edificios, situación que se confirma en diversos ejemplos (Figura 1).

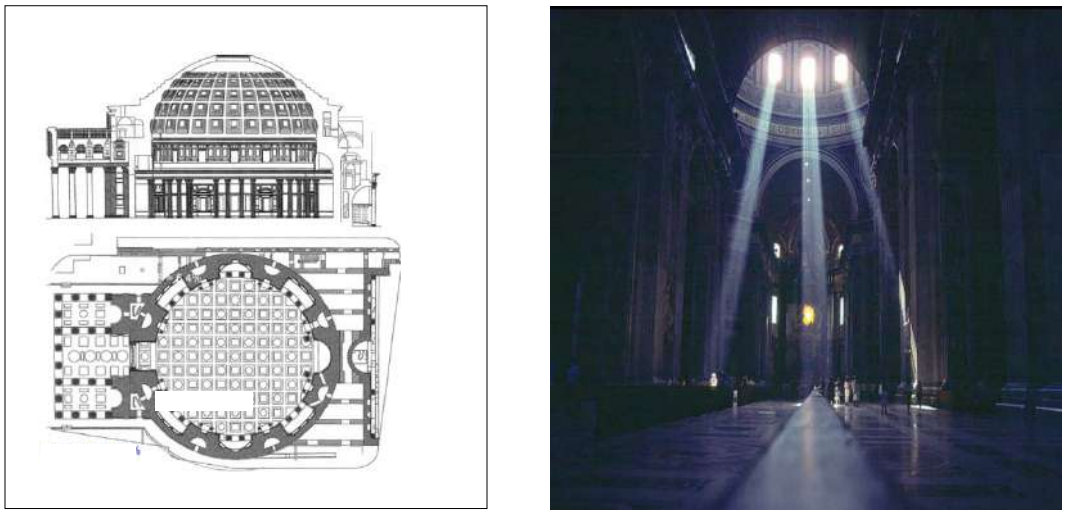


Figura 1. Uso de luz natural cenital. Pantheon. Roma. Siglo 1 DC
Fuente: http://www.history.com/news/is-romes-pantheon-a-giant-sundial

Hasta antes del surgimiento de la luz eléctrica, a finales del siglo 19, la luz natural fue la fuente de iluminación predominante en la arquitectura, complementada por diversos sistemas desde velas hasta lámparas de aceite, keroseno, etc. Cuando la luz natural era la única alternativa disponible para el diseñador y el constructor, las soluciones arquitectónicas fueron muy creativas, ingeniosas y efectivas. Lamentablemente, desde el surgimiento de la luz eléctrica, el enorme potencial cuantitativo y cualitativo de la iluminación natural fue perdiendo importancia, ignorada y empezó a dejarse de aplicar en toda su amplia magnitud para aprovechar su enorme potencial. Ciertamente, la aplicación de la iluminación natural en diversos géneros de edificios ofrece múltiples ventajas y beneficios.

En este trabajo se analizó el comportamiento de la iluminación natural en edificios educativos y su relación con el aprovechamiento escolar. En los casos de estudio analizados, además de los elevados consumos de energía eléctrica para el alumbrado, los ocupantes presentaron falta de confort lumínico y visual, debido a los inadecuados niveles de iluminancia bajo los cuales realizan sus diversas tareas visuales, lo que afecta su rendimiento escolar. La metodología del proyecto consistió en la realización de trabajos experimentales en espacios reales de control y de prueba con ocupantes, y en modelos físicos tridimensionales, realizados bajo condiciones de iluminación natural predominantes, donde se evaluaron varios factores no incluidos en la normatividad vigente, tales como: La disponibilidad del recurso solar lumínico, tanto de la componente directa como la difusa, que varían en relación a la ubicación y a las coordenadas geográficas de cada lugar; tipos de cielo; ubicación espacial dentro del edificio analizado; orientaciones de las aberturas; contexto urbano circundante, de obstrucciones naturales y artificiales; propiedades ópticas de las superficies (reflectancias); sistemas de ventanería y sus propiedades de transmitancia de los cristales que la componen; así como niveles de mantenimiento en los espacios, entre otros.

Ciertamente, estos factores afectan de manera significativa los niveles de iluminancia en el interior de los espacios arquitectónicos de edificios educativos, y en consecuencia las condiciones de confort lumínico de los ocupantes. La normatividad vigente no considera estos factores y al aplicarla los niveles de iluminancia son bajos e inadecuados. Por ejemplo, la normatividad local vigente solo considera para el área de la ventana para iluminación, un porcentaje mínimo del 17.5% en relación al área del piso del local para todos los géneros de edificaciones (NTC del RCDF, 2011).

Al aplicar estas disposiciones de la normatividad, y considerando los factores previamente mencionados, en la mayoría de los casos no se alcanzan los valores mínimos de niveles de iluminancia que establece la misma normatividad. En consideración a lo anterior, es necesario analizar los factores no incluidos y plantear alternativas que los consideren y apliquen en la práctica constructiva real, particularmente en edificios educativos. En este trabajo se analizaron y evaluaron varios de éstos factores en espacios educativos reales y en modelos físicos tridimensionales.

Un alto porcentaje de las escuelas públicas de nivel básico en México presentan diversas realidades que afectan el desempeño escolar de los alumnos. Ciertamente, uno de los factores del bajo rendimiento de los estudiantes, es debido a la inadecuada iluminación que presentan los salones de clase en las escuelas.

2 SITUACION DE LAS CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN EDIFICIOS EDUCATIVOS

Un alto porcentaje de las escuelas públicas de nivel básico en México presentan diversas realidades que afectan el desempeño escolar de los alumnos. Ciertamente, uno de los factores del bajo rendimiento de los estudiantes, es debido a la inadecuada iluminación que presentan los salones de clase en las escuelas. En visitas realizadas a varias escuelas públicas del Área Metropolitana del Valle de México (AMVM) se realizaron registros de luz natural y se detectaron niveles promedio por debajo de lo que especifica la normatividad, tanto a nivel nacional como a nivel internacional. Además, en varios centros escolares, la iluminación natural no solo es insuficiente sino de baja calidad, lo que provoca problemas de deslumbramiento debido a la inadecuada distribución de la iluminación, así como otros problemas por la falta de uniformidad y por excesivos contrastes, entre otros (Figura 2). Esta situación se agrava porque de acuerdo a estudios recientes, en México, más de 42 mil aulas de planteles públicos donde se imparte educación especial, prescolar, primaria y secundaria carecen de energía eléctrica (Inifed, 2015).

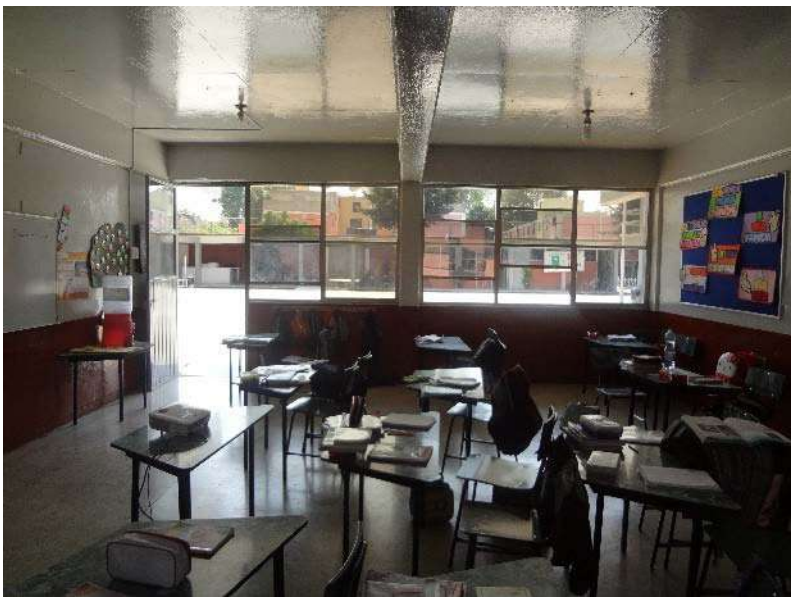


Figura 2. Aula de escuela pública de educación básica, representativa de una deficiente iluminación, por una inadecuada distribución de niveles de iluminancia y luminancia en superficies, emisoras y de trabajo, y que presenta condiciones lumínicas de falta de uniformidad y excesivos contrastes

Esta situación se presenta por factores como un mal diseño arquitectónico de los espacios educativos, por una mala orientación de las edificaciones, por la falta de aplicación de controles solares y también por un desconocimiento e incumplimiento de las normas nacionales e internacionales en materia de iluminación y confort lumínico, entre otros. Además, esta situación provoca falta de atención de los alumnos y afectaciones en el aprovechamiento escolar, e incluso en su salud.

3. IMPORTANCIA DE LA LUZ NATURAL, EL CONFORT LUMÍNICO Y SU RELACIÓN CON LAS RESPUESTAS Y PERCEPCIÓN DE LOS OCUPANTES EN LOS ESPACIOS EDUCATIVOS

El confort lumínico y visual es una variable que tiene un importante rol en el diseño de las edificaciones, de manera particular en las escuelas. El confort visual se relaciona con conceptos como el deslumbramiento, la falta de uniformidad espacial y el contraste, fenómenos vinculados a la forma en que se ilumina un espacio y al nivel de iluminación del mismo. Por otra parte, también se deben tomar en cuenta tanto factores personales, como los parámetros fotométricos presentes en el lugar de análisis, así como los valores establecidos como adecuados e inadecuados para el desarrollo de las diversas actividades de los ocupantes. Estos factores incluyen el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la luminancia y el manejo adecuado del color, entre otros. También es importante mencionar que diversas investigaciones en fotobiología han demostrado que la luz natural actúa de mediadora y controla numerosos procesos fisiológicos y psicológicos del ser humano como son; el control del reloj biológico, el ritmo circadiano, los efectos de la luz sobre el sueño, la cura de enfermedades y el estado de ánimo, entre otros factores. Además, el aprovechamiento y utilización de la luz natural como sistema de iluminación puede coadyuvar a reducir las ganancias térmicas de un edificio, debido a la reducción en la utilización del alumbrado artificial, que, al reducir la carga térmica, a su vez disminuye el uso de sistemas de aire acondicionado.

4. EL PAPEL DE LA LUZ NATURAL EN LA EDUCACIÓN A NIVEL BÁSICO EN MEXICO

En la actualidad, en algunos países, hay interés por mejorar las condiciones de la iluminación natural en edificios escolares y consecuentemente, en crear mejores condiciones en las aulas. Después de una serie de estudios que se realizaron en EE.UU. sobre aulas con diferentes condiciones de iluminación, se demostró que los alumnos aprenden más rápido y obtienen mejores resultados si el aprendizaje se desarrolla en óptimas condiciones de iluminación. Uno de estos estudios, realizado en escuelas construidas en Carolina del Norte, donde se sustituyó la iluminación artificial eléctrica por luz natural, permitió obtener un ahorro energético de más de 60%, en comparación con las escuelas vecinas, que utilizan predominantemente alumbrado eléctrico para la iluminación de sus espacios escolares. Los alumnos de estas escuelas obtuvieron resultados superiores a un 14%, con respecto a los de los alumnos de escuelas sin luz natural o con luz natural deficiente. La inversión de los sistemas de iluminación natural propuestos fue muy bajo y tuvo un período de retorno de menos de 36 meses. (EDC, 2002).

Otros estudios en relación a la utilización de la luz natural en espacios escolares, realizados en diversos distritos escolares, indicó que los estudiantes en las aulas con mejores condiciones de luz de día, progresaron en un año, hasta un veinte por ciento más rápido en las pruebas de matemáticas y veinte y seis por ciento más rápido en pruebas de lectura, en comparación con alumnos en aulas con menor cantidad y calidad de luz natural (Heschong, 1999).

En otras regiones climáticas diferentes, también se han realizado diversos estudios similares a los antes mencionados, como es el caso de una escuela en una ciudad de Suecia, donde pruebas a 90 alumnos demostraron que la falta de luz natural puede alterar su cronobiología (relojes biológicos) y provocar alteraciones psicológicas y fisiológicas significativas. El estudio realizó un seguimiento de la salud y la conducta de niños en aulas con y sin ventanas durante un año académico completo, midiendo su producción de cortisol (una hormona del estrés controlada por el reloj biológico del cuerpo). La conclusión fue que trabajar en aulas sin luz natural podía alterar el patrón hormonal básico e influir en la capacidad de los niños para concentrarse y cooperar, y que podía tener un impacto desfavorable en el crecimiento anual del organismo (Pasrsons Schhol of Design, 2000).

5. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

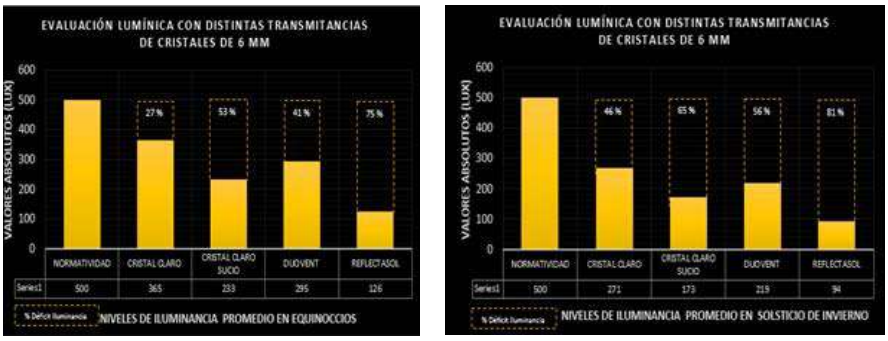
La metodología consistió en la realización diagnósticos de las condiciones de iluminación en los casos de estudio en espacios reales de control y de prueba con ocupantes, ubicados en escuelas públicas de educación básica en el Área Metropolitana del Valle de México (AMVM) y se complementaron con trabajos experimentales en modelos físicos tridimensionales, realizados bajo condiciones de iluminación natural predominantes.

Una vez terminada la etapa del reconocimiento de aquellos aspectos generales y particulares del caso de estudio que de alguna forma participan en las condiciones lumínicas se seleccionaron cuatro factores de suma importancia, no incluidos en la normatividad que afectan los niveles de iluminancia y el confort lumínico de ocupantes en edificios educativos y que se aplicaron en el trabajo experimental para realizar la simulación en modelos físicos tridimensionales a escala.

- Transmitancias de cristales
- Reflectancias de superfices opacas de la envolvente edificatoria interior
- Obstrucciones exteriores circundantes al espacio analizado y
- Orientación

Transmitancias

Las transmitancias elegidas fueron usando cristal claro (87.8%) (Siendo este el de mejor comportamiento), cristal Duovent clásico claro (71%) y cristal reflectasol (30.4%), simulando y aplicándolas matemática al modelo físico tridimensional en comparativa al umbral normativo para este género de edificio (500 lux) como se muestra en las Figuras 3 y 4.



Figuras 3 y 4: Niveles de iluminancia con factor Transmitancias

Reflectancias

Las reflectancias juegan un papel decisivo en el aprovechamiento de la luz diurna de cualquier espacio, ya que de estos depende como, cuando y hasta donde llegue la luz incidente, por lo tanto, las simulaciones en el modelo físico fueron cinco de la siguiente manera: Combinación 1 (Plafón con alta reflectancia + Muros con alta reflectancia + Piso actual), Combinación 2 (Plafón con alta reflectancia + Muros con media reflectancia + Piso actual), Combinación 3 (Plafón con alta reflectancia + Muros con baja reflectancia + Piso actual), Combinación 4 (Plafón con media reflectancia + Muros con alta reflectancia + Piso actual), Combinación 5 (Plafón con baja reflectancia + Muros con alta reflectancia + Piso actual), es decir, se jugó con reflectancias medias, altas y bajas en todos los elementos constructivos para determinar cuál opción es la mejor y acrecentar las condiciones lumínicas como se muestra en la Figura 5.

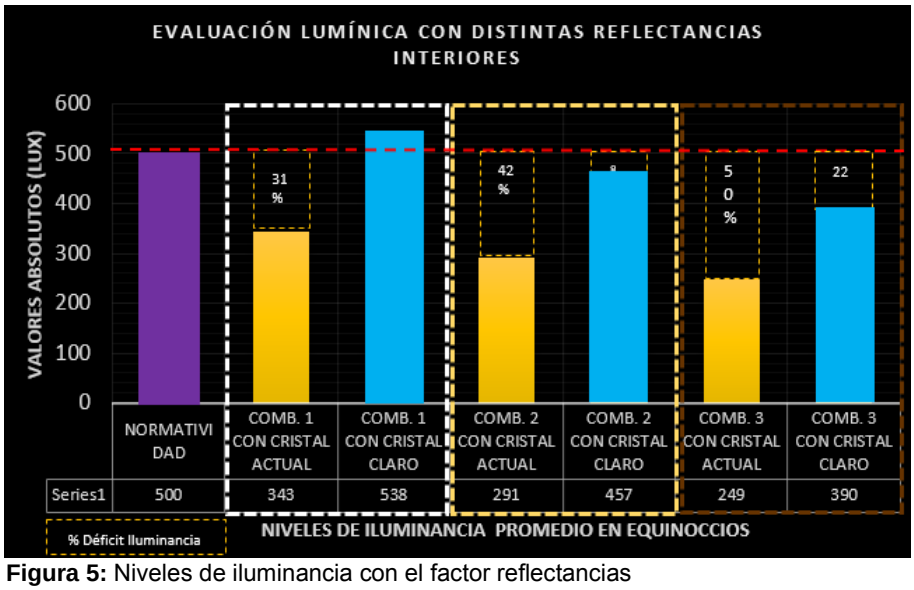


Figura 5: Niveles de iluminancia con el factor reflectancias

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se infiere que el aprovechamiento de la luz solar ofrece una importante oportunidad para el ahorro de energía eléctrica. Para el caso del Factor Transmitancias, el factor que proporciona los niveles de iluminancia más elevados es el de mayor transmitancia por la utilización de cristales claros en cualquier proyecto arquitectónico. El caso base (sin estrategias) la mayor parte del año las condiciones existentes están bajo la zona de confort lumínica (de 300 a 500 lux) y con el uso de este cristal y de acuerdo a la orientación del inmueble se incrementan en un 60%, siendo este la opción más viable. Para el caso del Factor Reflectancias, el color del plafón es el que mayor condición de iluminancias proporciona, al reflejar la luz de manera difusa.

El valor de reflectancia que se recomienda es mayor al 80 %, con colores blancos y preferentemente que sea tono mate. Los muros deben de poseer revestimientos en tonos pastel y/o mates con una reflectancia entre el 50 y 70% como máximo, teniendo como excepción aquellos muros en los que tengan incidencias directas, es decir, cerca de ventanas, en este caso hay que reducir el factor de reflexión al 40% para evitar los deslumbramientos. El mobiliario y equipo de trabajo debe tener un factor de reflexión de al menos el 20% y si es posible entre el 25 al 45 %, no se recomiendan claros ni brillosos para evitar deslumbramientos directos. El Factor Orientación demostró que en la fachada sur, el sol está bajo en épocas de invierno en el cielo y hay penetraciones solares que se deben considerar pues generan deslumbramiento, la Iluminación es muy contrastada con muchos reflejos con lo que no es buena orientación para lugares de lectura o clases, en cuanto a la este las fachadas reciben más horas de sol en verano y son espacios poco cálidos en verano, ya que sólo reciben asoleamiento por la mañana, pero son menos cálidos en invierno que los orientados al sur y por último en la oeste la radiación directa incide en esta orientación por la tarde durante un largo periodo en verano y es corto en invierno.

Por otra parte, para incrementar los niveles de iluminancia en los espacios educativos en estudio, se plantearon estrategias innovadoras de iluminación natural de alta eficiencia como medidas correctivas. Algunas de las estrategias incluyeron: Light shelves, ductos lumínicos y sistemas anidólicos. Estos últimos fueron los que presentaron los mejores resultados. Los resultados demostraron la importancia de la iluminación natural y su relación directa con el aprovechamiento escolar.

Los resultados obtenidos permitieron inferir que con la implementación de las estrategias innovadoras de iluminación natural de alta eficiencia, es viable el mejoramiento de los niveles de iluminancia en aulas de escuelas primarias de nivel básico y a su vez mejorar el rendimiento académico de los alumnos que estudian en espacios con buenas condiciones lumínicas. Además, con estas acciones, se reduce el consumo de energía para el alumbrado y en consecuencia hay más recursos económicos disponibles para otros requerimientos en las escuelas. Eventualmente, con la disminución del consumo de electricidad, se reduce la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y se mejora la calidad de vida de las personas.

REFERENCIAS

Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2005. Ergonomía: análisis ergonómico de los espacios de trabajo en oficinas. España: Centro Nacional de Condiciones de Trabajo

Daylighting in Schools. An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance. Heschong Mahone Group, Fair Oaks, CA, 1999

García Chávez, J. R. y Díaz, A. Potencial de un Sistema de Iluminación Innovador de Alta Eficiencia para el Aprovechamiento de la Luz Natural en Edificaciones Comerciales. Sistemas Lumínicos de Luz Natural de Alta Eficiencia Aplicados en la Arquitectura. Memorias de ANES 2010. Guadalajara, México, D.F. 2010

García Chávez, J. R. Importancia de la Utilización de la Luz Natural en la Arquitectura y su Relación con la Normatividad. Memorias del Coloquio Internacional de Diseño 2013. Toluca, México

Informe de la Parsons School of Design, New School of Social Research de Nueva York, 1999)

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. Inifed, 2015

Informe del Laboratorio Nacional de Energía Renovable, Daylighting in Schools: Improving Student Performance and Health.at a Price Schools Can Afford, 2000

RCDF. Notas Técnicas Complementarias al Proyecto Arquitectónico. México, 2011.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TIERRA CRUDA, APLICADO EN PROTOTIPOS EXPERIMENTALES

José Roberto García Chávez
Departamento de Medio Ambiente. Posgrado en Diseño Bioclimático. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
San Pablo 180. Colonia Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200, Ciudad de México, México. Tel. 52 55 5318-9110
e-mail: joserobertogsol@gmail.com

Gabriel Morales Galaviz
Posgrado en Diseño Bioclimático. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
San Pablo 180. Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, Ciudad de México, México. Tel. 55318-9112
e-mail:gabriel_gala12@hotmail.com

Luis Fernando Guerrero
Posgrado en CYAD. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Calz. Del Hueso 1100. Colonia Villa Quietud.
C.P. 04960 Ciudad de México. Tel. 54837232. México e-mail: luisfg1960@yahoo.es

RESUMEN

En la actualidad más del 50% de las viviendas del mundo están construidas con tierra. La utilización de este material representa una alternativa viable para coadyuvar a solucionar el problema del déficit habitacional, que afecta sobre todo a países en vías de desarrollo. Entre sus ventajas se incluyen su propiedad de reciclaje, muy baja energía incorporada y excelentes propiedades térmicas que permiten amortiguar las oscilaciones de temperatura. En este trabajo se presenta la caracterización de un prototipo de tierra compactada, cuyo comportamiento se comparó con otro de block convencional en una región semi-fría, en Puebla. México. Ambos módulos se construyeron de geometría y dimensiones similares, excepto el material de los muros. Se realizaron tres etapas de monitoreo durante períodos representativos de bajocalentamiento en la región. Concurrentemente con el monitoreo, se aplicaron cuestionarios para conocer la percepción de las condiciones de confort en ambos prototipos. Los resultados del monitoreo y de los cuestionarios indican que aun cuando las temperaturas de bulbo seco son ligeramente mayores en el prototipo de tierra compactada, el retardo térmico de ese módulo es mayor que el de block. Los resultados del tercer período de monitoreo indicaron que la temperatura radiante en el muro de tierra cruda fue mayor que el de block y las encuestas aplicadas confirmaron la percepción de condiciones de confort térmico en este prototipo, relativo al de block de concreto, en donde la precepción fue de un ambiente frío. Es deseable que los resultados puedan aplicarse en la construcción de viviendas de interés social en la región y contribuir a mejorar la calidad de vida, el confort térmico y economía de sus habitantes, así como coadyuvar a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático.

Palabras clave: Adobe, comportamiento térmico, sistema constructivo, tierra compactada, prototipos experimentales.

ABSTRACT

Currently more than 50% of homes around the world are built with soil. The use of this material represents a viable option to solve the problem of housing shortage, a situation that particularly affects developing countries. Some advantages of earthen architecture include recycling properties with very low embodied energy, excellent thermal properties that provides a comfortable indoor environment. This paper presents the characterization of a compacted rammed earthen prototype, and its thermal behavior relative to a conventional concrete block prototype, in the semi-cold temperate climate of the state of Puebla, Mexico. Both prototypes were built with similar geometry and dimensions and materials, except the walls. The methodology included three monitoring stages during representative underheating periods in the location. Concurrently with the monitoring, questionnaires to occupants were applied to determine the perception of their comfort conditions on both prototypes. Monitoring results and questionnaires indicated that even when dry bulb temperatures were slightly higher in the prototype of the compacted rammed earth prototype, the thermal lag was larger than that on the concrete block prototype. The results of the third monitoring period indicated that the radiant temperature on the rammed earth prototype was higher

than in the concrete block and the questionnaires confirmed the perception better thermal comfort conditions in this prototype, relative to the block, wherein the perception was of a cold ambient condition. It is desirable that the results of this research can be applied in the construction of low-cost social housing in the region and that this can help to improve the quality of living, thermal comfort conditions and economy of the inhabitants and contribute to reduce the emission of greenhouse gases into the atmosphere, mitigating climate change.

Keywords: Adobe, thermal performance, constructive system, rammed earth, experimental prototypes.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de la tierra como material de construcción se remonta hacia los primeros tiempos de la historia de la humanidad. Como es sabido, los primeros refugios de la vida nómada fueron en cavernas de tierra y piedra, las primeras civilizaciones construyeron sus ciudades con piedra y tierra, siendo éste el mortero más antiguo que empleó el hombre. La mayoría de estas antiguas civilizaciones lo utilizó en cierta medida y en una amplia variedad de aplicaciones, en armonía con las condiciones climáticas locales. Es un material de construcción fácilmente disponible, barato, fuerte y requiere sólo la tecnología simple para su aplicación como parte de un sistema constructivo. La tierra es un material que tiene una buena masa térmica o propiedades de inercia térmica, lo que lo hace ideal para ser utilizado como modulador de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de un edificio. Por ejemplo, en Egipto los almacenes de grano de Ramasseum construidas en adobe en el año 1300 a.C. todavía existen; la Gran Muralla de China tiene secciones construidas en tapial de hace más de 2000 años. Otros ejemplos exitosos de edificios de tierra se pueden encontrar en Irán, India, Nepal, Yemen, Alhambra, entre otros, que tienen ejemplos de antiguas ciudades y grandes edificios construidos en diferentes formas de construcción con tierra. Vale la pena mencionar que las construcciones de muros de tierra tienen una mayor capacidad de calor e inercia térmica y una conductividad inferior a los muros de hormigón. Las viviendas más antiguas descubiertas hasta ahora se encuentran en el Medio Oriente, China, y el Valle del Indo. Jericó, que data de 8300 a.C., es la ciudad más antigua del mundo, con construcciones hechas de tierra. Los habitantes de Jericó construyeron sus viviendas en forma de oval, hechas con adobes hechos con moldes de madera.

La palabra "adobe" proviene del árabe "Toub", que significa ladrillo. Otras aplicaciones históricas de tierra apisonada se encuentran en Caral, Perú, la ciudad más antigua de América (2557 a.C.); la Gran Pirámide de Cholula, Puebla, México (700 a.C.), que es la más voluminosa del mundo; la ciudad de Paquimé, en Chihuahua, México (1200 a.C.) tenía hasta cuatro pisos hechos totalmente de tierra.

Es importante mencionar que los ejemplos más antiguos de construcción con tierra en el mundo o que han utilizado la tierra como el principal material de construcción se encuentran en las zonas áridas y cálidas del mundo. La fuerza de muros de tierra no estabilizada corresponde a la unión de las arcillas que hay en estos lugares. Si las estructuras de tierra no tienen un sistema adecuado de protección contra el agua, podrían ser erosionadas con el agua, perder estabilidad y colapsar. Sin embargo, todas las culturas constructivas que se han desarrollado desde la antigüedad contemplan alternativas correctivas para resolver y evitar este problema.

Las propiedades termo físicas de la tierra son útiles para su aplicación en edificios, en particular si se encuentran en regiones climáticas con grandes oscilaciones de temperatura. El retardo térmico de un material es el tiempo que tarda en pasar el calor a través de él. Entre más grueso sea este material, más tiempo tomará para que lo atraviesen las “olas de calor”. La reducción de temperatura cíclica en la superficie interior con relación a la superficie exterior se conoce como el factor de decremento, y es la relación de la temperatura máxima de interior a la temperatura externa máxima. Por lo tanto, un material con un valor de decremento de 0,5 que experimenta un 20K de variación diurna de la temperatura de la superficie externa experimentaría solamente una variación 10K en la temperatura de superficie interna. Debido a estas propiedades, el uso de la tierra es una alternativa adecuada, en particular en la región climática que las oscilaciones de temperatura están por encima de 10K. Por lo tanto, el uso de las propiedades térmicas de la tierra es una forma de enfriamiento y calefacción pasiva adecuada para contribuir a proporcionar las condiciones de confort térmico de los ocupantes (García, 2013 y 2015).

Sin embargo, el estudio técnico de estos fenómenos termo físico no se ha hecho en muchas partes del mundo y algunos autores consideran que “La arquitectura tradicional de las zonas cálidas áridas utiliza intuitivamente el recurso de la acumulación térmica al disponer construcciones de gruesas particiones de piedra o adobe con escasas aberturas, pero lo hace a través de procesos empíricos, que no permiten cuantificar y por ende controlar los efectos físicos obtenidos y que no generan alternativas para las condiciones de absorción/ restitución”. (Tudela, 1982)

Siendo éste un campo de oportunidad para poder obtener datos precisos y certeros para alguna región específica y así poder demostrar cuantitativamente los beneficios térmicos de la tierra en comparación con los materiales semi-industrializados.

En la actualidad el 63% de la vivienda es producto de la auto-construcción en nuestro país. Sin embargo, la mayoría de las casas están construidas con cemento y bloques de concreto, así como acero y materiales industrializados. Actualmente, el 90% de la construcción de viviendas en el país basa su construcción en cemento y concreto, sobre todo en las paredes, el uso de bloques de concreto está ampliamente utilizado en México. No obstante, este uso implica un alto consumo de energía y una enorme emisión de CO_2 y otros gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, provocando un severo daño ambiental a nivel mundial y la distorsión de nuestro equilibrio natural que resulta en efectos destructivos en el planeta, como el calentamiento global y el cambio climático, la deforestación, la destrucción de la capa de ozono, entre otros (IPCC, 2014). Por lo tanto, es importante encontrar alternativas a esta situación y el uso de la tierra para la construcción de casas y edificios se convierte en una alternativa prometedora para resolver este problema.

2 EL PAPEL DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON RELACIÓN A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS LOCALES

Hoy en día, la mayoría de los edificios modernos incorporan estilos arquitectónicos y materiales que hacen caso omiso de las condiciones climáticas locales, así como sus factores culturales y tradicionales. Este es el caso predominante de muchos edificios contemporáneos situados en diferentes regiones climáticas. Como resultado, tales edificios son dependientes de sistemas mecánicos y eléctricos para controlar el ambiente interior. Esta situación hace que se incremente altamente el consumo de energía y los costos que los sistemas artificiales de iluminación y aire acondicionado (AC) generan, además incrementan también los problemas de falta de confort de los ocupantes, tanto higrotérmico como visual, entre otros. Por lo tanto, el clima juega un papel importante en el desempeño de un edificio y es muy importante tener una buena elección de las estrategias bioclimáticas desde la fase conceptual del diseño para la construcción, como la orientación, control solar y ventilación natural, entre otros. Bajo este enfoque, la envolvente de los edificios juega un papel fundamental, y el uso de la tierra en las paredes puede proporcionar beneficios y ventajas significativos para alcanzar las condiciones de confort higrotérmico interior de los ocupantes y así reducir el consumo de energía para la climatización de los espacios arquitectónicos.

El objetivo de esta investigación es analizar, evaluar y caracterizar un prototipo experimental hecho con un sistema de construcción de tierra vertida compactada manualmente (TVC), comparado con un sistema industrializado convencional (SIC), con el objetivo de demostrar que la utilización del sistema de TVC puede ofrecer mejores condiciones térmicas, económicas y ambientales que los CEI. Estudios previos han informado de los beneficios del uso de la tierra vertida compactada como el material básico para viviendas de bajo costo (Guerrero et al, 2015; Minke, 2006 y 2012).

3 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio de esta investigación se encuentra en una comunidad rural típica en el estado de Puebla, México. El clima es templado con altas variaciones de temperatura diaria y estacional, y una temperatura de bulbo seco medio anual (TBS) de 15,7 °C; temperatura mínima anual de 10,3 ° C; y una temperatura máxima anual de 21,1 °C. La precipitación anual en Aquixtla es 727 mm. Irradiación solar anual media de 623 Watts/m^2.

Para determinar la viabilidad de construir los prototipos en el terreno previsto fue necesario hacer un análisis solar para verificar que el asoleamiento en ambos prototipos se comportara de la manera más semejante posible, esto hará que los datos obtenidos en las mediciones de temperatura al interior de dichos prototipos sea lo más certera. (Figuras 1, 2 y 3)

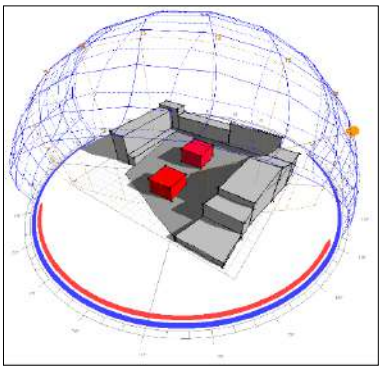


Figura 1. Análisis solar 9hrs. 21 de marzo 2016

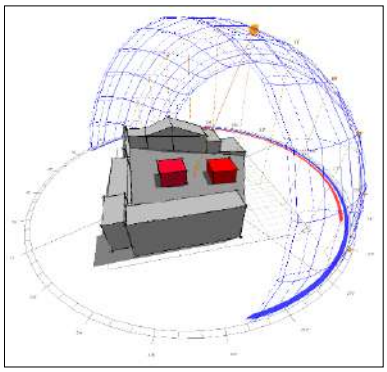


Figura 2. Análisis solar 13hrs. 21 de marzo de 2016

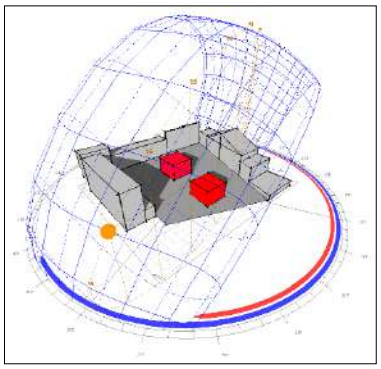


Figura 3. Análisis solar 17hrs. 21 de marzo de 2016

La configuración de la construcción de cada uno de los dos prototipos consistió en las siguientes dimensiones: 3 m de largo por 3 m de ancho y 2,4 m de altura. El objetivo fue evaluar el rendimiento térmico del sistema de Tierra Vertida Compactada (TVC) en relación con el sistema SIC. Ambos prototipos fueron hechos con el mismo grosor en las paredes (0,23 m), mismo espesor en los techos (ver sistema constructivo en la Figuras 4, 5 y 6), con el mismo volumen de aire interior; puertas y ventanas. Por lo tanto, la geometría y dimensiones, la posición y los materiales fueron los mismos en ambos prototipos, pero las paredes, que para el TVC se compactaron de forma manual en una cimbra y para el SIC, se emplearon paredes de bloques de concreto convencionales. Por lo tanto, la única variable en ambos prototipos fue el material de las paredes. La construcción de los dos prototipos fue hecha con materiales de la región, con base en la tierra, madera en los techos, puertas y ventanas, lo que hace que la construcción sea más económica respecto a sistemas constructivos con materiales industrializados, lo cual nos da importantes ventajas sustentables y con construcciones de baja energía incorporada.

Figura 4. El módulo de block

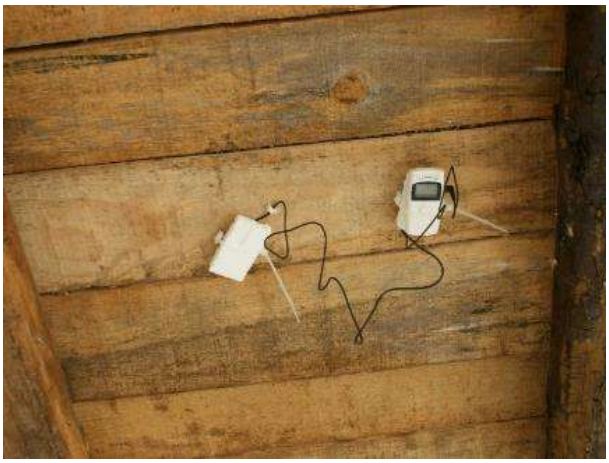
Figura 5. La obra de TVC

Figura 6. Los prototipos terminados

4 METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El diseño y construcción de los dos prototipos siguió un procedimiento altamente controlado para que ambos tuvieran las mismas características físicas con excepción del material de los muros. El seguimiento de las temperaturas internas y humedades relativas se llevó a cabo después de un mes para que los dos prototipos estuvieran completamente secos. Hubo dos períodos de control representativos, durante el periodo de bajo calentamiento, del 10 de abril al 29 de abril de 2016, y uno en época de sobrecalentamiento, del 29 de mayo al 3 de junio de 2016. Se colocaron seis registradores de datos (Figuras 7 y 8) en cada uno de los dos prototipos, cuatro para documentar las temperaturas de la superficie de cada orientación (norte, este, sur y oeste), uno para registrar la temperatura del techo, y otro la temperatura ambiente en medio de los espacios experimentales. Los intervalos se dieron a cada 30 minutos. Durante estos períodos de seguimiento de los dos prototipos se cerraron prácticamente sin que hubiera cambios de aire. Las temperaturas externas también se registraron simultáneamente a las mediciones de los dos prototipos.

Además, fueron aplicados unos cuestionarios a pobladores locales en donde se trató de obtener más datos que avalaran el confort o disconfort del interior de ambos prototipos, dichos cuestionarios se aplicaron a un grupo representativo de personas para determinar su percepción dentro de los inmuebles.



Figuras 7 y 8. Vista de los registradores de datos colocados sobre el muro y plafón para medir temperaturas de las superficies.

5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Durante un día típico de sobrecalentamiento (12 de abril, 2016) con una temperatura externa máxima de 28.5 °C y una temperatura exterior mínima de 18,5 °C, que tiene 10K de oscilación térmica, el TVC tenía una temperatura mínima de bulbo seco (TBS) de 20 °C y una máxima de 26 °C, entonces el intervalo de tiempo fue de 3,5 horas, con un factor de reducción de 0,91, mientras que el prototipo SIC tenía una DBT mínima de 20.5 °C y una DBT máxima de 26 °C.

A pesar de que el lapso de tiempo de los dos prototipos fue similar durante las horas de temperaturas exteriores bajas, la temperatura ambiente en el módulo de TVC fueron más altos que en el CIS y más bajos durante las horas con temperaturas más altas.

El rendimiento térmico del prototipo de TVC con relación al SIC tuvo una temperatura externa máxima de 27.5 °C y una temperatura exterior mínima de 15.5 °C, que se encuentra a 12K oscilaciones de temperatura, el TVC tenía una temperatura mínima (TBS) de 18.5 °C y una TBS máxima de 25 °C, entonces el intervalo de tiempo fue de 3,5 horas, con un factor de decremento de 0.90, mientras que la SIC tenían una TBS mínima de 19 °C y una TBS máxima de 25.5 °C (Figura 9).

En este caso, la misma situación que en el caso anterior se puede observar cómo el lapso de tiempo de los dos prototipos fue bastante similar durante las horas de temperaturas exteriores bajas, la temperatura ambiente en el módulo de TVC fueron más altos que en el SIC y más bajos durante las horas con temperaturas más altas. Esta situación revela que el prototipo de TVC tiene un confort térmico superior que el sistema SIC. Vale la pena mencionar que la aplicación de los cuestionarios ha demostrado que la mayoría de las treinta personas que ocuparon ambos prototipos durante unos minutos, percibe las condiciones interiores del prototipo experimental de TVC como más cómodo bajo condiciones de sobrecalentamiento y bajo calentamiento en relación con el prototipo de SIC.

Durante la última etapa del trabajo experimental, las temperaturas globales radiantes interiores (TGR) se registraron simultáneamente con la temperatura de bulbo seco ambiente en el prototipo de TVC, utilizando un termómetro de globo digital. La figura 10 muestra una temperatura externa máxima de 23.5 °C y una temperatura exterior mínima de 17,5 °C, que es un 6K oscilaciones de la temperatura, el prototipo de SIC tenía una temperatura mínima de TBS de 18.5 ° C y una TBS máxima de 25 ° C. A continuación, el lapso de tiempo fue de 6 horas, con un factor de decremento de 1, mientras que el módulo de SIC tenía una TBS de 21 ° C y una máxima de 25 ° C (Figura 10). En este caso, la misma situación que en el caso anterior se puede observar cómo el lapso de tiempo de dos prototipos fue bastante similar durante las horas de temperaturas exteriores bajas, la temperatura ambiente en el prototipo de TVC fueron más altos que en el módulo de SIC y más bajos durante las horas con temperaturas más altas. Sin embargo, es importante notar que la TGR registrada siguió la TBS durante la noche y hasta 8 de la mañana cuando siendo mayor la TGR que la TBS de las 8:30 am, hasta el mediodía, y luego ambas temperaturas fueron similares a las 3:30 pm, dónde la TGR comenzó a ser más baja hasta 5 horas más tarde, es decir, las 8:30 pm. Entonces, ambas temperaturas tuvieron un comportamiento similar hasta la medianoche.

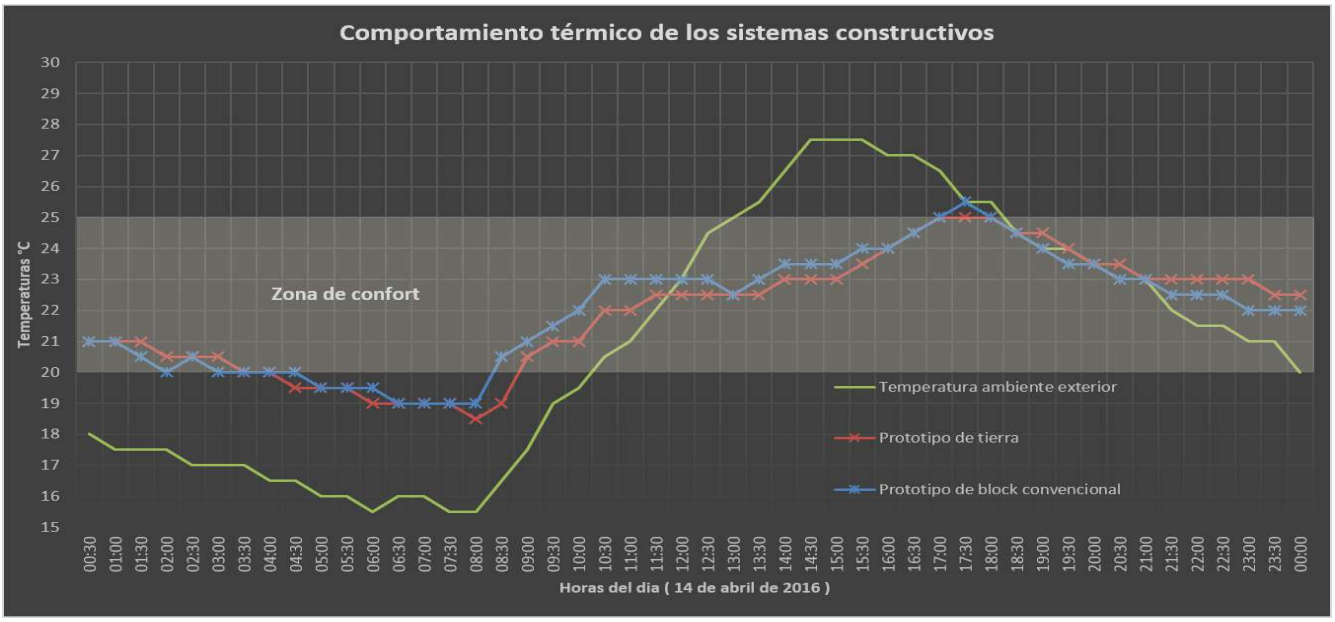


Figura 9. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 14 de abril de 2016

Es importante aclarar que el tiempo civil en Aquixtla es de 1 hora y 36 minutos por delante del tiempo solar, esta es la razón por la que las condiciones mínimas y máximas de temperatura registradas en ambos prototipos, tienen un tiempo de desplazamiento respecto al período de tiempo.

En cuanto a los resultados de la TRG en relación con el prototipo de TVC y el de SIC, es evidente que la temperatura radiante está estrechamente relacionada con la percepción de confort térmico de los ocupantes en el TVC que en relación con el prototipo SIC. Otros estudios han demostrado que el cuerpo humano es más sensible a la temperatura radiante media que a temperaturas de bulbo seco. Esta situación también demostró que el módulo de TVC tiene una percepción de confort térmico mejor que el prototipo de la SIC. Además, la aplicación de los cuestionarios también ha demostrado que la mayoría de las treinta personas que participaron en ambos prototipos percibe las condiciones del interior del prototipo experimental de TVC como más cómodas en periodos de sobrecalentamiento y bajocalentamiento en relación con el prototipo de SIC.

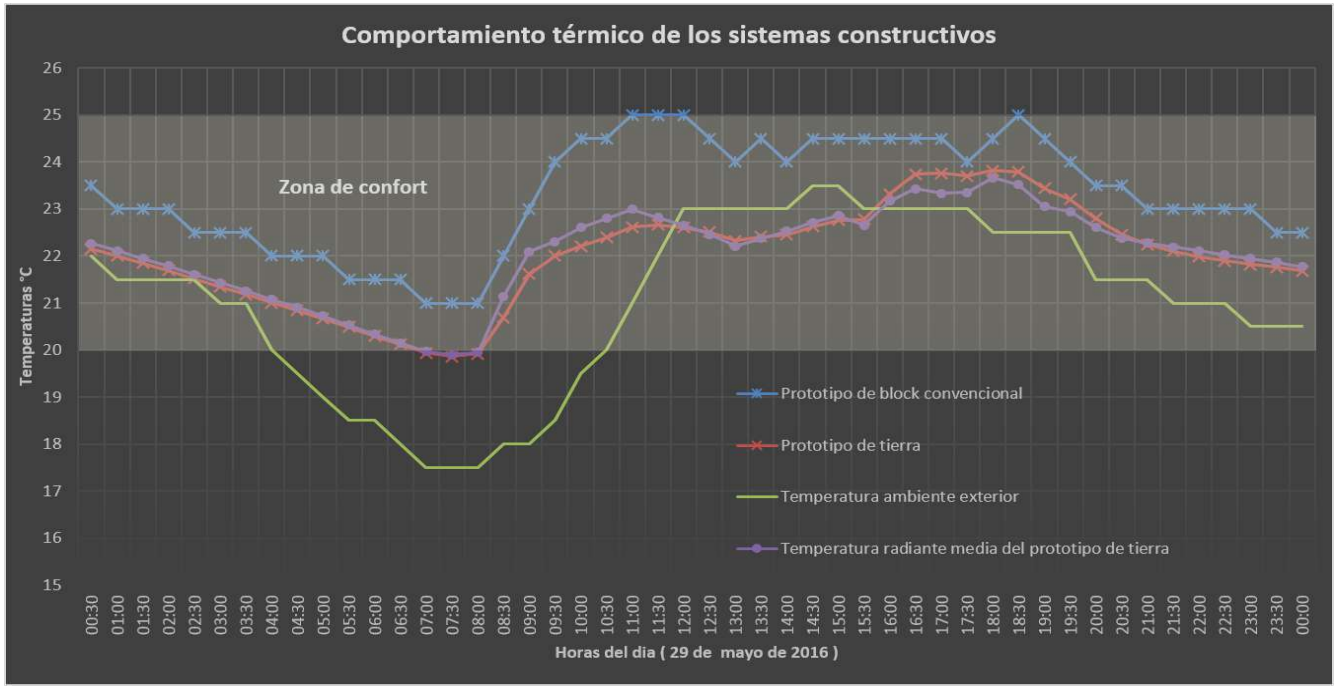


Figura 10. Comportamiento térmico de ambos prototipos, temperatura exterior y temperatura radiante interior en el prototipo de tierra para el día 29 de mayo de 2016

6 CONCLUSIONES

Un análisis de costos llevado a cabo para ambos prototipos ha demostrado que el sistema de TVC es 40% más barato que el sistema de SIC, esto se debe a que la tierra con la que se hizo fue tomada del mismo lugar de la construcción, por lo tanto, no tenía prácticamente costo alguno, a diferencia del SIC, donde el costo de cada bloque lleva consigo el costo de fabricación, de almacenamiento, de transporte y la venta de cada pieza. Otros elementos que aumentan el costo del SIC y lo hacen más caro en comparación con de TVC, son los materiales utilizados para la unión de los bloques, además, el tiempo de construcción del SIC es más largo. Es importante tener en cuenta que en este análisis de costo el precio de pintura natural que se aplicó a ambos prototipos era muy bajo y se decidió omitirlo, esto debido a que los materiales utilizados incorporaban cal natural, mucílago de nopal y agua, ampliamente abundantes en la región. Por otra parte, la acción esperada con mejor rendimiento térmico y bajo impacto ambiental del sistema utilizando tierra, lo convierten en una alternativa bioclimática y de construcción sustentable más adecuado (Guerrero, 2014; Hall et al, 2012; Kwok et al, 2014). Además, mediante el uso de la nueva tecnología disponible y materiales optimizados basados en la tierra tratada adecuadamente, los edificios modernos pueden ser construidos con un enfoque más sustentable.

La tierra utilizada para la construcción del prototipo de TVC fue tomada directamente desde el mismo sitio donde fue construido, lo que reduce el impacto ambiental y la huella ecológica en relación con el SIC. Desde el punto de vista económico, el prototipo de TVC fue 40% más barato que el SIC. Por otra parte, la tierra es 100% reciclable y el concreto utilizado en los bloques lo es.

A pesar de que las ventajas térmicas del de TVC en comparación con el prototipo de SIC no fueron significativas, su menor costo y atributos ambientales hacen que sea una alternativa sostenible más adecuada.

También es importante mencionar que la posición y el grosor de los bloques utilizados en las paredes de prototipo de SIC no son las utilizadas las unidades de vivienda en el país y se eligieron estas condiciones para tener las mismas dimensiones que el prototipo de TVC. Se espera que los resultados de este trabajo de investigación se puedan aplicar en lugares con clima templado o con condiciones climáticas áridas calientes donde se presentan cambios de temperatura más drásticos, y los beneficios y propiedades térmicas de la tierra sean más evidentes y puedan ayudar a mejorar las condiciones interiores de confort de los ocupantes del edificio, así como el medio ambiente, la economía y la calidad de vida.

REFERENCIAS

García Chávez, J. R., Fernández, F. (2013). Application of Combined Passive Cooling and Passive Heating Techniques to Achieve Thermal Comfort in a Hot Dry Climate. Elsevier 2013 ISES Solar World Congress Energy Procedia.

García Chávez, J. R., Fernández, F. (2015). Application of Passive Cooling and Passive Heating as Sustainable Environmental Strategies to Reduce the Energy Consumption in Buildings in Hot Dry Climates. CISBAT 2015 Proceedings.

Gernot, M. (2006). Earth Construction Handbook: The Building Material. Earth in Modern Architecture. Wit Press.

Gernot, M. (2012). Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhauser; 3rd revised edition.

Guerrero, L., Soria, J., García Chávez, J. R., Fernández, F. (2015). Comportamiento Térmico un Módulo Experimental Construido con Tierra Vertida Compactada en la Ciudad de México. Euro-Elecs 2015 Latin-American and European Conference on Sustainable Buildings and Communities. Proceedings, Guimaraes, Portugal.

Guerrero Baca, L. (2014). Reutilización del Patrimonio Edificado en Adobe, México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

Hall, M., Linsday, R., Karenyoff, M. (2012). Modern Earth Buildings, Materials, Engineering, Constructions and Applications. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy.

IPCC Climate Change 2014 (2014). Synthesis Report. Summary for Policymakers. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kwok, Alison G.; Grondzik, Walter T. (2014). The Green Studio Handbook. Environmental Strategies for Schematic Design (Third Ed.). 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA: Architectural Press.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). World Heritage Convention (2016). http://whc.unesco.org/en/list//en/news/1049/en/list.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA DE DOBLE CUBIERTA VENTILADA CON LÁMINA METÁLICA PARA DISMINUIR EL IMPACTO DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA EN LA VIVIENDA MEDIA EN PUERTO VALLARTA, JALISCO.

Sandra E. Rodríguez Trejo, Héctor Valerdi Madrigal y Pablo D. Elías López
Posgrado en Diseño Bioclimático, Universidad Autónoma Metropolitana, Sn. Pablo #180, Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, Ciudad de México, 02200, México.
Tel. (55)5318-9000, **sandraelisar@gmail.com**

RESUMEN

El buen desempeño térmico de las envolventes de los edificios en climas cálidos es un requerimiento importante para garantizar condiciones adecuadas de confort térmico al interior del espacio habitable. Los techos son el elemento de la envolvente que recibe la mayor parte de la radiación solar, lo que puede ocasionar el sobrecalentamiento del ambiente al interior de las edificaciones.

Una cubierta energéticamente eficiente debe reflejar tanta radiación solar como sea posible y emitir el calor absorbido rápidamente, para mejorar la protección se puede implementar el uso de sistemas de doble cubierta ventilada, una solución de acondicionamiento pasivo útil para frenar las ganancias de calor a través de los techos.

Una de las ventajas de estos sistemas es la reducción de los flujos de calor transmitidos por las estructuras expuestas a la radiación solar, gracias al efecto combinado del sombreado de las superficies y del calor extraído por el flujo de aire.

El material de la segunda cubierta debe cumplir con ciertas características como son los coeficientes de absortancia y transferencia de calor bajos, las láminas metálicas poseen potencial para utilizarse como segunda cubierta gracias a que son un material altamente emisivo, y tienen altos valores de reflectancia solar cuando tienen acabados en colores claros, estas propiedades contrarrestan la desventaja de la rápida trasferencia de calor por conducción que posee el metal.

En este trabajo se examina cómo pueden reducirse las ganancias térmicas en el techo y mejorar el ambiente térmico interior mediante la adaptación de un sistema de doble cubierta ventilada con lámina metálica. Se realizó una investigación experimental descriptiva, que consistió en registrar en campo el comportamiento térmico de módulos experimentales para ser comparados con un módulo de control, con el objetivo de definir las características geométricas, inclinación y orientación, más adecuadas para el diseño de la segunda cubierta.

ABSTRACT

A good thermal performance of the buildings envelope is an important requirement to ensure good indoor living conditions in hot climates. The roof surface is the foremost recipient of solar radiation, which may cause over-heating in the interior spaces.

An energy efficient cover must reflect as much radiation as possible and emit the absorbed heat quickly, to improve the protection the use of a ventilated double roof system can be achieved, this is a popular passive cooling solution to curb heat gains on roofs.

One of the advantages of this systems is the reduction of heat fluxes transmitted by the structures exposed to solar radiation, due to combined effect to shading surfaces and removed heat by airflow in the ventilated cavity.

The second roof material should have certain characteristics that makes it energy efficient, as are low absorption and heat transfer coefficients. The metal sheets have potential to use as second roof because they are a highly emissive material, and have high solar reflectance values when they have a light color coating. This properties offset the rapid heat transfer through the metal sheet.

This work examines how can be reduced the heat gains through the roof and improve the indoor thermal environment by adapting a ventilated double roof system with metal sheets. Is a experimental descriptive research, consisted in recording the thermal behavior of experimental modules to be compared with a control module, the objective is define the second cover geometric characteristics, inclination and orientation, and choose the more suitable for the best design.

Palabras claves: Doble cubierta, techos, absortancia, reflectancia, lámina metálica, ventilación, clima cálido.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Puerto Vallarta, en el estado de Jalisco, se caracteriza por su clima cálido húmedo y su arquitectura tradicional donde predominan las cubiertas de teja de barro. Sin embargo, en los últimos años, su acelerado crecimiento demográfico (el número de viviendas totales aumentó 25.2% en diez años[1]) trajo consigo un auge en la construcción de vivienda utilizando sistemas constructivos y materiales que no corresponden a la realidad climática local, y por lo tanto no son adecuados para propiciar condiciones adecuadas de

[1] Entre 2005 y 2010. Fuente: CONAVI, 2016.

confort térmico al interior. Esto obliga a los habitantes a utilizar equipos de aire acondicionado y ventiladores durante el verano, ocasionando un alto consumo de energía en detrimento de la economía de los hogares y del medio ambiente, la Figura 1 muestra que el aire acondicionado representa el 55% del consumo energético de una vivienda en clima cálido.

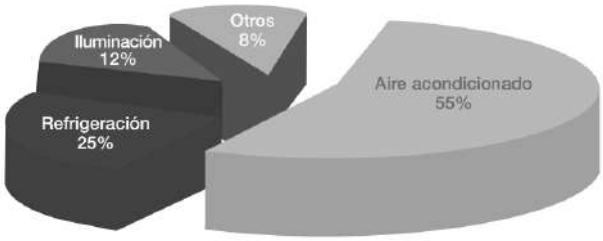


Figura 1. Distribución del consumo de energía eléctrica en casas habitación en clima cálido en México. Fuente: Olivera, 2008.

El diseño de edificios en lugares con clima cálido no extremo requiere sistemas de adecuación climática para evitar que se sobrecaliente el edificio (Givoni, 1998 citado por Vázquez et al, 2008) y propiciar que su carga térmica se minimice, manteniendo la frescura de los espacios. Dentro de los sistemas pasivos de climatización que cumplen con esta función, se cuenta con los sistemas de descarga de calor (SDC), los cuales permiten captar el flujo de calor que recibiría la envolvente de una edificación, y que ocasionaría el aumento de temperatura del aire interior, para descargarlo al medio ambiente y mejorar las condiciones de confort térmico del usuario (Hernández et al, 2012).

Los sistemas de doble cubierta ventilada son un tipo de SDC empleado en los techos, generalmente consisten en proporcionar una segunda cubierta por encima del techo de una edificación dejando un espacio vacío entre ellos, ésta cubierta secundaria (blindaje externo) contribuye a disminuir las ganancias térmicas al formar un escudo contra la radiación solar y proporcionar sombra al techo principal, por su parte el espacio de aire propicia del desalojo del exceso de calor y humedad mediante la ventilación, de forma que se impide que el calor procedente de los rayos solares llegue a la superficie que está en contacto con el interior de la edificación.

El objetivo principal de este trabajo es examinar cómo pueden reducirse las ganancias térmicas en el techo de las viviendas y mejorar el ambiente térmico interior mediante la adaptación de un sistema de doble cubierta ventilada utilizando lámina metálica como blindaje externo.

DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO

El clima de Puerto Vallarta se considera cálido húmedo, tiene una temperatura promedio anual máxima de 35.3°C, promedio de 26.1°C y mínima de 20.6°C, con una oscilación térmica de 14.7°C. La humedad relativa promedio es de 78%, con una mínima promedio de 60.9%. La precipitación pluvial es de 1454.6 mm, y los vientos dominantes provienen del suroreste con una velocidad promedio diaria de 1.63 m/s. De acuerdo con los datos de temperatura, el clima de Puerto Vallarta se encuentra el 47.9% del año en condiciones de sobrecalentamiento, y sólo durante el 27.4% hay sensaciones de confort.

Se analizó la transferencia de calor a través de la losa de concreto, sistema constructivo que predomina en el 82.5% del total de viviendas habitadas en Puerto Vallarta, al cual se le añadió una segunda cubierta de lámina metálica, el segundo material más popular y que además ofrece otras ventajas como la ligereza, altos valores de reflectancia solar y emisividad y facilidad de implementación sobre techos existentes.

Con el fin de evaluar el sistema de doble cubierta ventilada se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva, la cual consistió en registrar en campo el comportamiento térmico de módulos experimentales de iguales dimensiones, materiales y acabados. El experimento constó de tres fases realizadas en dos periodos, el primero durante a la temporada templada en la segunda semana de febrero (invierno), y el segundo durante la temporada calurosa en la tercera semana del mes de mayo (primavera).

Objetivos

Realizar una evaluación comparativa de diferentes configuraciones del sistema de doble cubierta a fin de identificar y recomendar aquellas más eficientes en la reducción de la transmisión de calor.

Examinar el comportamiento térmico de la lámina metálica con acabado en color blanco en el clima cálido húmedo y su potencial de uso en sistemas de doble cubierta y en el enfriamiento radiativo en dicho clima.

MATERIALES Y MÉTODO

Se utilizaron tres módulos experimentales (denominados ME) de base cuadrada de 80cm por lado y de 47cm de alto, construidos con barrotes de madera de pino, y paredes y piso de MDF de 9mm pintados con pintura vinil-acrílica de color blanco, se forraron al interior con placas de poliestireno expandido de 5 cm de espesor. A cada uno de los módulos se les colocó una cubierta de losa de concreto armado de 70x70cm y 12cm de espesor y se ubicaron sobre una base de bloques de poliestireno de 10x15cm para evitar el contacto directo con el suelo.

Se utilizaron 3 registradores de datos (data loggers) tipo USB para humedad y temperatura marca Ampere modelo EL-USB-2, y 6 registradores de datos para temperatura con termopar tipo K, marca Ampere modelo EL-USB-TC-LCD. La programación del equipo y la descarga de información se realizaron a través del software EasyLog USB versión 5.53 proporcionado por el fabricante. El experimento constó de tres fases:

Fase Uno – Selección de color

Consistió en pintar la superficie exterior de la losa de cada uno de los módulos experimentales (ME) con pintura vinil-acrílica de color blanco (ME1), plata (ME2) y terracota (ME3), se colocaron en cada módulo dos equipos EL-USB-TC-LCD con sus respectivos termopares, uno en el centro de la superficie interior de la losa y otro en la exterior en forma paralela (Figura 2), se registraron los datos

de temperatura cada 30 minutos durante tres días con la finalidad de caracterizar el comportamiento térmico de las superficiales externas e internas de la losa de concreto según el color de su superficie expuesta al Sol.

Figura 2. Módulos experimentales durante la Fase Uno.

Fase Dos – Comportamiento de la doble cubierta en invierno

Con los datos obtenidos de la Fase Uno, se eligió el color que más contribuyó a la reducción de la temperatura de la superficie interna de la losa, y se pintaron todos los módulos de la misma manera. A dos de los ME se les colocó una segunda cubierta de lámina metálica para proporcionarle sombra a la losa durante la mayor parte del día, dichas cubiertas tuvieron las siguientes características:

- ME1. Cubierta de lámina metálica calibre 26 con acabado pintro color blanco. Dimensiones: 0.80x1.20m. Posición: inclinada 15° hacia el Sur sobre estructura de madera, con la parte más baja a 30 cm de la superficie de la losa. Protección solar de MDF al Oeste.
- ME2. Cubierta de lámina metálica calibre 26 con acabado pintro color blanco. Dimensiones: 0.80x1.20m. Posición horizontal sobre estructura de madera a una distancia de 60 cm de la superficie de la losa. Protección solar de MDF al Oeste.

El ME3 se utilizó como módulo de control. A cada uno de los ME se les colocaron data loggers EL-USB-TC-LCD con sus termopares en la cara externa e interna de la losa de concreto, y un EL-USB-2 en el centro del espacio entre la cubierta de lámina y la losa, de la misma forma el registro de datos se hizo cada 30 minutos, a lo largo de 15 días durante el mes de febrero.

Fase Tres – Comportamiento de la doble cubierta en primavera

Se llevó a cabo el mismo procedimiento de la Fase Dos, todos los data loggers se programaron para registrar los datos del comportamiento térmico de los tres ME cada 30 minutos durante 15 días del mes de mayo.

Paralelamente, para medir las condiciones medioambientales durante las tres fases experimentales, se utilizó un data logger EL-USB-2 programado para registrar datos cada 30 minutos, ubicado cerca de los ME dentro de una caja de MDF color blanco de 15x15x20cm con ranuras de 3cm a lo largo de sus caras verticales. La disposición de los ME para los experimentos se presenta en la Figura 3, se procuró que todos recibieran la misma cantidad de radiación solar a lo largo del día y que no se proyectaran sombras sobre el módulo de control.

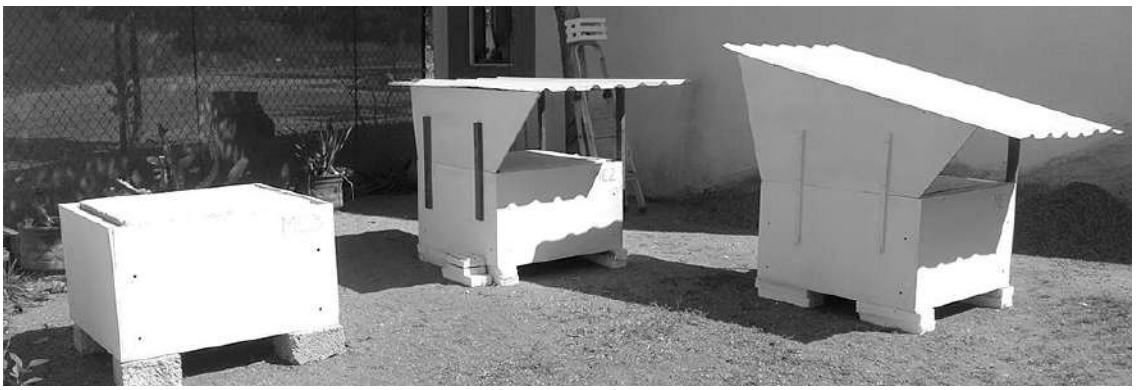


Figura 3. Disposición de los Módulos experimentales.

Es importante señalar que la inclinación de la segunda cubierta se eligió con base las variaciones porcentuales de la energía proveniente de la radiación solar directa sobre un techo inclinado (Gómez, 2003), así se determinaron la orientación e inclinación más desfavorables en la latitud del sitio en estudio con la finalidad de evaluar el sistema de doble cubierta bajo las peores condiciones de soleamiento, infiriendo que su desempeño será mejor en cualquier otra orientación.

Elementos de análisis

El estudio se trata de caracterizar el comportamiento térmico del sistema de doble cubierta evaluado experimentalmente, la información numérica obtenida del monitoreo de las diferentes configuraciones de cubierta es utilizada para proceso de análisis bajo tres elementos:

- Temperaturas características: Corresponden a la temperatura máxima (Tmáx); temperatura mínima (Tmín); temperatura media (Tm) y oscilación de la temperatura (Osc).
- Confort térmico: se realiza el análisis mediante de las condiciones de confort térmico según la temperatura dentro de los módulos. La temperatura de confort térmico (TC) para Puerto Vallarta ha sido definida en 25.7°C. La oscilación de temperatura promedio anual es de 14.7°C, por lo que de acuerdo con Morillón (2004, citado por Barrios et al, 2010) la amplitud de la zona de confort se obtiene partir de ±3.0°C de la TC, es decir la ZC se establece entre los 22.7°C y 28.7°C.
- Temperatura de la superficie interior del techo: Koenigsberger y Lynn (1974, citados por Guerrero, 2011) establecen que en climas cálido húmedos la temperatura del techo no debe exceder la temperatura del aire por más de 4K. Al interesar en este estudio únicamente la diferencia numérica, se establece que el incremento en la temperatura de la superficie interior del techo respecto a la temperatura ambiente (ΔT) no debe ser mayor a 4°C

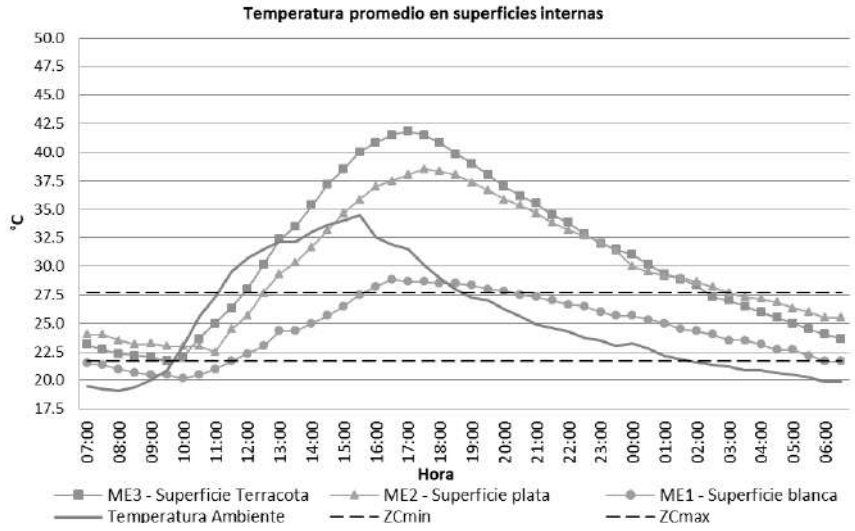
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fase Uno: La Gráfica 1 presenta el resultado del promedio de temperaturas registradas en la superficie interna de la losa en cada uno de los ME, es notoria la diferencia entre la losa con superficie blanca, con un máximo promedio de 28.8°C, la losa con superficie terracota, que alcanzó los 41.8°C, esto representa una diferencia de 13°C. La superficie interna de la losa en color plata alcanzó un máximo de 38.5°C, valor 9.7°C más alto que en la losa en color blanco.

El valor máximo alcanzado por la superficie exterior color blanco fue de 30.7°C a las 15:00 horas, a esa misma hora la superficie exterior en color plata alcanzó un promedio máximo de 42.3°C y la superficie terracota registró una temperatura promedio máxima de 45.7°C, 11.7°C por encima de la temperatura ambiente (TA).

La oscilación promedio de la temperatura ambiente fue de 15.4°C, al comparar estos resultados se observa que el ME1, con la superficie externa en color blanco, fue el único en el que se presenta una reducción de la oscilación de la temperatura, además destaca que los valores promedio horarios durante el día no rebasan la temperatura ambiente.

Cabe señalar que estas mediciones fueron realizadas durante la temporada templada, por lo que se puede suponer que durante épocas más calurosas las temperaturas alcanzadas por las losas registrarían valores más altos.

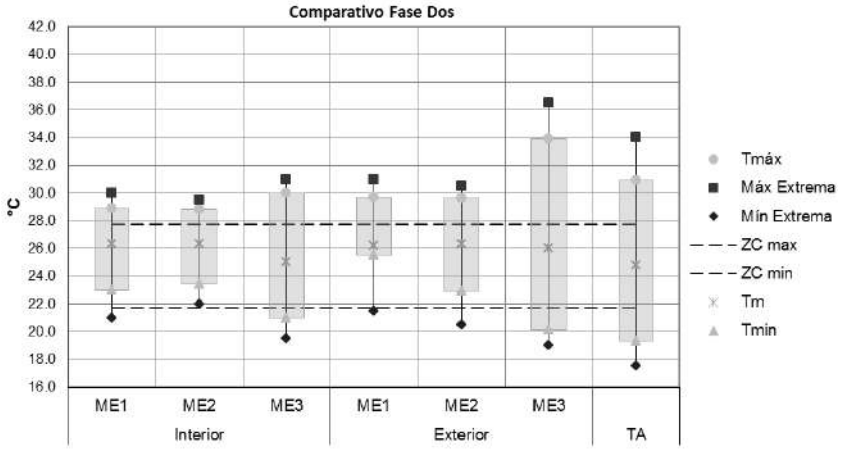


Gráfica 1. Temperatura promedio registrada en superficies internas de la losa durante la Fase Uno.

Fase Dos: La Gráfica 2 representa los resultados promedio horarios y extremos de las temperaturas registradas en las superficies internas y externas de las losas, es notoria la reducción de la oscilación de la temperatura en las losas de los ME que cuentan con segunda cubierta respecto al módulo de control. La oscilación promedio de la temperatura de la superficie interna en el ME1 fue de 6.0°C y en el ME2 de 5.4°C, mientras que en el módulo de control (ME3) fue de 9.0°C.

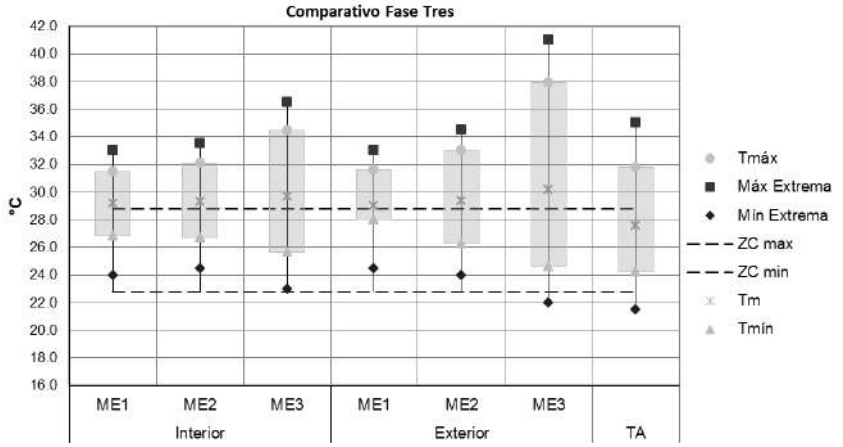
La temperatura ambiente estuvo dentro del rango de confort la mayor parte del tiempo, pero se presentó bajo-calentamiento (frío) antes del amanecer, esto es durante el 26.8% del tiempo, y hubo sobrecalentamiento durante el 27.6% del tiempo, entre las 12:00 y 18:00 horas.

Durante esta fase, la temperatura de la superficie interior del techo no rebasa la TA por más de 4°C durante el 77.6% del tiempo monitoreado en el ME1, el 75.0% en el ME2 y el 100% en el ME3, de lo que se concluye que durante este periodo del año la segunda cubierta evita que la losa pierda calor durante las noches y antes del amanecer.



Gráfica 2. Gráfica comparativa de resultados obtenidos durante la Fase Dos.

Fase Tres: Los resultados del monitoreo de los módulos durante la Fase Tres, en la temporada calurosa se presentan en la Gráfica 3, es notorio que la oscilación de la temperatura ambiente es menor que en la temporada templada, la temperatura media y mínima se encuentran dentro del rango de confort. La variación de temperatura en la superficie interna del ME1 fue de 4.7°C y en el ME2 de 5.4°C, ambas representan una mejora frente al módulo de control que tuvo una oscilación de 8.8°C.
Durante la temporada en que fueron realizadas estas mediciones, la TA estuvo en condiciones de confort durante el 62.6% del tiempo, y se presentó sobrecalentamiento durante el 37.3%.



Gráfica 3. Gráfica comparativa de resultados obtenidos durante la Fase Tres.

Los resultados también mostraron que durante la Fase Tres la temperatura interior de la losa no rebasa la temperatura ambiente por más de 4°C durante el 82.0% del tiempo en el ME3, el 93.8% en el ME2, y el 94.9% en el ME1 (Figura 4). Es notorio el desfase horario en que se presentan las temperaturas más altas, para el ME1 entre las 22:00 y las 7:00, y para el ME3 entre las 16:00 y las 2:00.

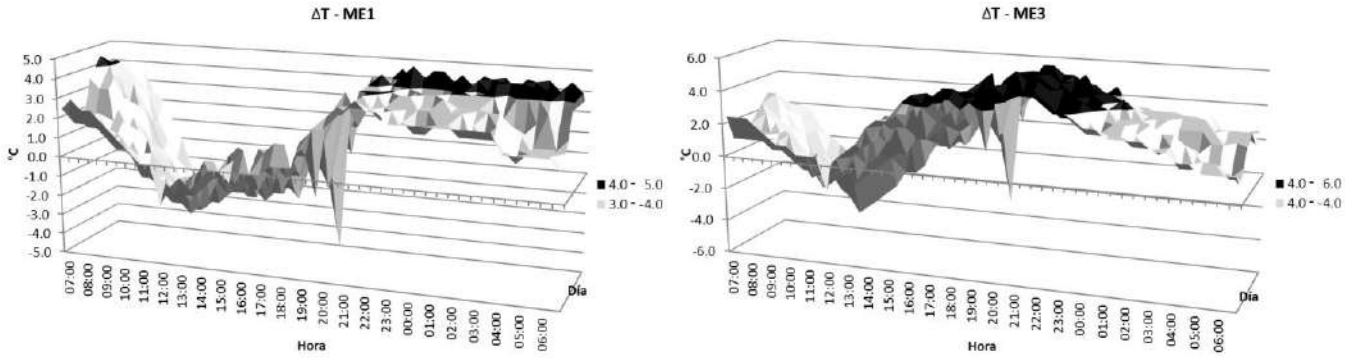


Figura 4. Gráficas que muestran la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la superficie interna de la losa (ΔT) durante la Fase Tres. Las diferencias mayores a 4°C se presentan en color negro.

CONCLUSIONES

Debido a que el techo es el principal receptor de la radiación solar, es importante disminuir su impacto en las ganancias de calor al interior de las edificaciones y propiciar la ventilación para disiparlo, otras condiciones recomendables para los sistemas constructivos en climas cálidos son el sombreado adecuado y el paso libre del aire, bajo tales consideraciones una doble cubierta ventilada es un sistema de acondicionamiento pasivo viable y eficiente si sus características son diseñadas adecuadamente.

Los experimentos realizados en esta investigación permiten concluir que el sistema de doble cubierta con lámina metálica posibilita el amortiguamiento de la oscilación de la temperatura, el cual puede disminuir los picos en las cargas térmicas de un equipo de aire acondicionado y la amplitud de la variación de la temperatura del aire al interior de un espacio.

Durante la temporada calurosa los mejores resultados fueron obtenidos en el ME1, el módulo con el blindaje externo inclinado 15° al Sur, la temperatura superficie interna de la losa fue menor en comparación con la temperatura ambiente y no superó a ésta por más de 4°C durante el 94.9% del tiempo de las mediciones, además también presentó una menor oscilación.

En la temporada templada, el ME1 y ME2 tuvieron comportamientos muy similares, y fue el módulo de control el más eficiente al evitar el sobrecalentamiento de la losa, sin embargo bajo las condiciones climáticas y de confort térmico de la temporada puede concluirse que el sistema de doble cubierta tiene un comportamiento adecuado al no permitir que la temperatura de la losa descienda por debajo de los niveles de la temperatura exterior durante las noches.

La doble cubierta se comporta adecuadamente como protección térmica en comparación con un techo común, el rendimiento del blindaje térmico durante la temporada calurosa resultó 12.9% mayor que la del techo común en las condiciones de este análisis. También se reporta que mediante el sombreado del techo y la ventilación entre cubiertas se brinda resistencia al incremento de la temperatura interna durante las horas de mayor asoleamiento.

Un dato importante es que las temperaturas registradas en la lámina metálica durante dos semanas del mes mayo, fueron de 47.5°C máxima y 19.0°C mínima, lo que representa una oscilación de 28.5°C, este valor es muy parecido a los obtenidos en la losa color terracota que fueron 45.7°C en la superficie exterior y 41.8°C al interior.

Las láminas metálicas tienen la particularidad de ser un material muy delgado, por lo tanto al carecer de masa apreciable no pueden acumular el calor y lo ceden casi de manera directa al ambiente; se sabe que entre más bajo es el grado de emisividad, menor es el calor irradiado de esa superficie, el concreto tiene una emisividad de 0.95, mientras que para el acero es de 0.12.

Cabe destacar la importancia de mantener altos coeficientes de reflectancia en la superficie de las láminas con el fin de contrarrestar la desventaja de la rápida conducción de calor que poseen, este coeficiente puede variar en función del color y el tipo de pigmento, en el caso de las láminas metálicas en color blanco el valor de la reflectancia solar es de entre 0.6 y 0.7 como mínimo.

Con un diseño adecuado, los sistemas de doble cubierta ventilada utilizando láminas metálicas pueden contribuir al ahorro de energía mediante la reducción del efecto de la radiación solar directa sobre los techos y con ello las cargas de refrigeración en los edificios, además son un sistema constructivo de fácil implementación tanto en nueva construcción como sobre cubiertas ya existentes. Las láminas de metal son un material muy popular, se encuentran disponibles en una amplia variedad de sustratos, colores, texturas y perfiles; ésta flexibilidad de diseño, en combinación con otras ventajas como la sostenibilidad, resistencia, durabilidad y bajo coste de ciclo de vida y mantenimiento hace de las láminas metálicas material adecuado para los sistemas de cubierta.

REFERENCIAS

Barrios, G., Elías, P., Huelsz, G., Rojas, J. (2010). Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto 3(3), pp. 69-84.

CONAVI. (2016). Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda. Consultado el 13/07/2016 de http://sniiv.conavi.gob.mx/Reports/INEGI/ParqHab.aspx

Gómez Muñoz, V. (2003). Desempeño solar de viviendas. (Tesis doctoral, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, Baja California Sur, México).

Guerrero, K. (2011). La cubierta plana y su comportamiento térmico en las viviendas del clima cálido-húmedo. Caso de estudio: Cuba. (Tesina de Maestría. Universidad Politècnica de Catalunya).

Hernández, V., Contreras, J., González, G., Morillón, D., Fernández, J. (2012). Modelo analítico que describe el comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techos. *Ingeniería Investigación y Tecnología XIII* (1), pp. 33-42.

Olivera, B. (2008). *El primer paso para la eficiencia energética en México*. México: Greenpeace. Recuperado el 20/07/2016 de http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2009/1/documento_eficiencia.pdf

Vázquez, E., González, E., Elizondo, M. (2008). Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio. *Palapa III*, pp. 43-54. ISSN: 1870-7483.

ESTRATEGIAS DE ADECUACIÓN BIOCLIMÁTICA PARA INTERIORES EN CLIMAS CÁLIDOS

Carolina Montoya-Montoya
Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa.
Blvd. de las Américas y Av. Universitarios, Cd. Universitaria, Culiacán Rosales, Sinaloa. C.P. 80040, México.
Tel/Fax 01(667) 716-1116, **carolina.montoyam93@gmail.com**.

Josue Flores-Moreno, Daniel Castro-Sánchez
Gonzalo Bojórquez-Morales, Ramona Romero-Moreno
Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California.
Blvd. Benito Juárez, Mexicali, Baja California, C.P. 21280, México, Tel 01(686) 566-4250
josue.craft115@gmail.com, daniel.castro.sanchez@uabc.edu.mx,
gonzalobojorquez@uabc.edu.mx, ramonaromero@uabc.edu.mx.

RESUMEN

La toma de decisiones en el diseño de edificios en clima cálido debe ser adecuada para tener condiciones de confort térmico en sus interiores, por ello es importante analizar las condiciones climáticas de cada sitio, para considerar estrategias de diseño pasivo basadas en el uso de instrumentos que permitan identificar las variaciones del ambiente térmico y la respuesta de diseño apropiada en cada caso. El objetivo de este trabajo fue establecer estrategias bioclimáticas en espacios interiores para Mexicali, Baja California, Culiacán, Sinaloa y Ciudad Obregón, Sonora. Cabe destacar que se implementaron métodos que cumplen con la normatividad internacional, se realizó un análisis comparativo entre los casos de estudio y se establecieron criterios de diseño que pueden contribuir a mejorar la habitabilidad y el ahorro de energía. Se realizaron diagnósticos bioclimáticos con datos horarios mensuales, se definieron zonas de confort térmico para periodos cálido y frío, y se establecieron estrategias de adecuación climática aplicables a la edificación, para tener condiciones entre confort térmico y soportables. Según los resultados obtenidos en las tres ciudades de estudio predomina el requerimiento de masa térmica y ventilación durante las primeras ocho horas del día en el periodo cálido, mientras que para el frío es necesario el calentamiento convencional de las cero a las siete horas, a partir de ahí puede implementarse calentamiento solar, en las últimas horas del día, de las 19 a las 24 la temperatura de confort térmico es posible lograrse con masa térmica.

Palabras clave: Estrategias de adecuación, Diagnóstico bioclimático, Diseño bioclimático, Clima cálido, Confort térmico, Ahorro de energía.

ABSTRACT

Decision making in the design of buildings in warm weather should be adequate to keep indoor thermal comfort conditions, so it is important to analyze the climatic conditions of each site, to consider passive design strategies based on the use of instruments to identify changes in the thermal environment and design the appropriate response in each case. The objective of this study was to establish bioclimatic strategies indoors for Mexicali, Baja California, Culiacan, Sinaloa and Ciudad Obregon, Sonora. Notably methods that meet international standards were implemented, a comparative analysis of the case studies was carried out and design criteria that can help improve the habitability and energy conservation were established. Bioclimatic diagnostics were made using data monthly schedules, thermal comfort zones for warm and cold periods were defined, and climate adaptation strategies applicable to the building were established to have thermal comfort conditions. According to the results obtained in the three cities studied predominantly requirement thermal mass and natural ventilation during the first eight hours a day in the warm period, while conventional heating of zero to seven hours to is necessary in the cold period, from there can be implemented solar heating, in the last hours of the day, from 19:00 h to 24:00 h the temperature of thermal comfort can be achieved with thermal mass.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los materiales utilizados en la construcción no se adaptan al clima donde son establecidos, esto perjudica las condiciones de confort térmico en el espacio interior, pues la falta de adecuación en el diseño, así como la incorrecta orientación para aprovechar o protegerse de sol y viento genera consumos de energía eléctricos altos debido a la carga térmica que las edificaciones absorben. En general, la mayoría de los edificios en México son construidos sin considerar condiciones de confort térmico adecuadas, por ende, el uso de equipos electromecánicos de enfriamiento o calentamiento es la solución para regular las condiciones térmicas sin priorizar antes estrategias pasivas que pudieran implementarse, para si no dejar de usarlos, al menos reducir los consumos energéticos. Por otro lado, existen herramientas y métodos para el análisis bioclimático, los cuales se utilizan poco en general, aun cuando pueden proporcionar parámetros generales para el diseño de espacios en los cuales el consumo de energía sea reducido.

En México, el consumo energético se ha incrementado de 1973 a 2009 pasó de 63,000 a 76,700 MJ anuales por habitante y el consumo residencial se duplicó entre 1975 y 2010 convirtiéndose en el tercer consumidor a nivel nacional con el 18% del gasto total (Secretaría de Energía, 2014). Además 64% de un total de 399.7 millones de toneladas métricas de CO_2 emitidas en 2008 provienen del consumo de energéticos, monto que coloca a México como el 11° emisor del mundo (International Energy Agency, 2011). Esto implica que cualquier política orientada a reducir las emisiones de CO_2 requerirá de cambios en la demanda energética.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) sobre consumo de energía en el país, Sinaloa, Sonora y Baja California están dentro de los primeros 10 lugares en gasto de energía por año con un consumo de 9000 a 5000 GWh. El consumidor principal es el sector residencial y dentro él se presentan problemáticas como el uso diario excesivo de equipos de aire acondicionado y calefacción que aumentan el gasto energético.

El diseño de cualquier espacio debe estar regido por una serie de estrategias bioclimáticas que sean resultado de un análisis detallado del clima del lugar donde serán emplazados. Los estudios de diseño bioclimático realizados por Olgyay (1962), Givoni (1976, 1998) y Watson (1983) afirman que es necesario conocer las condiciones de las variables meteorológicas del sitio en el cual se construirán las edificaciones, con la finalidad de controlarlas en función de los requerimientos de confort térmico del usuario. Los resultados de este estudio son producto de un ejercicio de evaluación climática denominado “estrategias de adecuación bioclimática en espacio interiores de climas cálidos” el cual forma parte de las actividades del XXVI Verano de la Investigación Científica en la Universidad Autónoma de Baja California.

El objetivo de la investigación consiste en establecer estrategias bioclimáticas de diseño en espacios interiores de ciudades de clima cálido, como Mexicali, Baja California, Culiacán, Sinaloa y Ciudad Obregón, Sonora con base en un diagnóstico del clima mediante el método de Docherty y Szokolay (1999) y un estudio comparativo con los cuales se pudieron identificar variaciones en temperatura de bulbo seco y humedad relativa horarias mensuales para establecer un opción de diseño pasivo adecuado para los periodos cálido y frío en cada caso. Desde el trabajo de los hermanos Olgyay (1962), se han desarrollado investigaciones donde se analiza la importancia de la arquitectura bioclimática para el ahorro de energía, así como las estrategias a implementar con base en el clima, uso de parámetros de temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar. Se han publicado además estudios sobre confort térmico donde se describen detalladamente las condicionantes requeridas por el ser humano dentro de los espacios mediante los cuales se establecen rangos de confort, sin dejar de mencionar también, estudios puntuales sobre adecuación bioclimática es ciertas tipologías de vivienda dentro de un clima particular. Cabe destacar que este estudio tiene como fin exponer una serie de estrategias bioclimáticas para tres casos de estudio pero además se establecerán prioridades y factibilidad de aplicación de las mismas para generar una serie de parámetros realmente adecuados a las necesidades de cada sitio.

Según los resultados obtenidos, en los tres casos de estudio predomina el requerimiento de ventilación de la 01:00 h a las 8:00 h y de las 21:00 h a las 24:00 h del día en el periodo cálido, mientras que para el frío es necesario el calentamiento convencional de las 0:00 h a las 07:00 h, a partir de ahí puede implementarse calentamiento solar, en las últimas horas del día, de las 19:00 h a las 24:00 h la temperatura puede regularse con masa térmica. De acuerdo al análisis comparativo entre los casos de estudio se estableció que los rangos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa son similares por lo tanto será necesario implementar estrategias de ventilación, masa térmica y calentamiento solar en un lapso de horas de manera equivalente en cada caso durante el periodo frío, mientras que el periodo cálido podrá solucionarse en su mayoría con ventilación natural. Los horarios con confort térmico se presentan en diciembre, enero y febrero de las 12:00 h a las 19:00 h en las tres ciudades.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis bioclimático fue desarrollado con base en una selección de casos de estudios, se consideraron en principio zonas geográficas (noroeste), variables meteorológicas, consumo de energía, demanda de vivienda y la disponibilidad de información requerida para el estudio, se eligieron tres ciudades con características similares. Para estudiar el clima y las necesidades de confort térmico de cada una se recopilaron datos meteorológicos en un periodo de 30 años, se utilizó un método de diagnóstico confiable para establecer estrategias bioclimáticas y finalmente se aplicó un estudio comparativo de los resultados obtenidos.

1.1. Casos de estudio

Las ciudades seleccionadas pertenecen a la región noroeste de México se determinaron a partir de criterios que contribuyen a establecer parámetros y estrategias de manera equitativa de forma regionalizada. Según los datos recopilados Mexicali, Baja California, Ciudad Obregón, Sonora y Culiacán, Sinaloa se encuentran en los 10 primeros lugares de consumo energético a nivel nacional con niveles de consumo de hasta 4311 GW/h así como en demanda de vivienda con niveles de adquisición de hasta 50,000 unidades por año. Los tres lugares seleccionados tienen temperaturas y humedades similares (con una variación de 6 y 8% para temperatura de bulbo seco y de 2 a 4 % para humedad relativa) (Tabla 1) lo cual permitió establecer estrategias de diseño que podrán implementarse en los mismos periodos y horarios. La tipología de clima que engloba a los casos de estudio según la clasificación oficial (García, 1964) y conforme a su temperatura de bulbo seco, es de tipo cálido, la connotación específica para cada lugar de acuerdo a su nivel de precipitaciones tiende a ser semiárida para Culiacán y Ciudad Obregón mientras que Mexicali es seco. Otro rasgo en común que tienen estas ciudades es la altura sobre el nivel del mar, localizándose a 60, 40 y 4 msnm respectivamente.

Tabla 1.Características de casos de estudio.

Caso de estudio	Demanda de vivienda estatal 2014	Consumo energético estatal 2014 (GWh)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Humedad Relativa Media (%)	Humedad Relativa Máxima (%)	Humedad Relativa Mínima (%)
Mexicali, Baja California	50,431	4311	23.7	16.1	31.4	62	97	28
Ciudad Obregón, Sonora	29,745	4133	25.1	17.2	32.9	63	90	34
Culiacán, Sinaloa	15,590	2590	25.7	18.3	33.2	65	94	33

Fuente: Elaboración propia con base en Comisión Nacional del Agua, Sociedad Hipotecaria Federal y Comisión Federal de Electricidad.

1.2. Diagnóstico bioclimático

Para realizar el diagnóstico bioclimático fue necesario seleccionar un método que fuera acorde o cumpliera con la normatividad internacional para evaluación de confort térmico y certificación de edificios, como las normas: ISO 7730: 2005, ANSI/ASHRAE 55: 2010, ISO 7933: 2004, ISO 10551: 1995, ISO 7726: 1998, además de que estuviera basado en una argumentación numérica en la toma de decisiones para la estimación del tipo de estrategia pasiva a proponer. Por ello se eligió la propuesta Docherty y Szokolay (1999) el cual considera el uso de temperatura neutral, diferentes niveles de actividad (pasiva, moderada e intensa), niveles de arropamiento desde ligero a arropado, con uso en espacios interiores y clima de todo tipo, además requiere solo de temperatura de bulbo seco y humedad relativa sobre una carta psicométrica. Con este se obtuvieron valores de temperatura y humedad horaria, para ello fue necesario introducir datos de temperaturas máximas, mínimas y medias por mes en el periodo de 1981 a 2010 mediante la base de datos registrada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional, además de datos de características del sitio como lo son latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar.

El método requiere del uso de una carta psicométrica, la utilizada en este caso fue la de ASHRAE, se utilizó una altitud sobre el nivel del mar de 0 a 750 metros debido a que en las tres ciudades se tienen niveles por debajo de los 60 msnm. Se trazaron las zonas de confort térmico para periodo cálido y frío, así como las estrategias pasivas requeridas. Se establecieron periodos de radiación solar diaria mediante la herramienta Solar Tool complemento del programa ECOTEC (Marsh). Fue necesario introducir valores de latitud, longitud y zona horaria de cada ciudad, mediante éste se obtuvieron las puestas y salidas de sol de manera mensual, se tomó como día representativo el día 21 de cada mes.

1.3. Estudio comparativo

Para realizar el estudio comparativo se tomó como referencia a la ciudad de Mexicali, Baja California debido a que presenta las temperaturas de bulbo seco más altas de las tres ciudades seleccionadas, el método empleado consiste en obtener la diferencia porcentual entre datos climáticos (temperatura de bulbo seco, humedad relativa y radiación solar) así como de cada estrategia con respecto a los resultados finales de dicho caso. Los periodos de análisis mencionados son el matutino, vespertino y nocturno para cada caso de estudio. Solo se presentaran resultados que sobrepasen el 1% considerándose no relevantes aquellos menores a dicho valor.

2. RESULTADOS

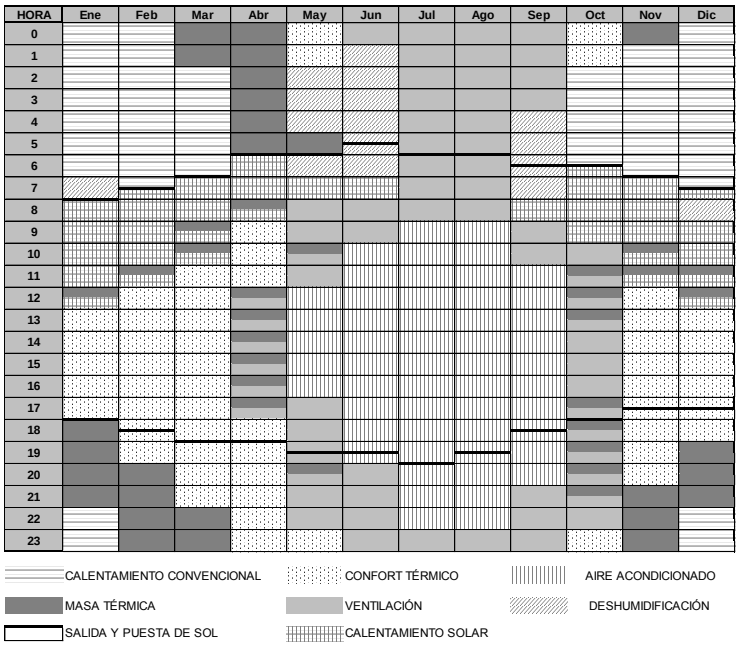
A partir del análisis de datos climatológicos, temperaturas neutrales, humedad relativa de confort, delimitación de zonas de confort térmico por periodo cálido y frío, y estimación de áreas de estrategias bioclimáticas adecuadas se obtuvieron los resultados, los cuales se describen en principio por ciudad y posteriormente se lleva a cabo el estudio comparativo.

2.1. Mexicali

El periodo cálido se registra del mes de mayo a septiembre en el cual las temperaturas van de los 17 °C a los 44 °C, durante este lapso en mayo y junio es necesario deshumidificar de las 0:00 h a las 07:00 h, además debe introducirse ventilación natural de las 17:00 h a las 23:00 en el primer mes, mientras que en el segundo en un rango menor que va de las 20:00 h a las 23:00 h. El periodo frío comienza en el mes de diciembre y termina en febrero se presentan temperaturas mínimas de 7 °C por lo tanto de las 22:00 a las 24:00 h y de las 1:00 h a las 8:00 h deberá utilizarse calentamiento convencional y masa térmica, de las 8:00 h a las 12:00 h calentamiento solar pasivo, a partir de

ahí comienza los horarios de confort térmico en cada mes, con una duración promedio de 8 horas. Los meses de transición en este caso son abril y octubre en los cuales surge la necesidad de ventilación de las 12:00 h a 17:00 h. Se presentan horas de confort térmico de las 9:00 h a las 11:00 h y de las 18:00 h a las 24:00 h, las horas restantes podrán resolverse con masa térmica.

Tabla 2. Estrategias de diseño bioclimático para Mexicali, Baja California.



Fuente: elaboración propia a partir de Luna, 2009

2.2. Ciudad Obregón

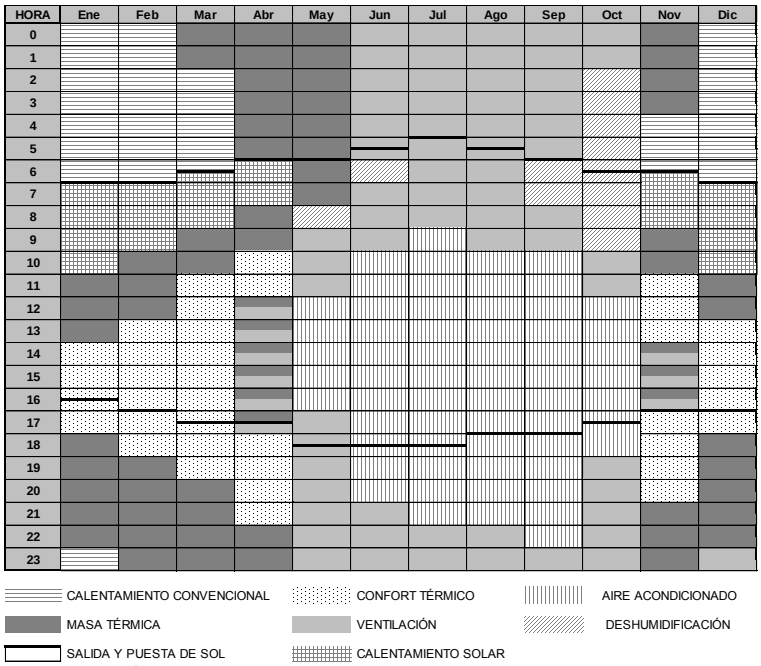
El periodo cálido es de mayo a octubre, se registran temperaturas máximas de 38 °C y mínimas de 18 °C. En el primer mes de las 01:00 h a las 07:00 h se requiere de masa térmica, a partir de las 8:00 h hasta las 11:00 h debe introducirse ventilación natural, en los siguientes meses, de junio a septiembre se requiere , de igual manera, viento desde la 01:00 h hasta las 9:00 h, en el último mes debe deshumidificarse de las 02:00 h a las 09:00 h e introducir ventilación natural de las 18:00 h a las 23:00 h. El periodo frío es de diciembre a marzo, es necesario calentamiento convencional de las 00:00 h a las 6:00 h, de las 07:00 h a las 10:00 h debe utilizarse calentamiento solar pasivo, mientras que de las 18:00 h a las 23:00 h es necesaria la adecuación con masa térmica. Los periodos de transición lo constituyen abril y noviembre, en los cuales se requiere masa térmica y calentamiento convencional de las 00:00 h a las 09:00 h a partir de ahí hasta las 17:00 h debe introducirse ventilación natural, para después pasar a un lapso de confort térmico que va de las 18:00 h a las 21:00 h en el primer mes y de las 17:00 h a las 20:00 h en el segundo.

2.3. Culiacán

El periodo cálido presenta temperaturas que van de los 20 °C mínimo hasta los 36 °C máximo. De las 0:00 h a las 08:00 h es necesario introducir ventilación a una velocidad de 1 m/s para regular la humedad relativa y disminuir la sensación térmica de calor, así como estrategias de deshumidificación, sobre todo en los meses de mayo y octubre. En el transcurso de la noche de las 21:00 h a las 24:00 h es necesario de ventilación. El periodo frío comprende de diciembre a febrero se registran temperaturas mínimas de 12 °C y máximas de 28 °C. De las 0:00h a las 07:00 h es necesario calentamiento convencional así como calentamiento solar hasta las 09:00 h, después de las 12:00 a las 19:00 h se entra en un horario de confort térmico que termina dos horas después de perder la radiación solar para dar paso a la adecuación con masa térmica y retardar de esta forma el paso del frío.

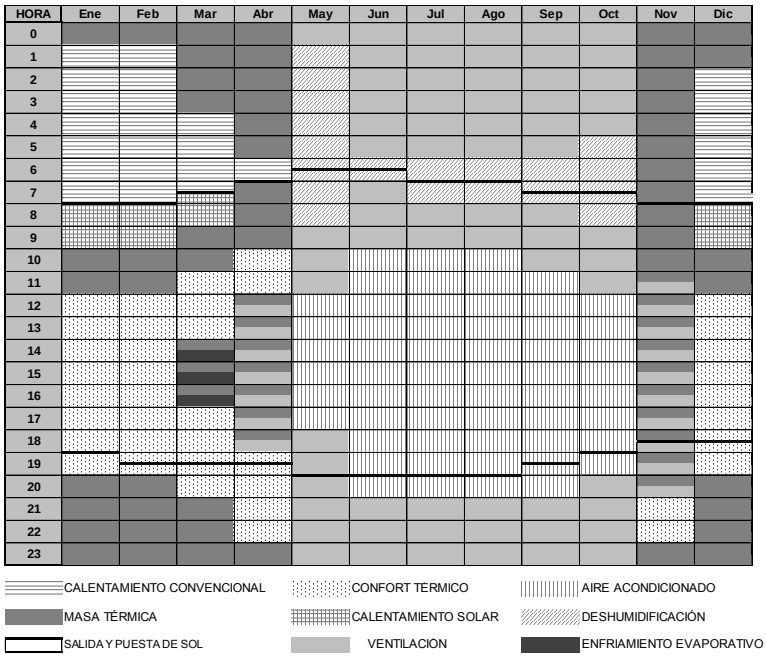
Los periodos de transición los constituyen los meses de marzo, abril y noviembre, en el primer mes se requiere masa térmica en un lapso de 10horas, sobre todo de las 0:00 h a las 3:00h y de las 21:00 h a las 23:00 h, mientras que en abril la necesidad es mayor con 13 horas primordialmente de las 0:00 h a las 09:00 h y de las 12:00 h a las 18:00 h en los cuales la temperatura va de 17°C a 22 °C. En cuanto al mes de noviembre el requerimiento de masa térmica se presenta de las 0:00 h a las 10:00 h a partir de las 11:00 h hasta las 20:00 h deberá introducirse también ventilación natural.

Tabla 3. Estrategias de diseño bioclimático para Ciudad Obregón, Sonora.



Fuente: elaboración propia a partir de Luna, 2009

Tabla 2. Estrategias de diseño bioclimático para Culiacán, Sinaloa.



Fuente: elaboración propia a partir de Luna, 2009

2.4. Análisis comparativo

Según los datos obtenidos en cada caso se puede inferir que durante el periodo frío en Mexicali se presentan las temperaturas más bajas con 6°C en el mes de enero, por lo tanto, el requerimiento de calentamiento convencional es mayor durante todo el año comparado con las otras ciudades. Mientras que Culiacán necesita el 40 % del total de horas que requiere Mexicali, la prioridad en Ciudad Obregón es mayor con un 64%. En cuanto a la estrategia de masa térmica, Culiacán requiere un 90% más que Mexicali, por otra parte Ciudad Obregón

necesita un 80% más que la ciudad de referencia. Respecto al confort térmico en Culiacán la duración del periodo es menor que en Mexicali, representa el 70% mientras que Ciudad Obregón representa el 68%.

En cuanto a calentamiento solar pasivo, Culiacán necesita 30% y Ciudad Obregón el 58%. Con referencia a la ventilación natural requiere 17% más que Mexicali y Ciudad Obregón un 19%. En cuanto a la estrategia de deshumidificación Culiacán necesita un 10% más mientras que Ciudad Obregón presenta un valor de 77% con respecto a Mexicali. Por lo que se refiere a enfriamiento evaporativo la ciudad de Culiacán es el único caso en el que se presentó esta estrategia y en un porcentaje bajo considerándose solo el 0.5 % del total de horas del año, por lo que es irrelevante.

Tabla 3. Datos climáticos y estrategias bioclimáticas

	Temperatura/ Humedad				Estrategias bioclimáticas							
	Temperatura interior máxima	*Temperatura interior mínima*	*Humedad relativa máxima*	*Humedad relativa mínima*	*Calentamiento convencional*	*Masa térmica*	*Confort térmico*	*Calentamiento solar pasivo*	*Aire acondicionado*	*Ventilación*	*Deshumidificación*	*Enfriamiento evaporativo*
Culiacán, Sinaloa	36.7°C	11.5°C	94%	33%	8.5%	22%	13.5%	3%	20%	26.6%	6.6%	0.5%
Ciudad Obregón, Sonora	38.3°C	9.6°C	90%	34%	8.7%	20.7%	12.8%	5.9%	20.8%	26.4%	4.6%	0%
Mexicali, Baja California	44.3°C	6°C	97%	28%	13.5%	11.5%	18.8%	9.9%	18.4%	22.1%	5.9%	0%

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se establece que para la ciudad de Mexicali, las principales estrategias a implementar son calentamiento convencional y ventilación natural sobre todo en las primeras y últimas horas de día. Cabe señalar que del porcentaje de ventilación requerida solo el 89% puede implementarse pues en el 11% restante se registran temperaturas fuera del límite de confort térmico, de las 13:00 h a las 17:00 h, por lo que no es conveniente introducir ventilación natural ya que esta transmitirá mayor calor al espacio interior y provocará alteraciones negativas en la temperatura interior.

En cuanto a los parámetros de deshumidificación solo puede implementarse el 35 % de las horas requeridas, pues en el 65 % restante no se presenta radiación solar lo que impide utilizar sistemas pasivos de deshumidificación (desecantes) los cuales requieren de calentamiento solar para extraer la humedad del espacio interior. Otro aspecto que hay que redefinir es el calentamiento solar pues este es requerido en cuanto se presenta la salida del sol, pero en ese momento la radiación solar es muy débil por lo tanto se debe dejar pasar mínimamente una hora para utilizarse, con referencia a este criterio, el porcentaje total de horas en las que debe implementarse esta estrategia se reduce al 78%.

Con respecto al caso Ciudad Obregón las estrategias de mayor importancia son ventilación natural a una velocidad de 2 m/s prioritariamente, y masa térmica en un 21%. En cuanto a la deshumidificación solo puede implementarse el 63% pues en el 37% restante no se tiene incidencia solar. Con relación al calentamiento solar solo puede ser posible el 67% del total de horas requeridas.

Por otra parte para la ciudad de Culiacán las estrategias prioritariasson masa térmica y ventilación natural, esta última es posible en un 98% del total de horas, pues en el resto se registran temperaturas de 33°C fuera del rango de confort térmico. En cuanto a la estrategia de deshumidificación la cual representa el 7%, en los meses de mayo y octubre, solo puede utilizarse en un 36% debido a que en el resto de las horas no se tiene radiación solar para poder secar el aire de manera pasiva e introducirlo al interior. Con respecto al calentamiento solar este también se ve afectado pues solo puede implementarse el 46% del total de horas registradas.

La principal aportación de este análisis fue desarrollar un estudio comparativo entre dos tipos de climas cálido con connotación semiárido y seco, al conocer las condiciones climáticas específicas (temperatura de bulbo seco, humedad relativa y radiación) para cada caso se establecieron soluciones pasivas de adecuación térmica en periodo frio, cálido así como de transición, que aportan opciones de diseño pasivo para espacios interiores a desarrollar en cada una de las ciudades del noroeste de México consideradas. De esta manera se logrará disminuir el uso de sistemas electromecanizados para regular el confort térmico y por ende se reducirá el consumo energético sobre todo en el sector residencial.

REFERENCIAS:

American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers, (2004).ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Condition and Human Occupancy. Atlanta, GA.

Docherty, M. and Szokolay S. (1999).Climate analysis.In PLEA Note 5. Brisbane: Passive and Low Energy Architecture – University of Queensland

García, Enriqueta (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen. Núm. 6, p. 78. México.

Givoni, B. (1969). Man, climate and Architecture. New York: Van Nostrand Reinhold.

Givoni, B. (1997). Climate considerations in building and urban design. New York: Jhon Wiley & Sons.

International Standard ISO (1995). ISO 10551: Ergonomics of the thermal environment**.**Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. Primera edición. Switzerland.

International Standard ISO (1998). IS0 7726: Ergonomics of the thermal environment, Instruments for measuring physical quantities. Segundaedición.Switzerland.
International Standard ISO (2005).ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Tercera edición. Switzerland.
Olgyay, V. (1962). Arquitectura y clima. Barcelona, España: Gustavo Gili.
SENER. Secretaria de Energía (2014).Balance nacional de energía. Recuperado el 23 de julio de 2016 de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/89382/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf
Servicio Meteorológico Nacional (2010). Normales climatológicas por estado. Recuperado el 12 de julio de 2016 de http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42
Sistema de Información Energética (SIE) (2015). Balance Nacional de Energía: Consumo final de energía por sector. Recuperado el 23 de julio de 2016 dehttp://sie.energia.gob.mx
Sociedad Hipotecaria Federal (2014). Dirección de Estudios Económicos de la Vivienda: demanda de vivienda. Recuperado el 23 de julio de 2016 de http://www.shf.gob.mx/estadisticas/EstudiosVivienda/Documents/demanda%202014.pdf
Watson, D. and Labs K. (1983). Climatic Buildings Design, Energy Efficient Building Principles and Practice. New York: McGraw – Hill.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DESHUMIDIFICACIÓN: ESTRATEGIA APLICADA EN VIVIENDAS DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE PARA CHONTALPA, TABASCO, MÉXICO.

Luis Aguilera-Pérez[1], Letma Ortiz-Ortiz[1], Andy Ortiz-deDios[1] y Luis García-Contreras[1]
[1]División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,
Av. Universidad, Cunduacán, Tabasco,C.P. 86690, México, Teléfono (993) 3581500 Ext. 6752.
chuleta3a@hotmail.com, hany.ortiz22@gmail.com, andhypj@gmail.com, gerardo.garcia738@gmail.com

Ramona Romero-Moreno[2], Gonzalo Bojorquez-Morales[2], Aníbal Luna-León[2]
[2]Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez,
Mexicali, Baja California, C.P. 21280, México, Teléfono (686) 5664250
ramonaromero@uabc.edu.mx, gonzalobojorquez@uabc.edu.mx, anibal@uabc.edu.mx

RESUMEN

En zonas de clima cálido húmedo, como la subregión Chontalpa del estado de Tabasco, el nivel de humedad relativa alto ha generado problemas graves de confort térmico en los habitantes y daños físicos a las viviendas, sobre todo en las de construcción en serie, que son diseñadas sin considerar el clima existente. El objetivo de este trabajo fue determinar y analizar el impacto de los sistemas de deshumidificación aplicables en la vivienda de interés social, como un medio para mejorar las condiciones de ésta. Se realizaron diagnósticos bioclimáticos de cinco ciudades de la zona de estudio, a partir de la propuesta de Docherty y Szokolay; y se identificaron las diferentes estrategias de adecuación bioclimática requeridas durante el año, con base en la evidencia empírica de las zonas de estudio y con revisión bibliográfica. Los resultados mostraron que el nivel de humedad en el interior de las viviendas fue mayor al 90% y que las estrategias de deshumidificación son requeridas entre un 60% y 70% del año, y éstas pueden aportar cambios para mejorar las condiciones de confort térmico para usuarios de ingresos económicos bajos y una adaptación de la edificación al contexto climático.

Palabras claves: Diagnóstico bioclimático, estrategias de adecuación ambiental, deshumidificación, clima cálido húmedo, vivienda de construcción en serie.

ABSTRACT

In warm-humid climate areas, how the sub-region Chontalpa of the state from Tabasco, the high level of relative humidity has caused grave problems of thermal comfort in the population and physical damage to homes, particularly in low-income dwellings, these are built without taking into account weather conditions. The object this article was determines and analyzes the impact of the dehumidification system applicable in the low-income dwellings, as a means to improve the conditions of this. Bioclimatic diagnosis five's cities in the study area were made, starting in the proposal by Docherty and Szokolay, and they identified the strategies of bioclimatic adecuation that is required during a year, based on empirical evidence from the study areas and Bibliographic review. The results showed that humidity level in the home's interior were higher to 90% and that the strategies of dehumidification are required into 60%-70% from year. The results showed that humidity level in the homes of interior were higher to 90% and that the strategies of dehumidification are required into 60%-70% from year, and these contributed change for to improve the conditions of thermal comfort, for lower income users and this can lead to the housing adaptation to climate context of the sub-region of study.

Keywords: Bioclimatic diagnosis, environmental adaptation strategies, dehumidification, warm-humid climate, low-income dwellings.

INTRODUCCIÓN

La humedad relativa, aunada al efecto de la temperatura de bulbo seco, es una variable meteorológica que afecta notoriamente las condiciones de confort térmico dentro de una vivienda de construcción en serie. En el sureste de México predomina el clima cálido húmedo, como es el caso de Tabasco, su ubicación en una zona tropical y la cercanía al mar provocan vientos con niveles altos de vapor de agua. El estado está dividido en 17 municipios, agrupados en dos regiones (Grijalva y Usumacinta) y éstas a su vez en las subregiones Centro, Sierra, Chontalpa, Pantanos y Ríos (Azcona, 2012). La Chontalpa, es la de mayor extensión de la región de Grijalva e incluye las cinco ciudades más importantes[1] del Estado. Esta zona destaca por su desarrollo económico asociado a la extracción del petróleo; hay una presencia relevante de fraccionamientos con vivienda de construcción en serie edificada principalmente por el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT).

El artículo busca conocer el impacto del clima cálido húmedo en las condiciones ambientales de la vivienda de construcción en serie y en la percepción del confort térmico de sus habitantes; se muestra el énfasis en el uso de sistemas y/o técnicas de deshumidificación y ventilación; así como su aplicación en una vivienda de la región de estudio.

[1]Después de la ciudad de Villahermosa están Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Huimanguillo y Paraíso.

El efecto de la humedad relativa fue el caso más relevante dentro de las cinco ciudades analizadas con estrategias obtenidas con cartas psicrométricas de ASHRAE, los resultados fueron: deshumidificación en un 60-70%, ventilación 2 m/s entre 41 y 42% y ventilación de 1m/s entre el 35% y el 38%, en el periodo cálido la utilización de sistemas de aire acondicionado es una alternativa necesaria para alcanzar condiciones entre confort térmico y soportables. Se promueve la utilización de estrategias bioclimáticas y sustentables, para localidades de Tabasco, y es oportuno mencionar que la experiencia de la realización de prácticas a nivel regional es una contribución para estudios futuros dentro del estado.

El presente trabajo fue parte de las actividades del XII Verano de la Investigación Científica de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco realizada con investigadores de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, durante de junio-agosto de 2016.

Clima de Tabasco

Tabasco se localiza en la zona del Trópico, con una temperatura media anual de 26 ºC, temperatura máxima promedio de 42 ºC en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 18.5 ºC durante el mes de enero.En el estado llueve la mayor parte del año, generalmente, sólo se considera época de sequía los meses de abril y mayo; en otoño (septiembre-diciembre) e invierno (diciembre-marzo) se presentan los nortes, que son tormentas acompañadas de vientos fuertes provenientes del Golfo de México, es en esta época cuando hay las inundaciones (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2016).

Vivienda en Tabasco: La Chontalpa

En este apartado se muestra una descripción general de la vivienda vernácula y la de construcción en serie; la primera muestra lecciones empíricas de construcción adaptada a las condiciones del entorno natural, en particular al clima; y la segunda, se refiere a la actual forma de construir la vivienda.

La vivienda vernácula, en la época prehispánica, se caracterizó por emplear los elementos vegetales de la región; las casas se edificaban con muros de caña o tablones de madera cubiertas con techo de palma, estos elementos eran usados como estrategias para mantener condiciones de confort térmico dentro de los espacios (Figura 1); además para dormir o descansar se consideraba la utilización de la hamaca y el petate, así como el pabellón para evitar los mosquitos. La abundancia de agua en la región ha tenido beneficios y consecuencias para el desarrollo humano heredando su forma de vivir en los entornos naturales; los ríos han demostrado ser vías de comunicación y transporte útiles, solo que al desbordarse inundan caminos y viviendas. Para sobrellevar esta situación los indígenas construían palafitos, que eran casas sobre troncos altos para evitar que el agua los inundara (Figura 2). Otro sistema constructivo para vivienda fue el uso del ladrillo, tanto en muros y pisos. Para Tabasco, un estado donde prácticamente no existe la piedra, el uso del ladrillo resultó ser un excelente sustituto y es además un rasgo característico de la arquitectura de la región (Figura 3).

Fuente: Tabasco la entidad donde vivo
Figura 1. Casa alejada de manto

Fuente: G + G Arquitectura y Diseño
Figura 2. Palafito casa cerca de manto

Fuente: Ochoa Valenzuela
Figura 3. Hacienda “La Luz”

La vivienda de construcción en serie, en su mayoría carece de un diseño integral, ya que ésta debe ser capaz de contener los espacios para las actividades esenciales de un estilo de vida particular. Proveer una vivienda digna a personas de bajo poder adquisitivo es el principal limitante ya que la dimensión estará restringida hasta donde los costos lo permitan (Guimarães, 2008).Las dimensiones mínimas de construcción en Tabasco son 24 m^2 determinadas por las necesidades, el presupuesto y la finalidad de cada proyecto. En el siglo XX se fortaleció la prosperidad económica, cuando se intensificó la exploración petrolera, que ubicó a Tabasco en primer lugar como productor de crudo y gas. Por la creación de empleos, la migración de los hombres del campo a los lugares donde se encontraban centros de producción petrolera o las oficinas de PEMEX, se incrementó cinco veces la cantidad de habitantes; esto causó el requerimiento de viviendas nuevas, lo que propició que se incorporarán al paisaje nuevos estilos arquitectónicos de casa-habitación, como los condominios y la construcción de vivienda unifamiliar en serie.

MÉTODO

La investigación incluyó la selección de los casos de estudio, la realización de un diagnóstico bioclimático de las principales ciudades de la subregión Chontalpa, la identificación de sistemas y técnicas activas y pasivas de deshumidificación y una propuesta de aplicación a una vivienda. Las etapas de desarrollo fueron las siguientes:

Ciudades de estudio

Esta primera etapa implicó la recopilación de los datos de las Normales Climatológicas de la región Chontalpa, Tabasco, la cual está conformada por cinco municipios: Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Huimanguillo y Paraíso. La selección de la región de estudio está

basada en los índices de humedad relativa que presentan estas ciudades (cabeceras municipales), la mayor demanda de viviendas y de las diferentes propuestas de estrategias bioclimáticas; la siguiente información que se obtuvo fue la base del estudio climatológico del sitio, para comprender el estado en que se encuentra y para generar un análisis de la zona puntualizando en las ciudades que se muestran (Tabla 1).

Tabla 1.Ubicación de municipios y variables climáticas, región Chontalpa, Tabasco

Municipios (Ciudades)	Latitud	Longitud	Altitud (msm)	Tempe-ratura media anual (°C)	Humedad Relativa (%)		Precipitación Anual (mm)	Velocidad del Viento (km/h)	
					Máxima	Mínima		Máxima	Mínima
Cárdenas	17°59'	91°32'	25	26.0	86	77	2,643.0	30	20
Comalcalco	18°16'	93°13'	15	26.4	86	77	2,052.0	30	18
Cunduacán	18°03'	93°10'	15	26.2	86	77	1,947.0	30	18
Huimanguillo	17°19'	93°23'	36	26.2	85	74	2,290.3	30	18
Paraíso	18°27'	93°32'	6	26.0	89	72	1,751.4	30	21

Referencia: http://www.inafed.gob.mx/ , versión 2013, información recuperada el 21 de julio del 2016,.

Diagnóstico bioclimático

Esta etapa se generó mediante los datos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa mensuales tomados de las Normales Climatológicas de cada una de las cabeceras municipales mencionadas anteriormente, esta información fue ingresada al Programa de Análisis Climático, desarrollado por Luna (2009) a partir de los trabajos de Docherty y Szokolay(1999), los datos requeridos fueron la temperatura promedio máxima, humedad relativa mínima, la altitud, longitud y latitud. El programa generó los valores de efectividad de las diferentes estrategias bioclimáticas en la edificación y éstos fueron registradas en la carta psicrométrica de ASHRAE, la cual mostró los resultados por día y hora sobre la problemática de humedad relativa y temperatura de bulbo seco, que se presenta en el interior de la vivienda y de igual manera la propuesta de estrategia para solucionar la problemática en específico, estas soluciones son ventilación 1m/s, ventilación 2m/s, deshumidificación, calentamiento pasivo, enfriamiento evaporativo y masa térmica. Se obtuvieron los requerimientos necesarios para las distintas ciudades de la región de estudio.

Deshumidificación pasiva y activa

A partir de los requerimientos ambientales predominantes, se buscaron las diferentes propuestas existentes para lograr la deshumidificación, esto permitió que la propuesta estuviera acorde a la situación del sitio de estudio, la información adquirida se presentó en una tabla comparativa, donde se desarrollaron los sistemas más viables de acuerdo clima, posición geográfica y contexto económico de la vivienda. En la Tabla 2 se consideraron parámetros para el diseño, en donde cada sistema propuesto incluyó: componentes, características, funcionamiento, eficiencia, problemática, consumo energético y costo aproximado. La finalidad de esta etapa fue comprender cada uno de los sistemas y realizar la elección del o los sistemas que provocara, una mejora en el interior de la vivienda y no generara un gasto excedente hacia las personas que lo utilizarán.

En base a la etapa anterior se seleccionaron y aplicaron las estrategias deshumidificadoras factibles de utilizarse en la vivienda de interés social, se consideró las viviendas de un fraccionamiento de INFONAVIT, dado que en las cinco ciudades se cuenta con el mismo tipo de desarrollos habitacionales. Se hicieron las propuestas y se utilizó el mismo modelo de vivienda, con las variantes climáticas de las ciudades. Esta adecuación de un modelo analizado y resumirlo a un medio arquitectónico comprende la importancia del contexto y del análisis climatológico que se llevó acabo al principio de esta investigación. Para comprender la utilización de las estrategias se consideró, la mejor propuesta de deshumidificación bajo los parámetros y el contexto de la vivienda, para lo cual se requiere comprender y conocer los sistemas de deshumidificación y lo que esta representa.

La deshumidificación es el proceso de retirar el vapor de agua contenida en el aire, llamada también humedad. Existen diferentes procesos estos son: a) por enfriamiento, hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de rocío, b) por el incremento de la presión total, lo cual causa la condensación, y c) poner en contacto un desecante con el aire, con lo cual, la humedad del aire migra hacia el desecante, impulsado por la diferencia en las presiones de vapor entre el aire y el desecante (Tabla 2.)

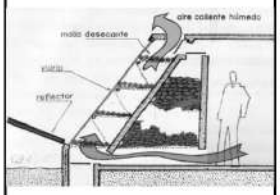
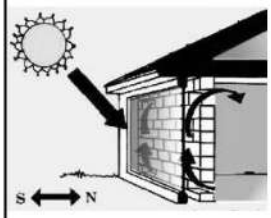
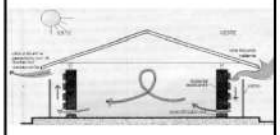
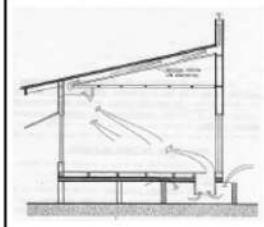
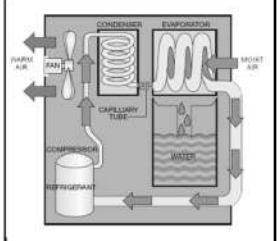
. RESULTADOS

Los resultados se muestran a partir del diagnóstico bioclimático realizado en cada una de las cinco ciudades de la zona de estudio; y las consideraciones generales para la aplicación en una vivienda de interés social de la zona.

Estrategias de diseño ambiental

En la zona de estudio se obtuvieron similitudes dentro de los límites de confort de verano e invierno de las cinco cabeceras municipales analizadas, las variaciones de los datos fueron en decimales y no en las unidades, en general, en verano el rango de confort fue de 24.2 a 28.4 ºC y en invierno de 23.2 a 27.3 ºC. Asimismo, hay variaciones de temperatura con el uso de las diferentes estrategias de adecuación ambiental; con los límites que incluyen masa térmica, se obtuvo una variación notoria, en el caso de invierno y con ventilación nocturna; al igual que en la ventilación existe una variación. En el enfriamiento evaporativo y el calentamiento pasivo, los resultados son similares entre todas las ciudades (Tabla 3.).

Tabla 2. Sistemas deshumidificadores pasivos y activos.

Estrategia	Característica[1]	Funcionamiento[1]	Conceptos básicos[2]	Elementos[2]	Representación del sistema.[2]
PASIVOS					
Sistema de lecho dual por deshumidificación de Moore.	Sistema utilizado con material desecante de bajo costo para la deshumidificación y calor solar.	Un sistema de bisagras. El aire frio y húmedo (de alguna fuente externa de enfriamiento) es inducido un través de una malla desecante y su especificación es bajar la humedad.	Consta de dos hileras idénticas y adyacentes de desecantes. Una hilera de colectores cubierta y la posterior expuesta una a la radiación solarla cual seca, y calienta regenerando el material desecante.	Reflector de material metálico, vidrio, material desecante (gel sílice), pared de aislamiento cerrado, malla de soporte para material desecante y doble muro hacia el interior de la vivienda hueco o con material desecante.	
Adecuación de muro Trombe.	Sistema que en sus inicios específicos era tratar el enfriamiento y calentamiento mediante recolectores de energía solar, aunque adecuándola con materiales desecantes puedes llegar a tratar la humedad.	*Un área colectora de vidrio, una masa de almacenamiento ubicada directamente en el interior del vidrio posteriormente un área de material desecante para tratar la humedad.*	*Aun cuando fue diseñado para calentar los espacios interiores, puede también ser utilizado en verano para proveer ventilación inducida en dichos espacios, con una adaptación con material desecante para trabajar como sistema deshumidificador.*	La muro Trombe, incluyen: concreto, adobe, piedra, compuestos de ladrillos, bloques de arenas, material desecante (gel sílice), y materiales de almacenamiento.	
Sistema de deshumidificación solar.	Genera la deshumidificación mediante la energía solar y el contacto de la humedad con materiales desecantes.	Se basa en el efecto chimenea o de termosifón, consiste en la circulación por convección natural del aire que se calienta, por efecto invernadero en el espacio vertical.	Este sistema depende de la velocidad del aire en el sitio donde este se emplea. Un elemento importante es la radiación solar en el sitio, ya que junto con los materiales desecantes generan la deshumidificación.	*La cubierta metálica ennegrecida; el vidrio;* muros (para crear las capas de material desecantes), material desecante (gel sílice); mallas de soportes para el material desecante.	
Sistema de inyección de aire fresco.	Introduce aire fresco al interior de la vivienda con una adecuación con material desecante (gel sílice) para la captación de la humedad en el interior del ducto donde se transporta el aire inducido.	Consiste en un dispositivo a base de un tubo, preferentemente metálico, que va del exterior de la casa al interior de la misma. Este tubo deberá de ir enterrado en el suelo para que mantenga el aire frio en su interior, que al penetrar en la casa por diferencia de temperatura exterior/interior forma una corriente convectiva dentro de la casa, el material desecante se presenta en el interior del tubo.	Un sistema de ventilación con ducto longitudinal inyector, está constituido por un ducto de inyección de aire fresco, dispuesto al interior y a lo largo de toda la extensión longitudinal de la edificación a ventilar; dicho ducto de inyección, contiene un conjunto de rejillas inyectoras las cuales contiene material desecante para tratar la humedad y por donde se inyecta el aire fresco hacia la construcción.	*Captador de aire; ductos; rejillas; material desecante (gel sílice).*	
ACTIVOS					
Deshumidificadores desecantes. [3]	Regula la humedad del aire por mediación de una sustancia química.	El proceso de deshumidificación desecante es controlado por un rotor que gira lentamente y genera el proceso de absorción de la humedad del aire, empleando materiales desecantes en su interior.	No es un sistema, por lo contrario, es un aparato industrializado. Alcanza de 40 a 45 por ciento de humedad relativa en el aire. La capacidad extractora varía entre los 5 y 50 litros de agua extraída por cada 24 horas de funcionamiento.	*Aparato diseñado para reducir la humedad ambiental dentro de un espacio.*	
Deshumidificadores con Compresor (refrigerante). [3]	Sistemas de aire acondicionado convencionales de compresión de vapor.	Este enfría al aire a una presión constante hasta una temperatura abajo de la temperatura del punto de rocío. Alcanzar un 40 a 45 por ciento de humedad relativa en el aire. La capacidad extractora varía entre los **5 y los 35 litros** de agua extraída por cada 24 horas de funcionamiento.	Este sistema varía entre el rango de eficiencia del aparato, puede llegar a consumir como mínimo 23 watios y como máxima 1300 watios. A una temperatura menor de 15 grados centígrados puede llegar a congelarse. El costo de este aparato varía entre 1030 pesos a 8500 pesos	*Aparato diseñado para reducir la humedad ambiental dentro de un espacio.*	

1. Guimares, 2012 (1).
2. Gonzalez, 2013 (2).
3. https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2515/12/10106/. (3).

Tabla 3. Rangos de temperatura de confort térmico (ºC)

Municipios (cabeceras municipales)	Límite zona de confort verano (°C)		Límite zona de confort invierno (°C)		Límite de masa térmica (°C)			Ventilación		Enfriamiento evaporativo (°C)		Calentamiento pasivo (°C)
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Verano	Invierno	Ventilación nocturna	1 m/s	2 m/s	Directo	Indirecto	Límite
Cárdenas	28.2	24.2	27.3	23.3	36.5	19.8	40.3	35.4	41.5	38.2	41.2	11.3
Comalcalco	28.3	24.3	27.2	23.2	36.2	20.1	39.6	35.7	41.4	38.3	41.3	11.3
Cunduacán	28.3	24.3	27.3	23.3	36.5	20.0	40.5	35.8	41.5	38.3	41.3	11.3
Huimanguillo	28.3	24.3	27.2	23.2	36.4	20.1	40.1	38.0	42.0	38.3	41.3	11.3
Paraíso	28.4	24.4	27.3	23.3	36.3	20.6	39.3	35.4	41.7	38.4	41.4	11.4

El valor más alto para deshumidificar durante un año se encuentra en Huimanguillo con 35.76 % (Figura 4). y el valor más bajo está en la ciudad de Cárdenas con 32.60% (Figura 5.).

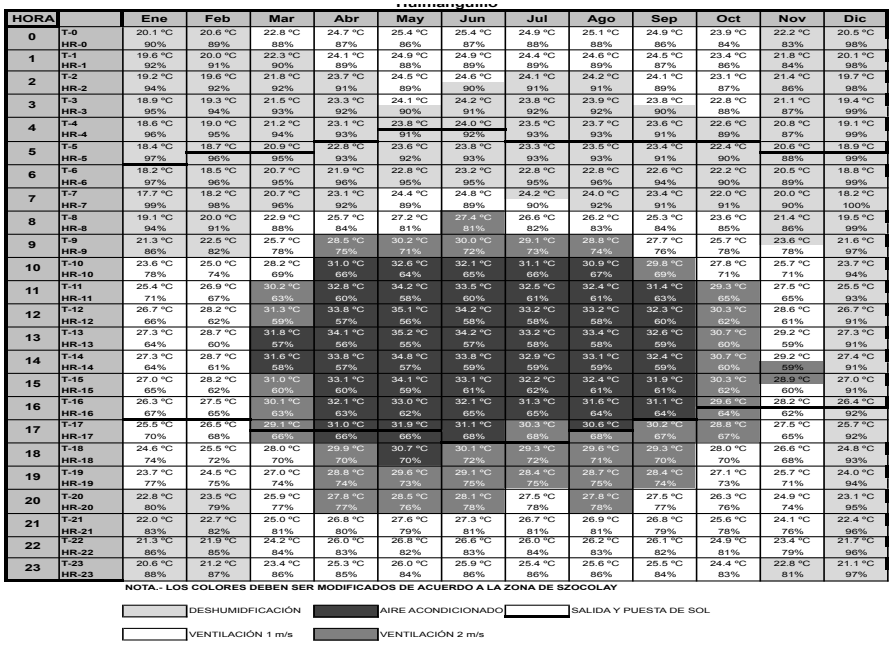


Figura 4. Diagnóstico bioclimático, mayor nivel de humedad, Huimanguillo, Tabasco.

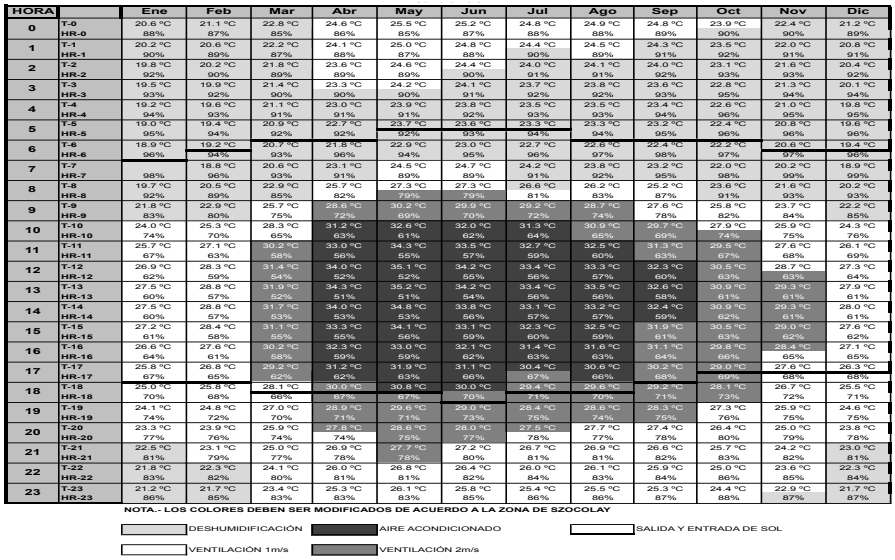


Figura 5. Diagnóstico bioclimático, menor nivel de humedad, Cárdenas, Tabasco.

Tabasco no cuenta con una velocidad de viento constante, de acuerdo a los resultados obtenidos en la Figuras 4 y 5 aun cuando se requiere aproximadamente un 49% de ventilación (1 y 2 m/s), sin embargo, con las estrategias de deshumidificación con ventilación inducida podrían mejorarse las condiciones de confort en el interior de las viviendas. Con base en los resultados de las cartas psicrométricas de cada municipio, se obtuvieron los requerimientos de aplicación de diferentes estrategias durante el año (Tabla 4.).

Tabla 4. Porcentaje de estrategias para aplicar durante el año.

Municipios	Deshumidificación (%)	Aire Acondicionado (%)	Ventilación 1 (%)	Ventilación 2 (%)	Masa térmica (%)
Cárdenas	33.9	14.8	35.1	16.3	
Comalcalco	35.1	16.3	34.4	14.3	
Cunduacán	32.8	14.7	32.3	17.0	1.9
Huimanguillo	35.9	16.5	34.4	13.2	
Paraíso	34.6	16.5	31.3	17.7	

Las estrategias más relevantes por sus resultados para la aplicación en viviendas de interés social en los casos de estudios, es la utilización de la deshumidificación (32.6%-35.8%), ventilación 1 m/s (30.2%-37.8%).Durante la comparación de las propuestas de adecuación, el que mayor impacto tiene para un clima cálido húmedo es el sistema de "deshumidificación solar activa" correspondiente a una estrategia factible con eficiencia de un 53% a la disminución de humedad de un espacio interior, el cual se genera mediante la radiación solar al contacto con el material desecante contenido en un espacio interior independiente de la vivienda.

Tabasco no cuenta con una velocidad de viento constante, es ineficiente el uso de los otros sistemas pasivos para que trabajen y reduzcan la humedad interior que necesitan, por esta razón se descartó el sistema de lecho dual por deshumidificación de Moore, adecuación de muro Trombe y el sistema de inyección de viento fresco, aunque éstos en otras circunstancias alcanzan una efectividad de un 45% a 55% de deshumidificación del aire.

CONCLUSIONES

Se analizaron diversos parámetros sobre el confort térmico con procedencia a estrategias para el desarrollo de un proyecto bioclimático en viviendas de construcción en serie con problemas de humedad relativa en la región Chontalpa, Tabasco, estas deben estar adaptadas a las condiciones del clima, parámetros geográficos y vegetación. La temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación, proporcionan un vínculo con el medio ambiente, teniendo particularmente presente al diseñar para la implementación de los sistemas pasivos y activos (dispositivos industrializados), que darán a la vivienda dentro del espacio interior una humedad relativa promedio de 45% a 55% en el aire.

Se muestra que las viviendas o partes de ellas desde un punto bioclimático, deben ser confortables en todo el año; sin embargo, son ligeras las diferencias de temperatura entre el período cálido y frío, auncuando no es el mismo comportamiento en verano (abril-septiembre) que en invierno (octubre-marzo). Así que las estrategias deben ser elegidas y establecer relaciones vivienda-medio ambiente-habitante, al tener presente que no está ligada solamente a las condiciones de los factores climáticos, sino a las condiciones que el mismo lugar propone y a los factores constructivos con los que está compuesta, así como al nivel de aclimatación de quienes la habitan.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por el apoyo recibido para realizar la estancia de XII Verano de Investigación Científica 2016, a la Universidad Autónoma de Baja California, por ser la institución receptora y a los investigadores Dra. Ramona A. Romero Moreno y Dr. Gonzalo Bojórquez Morales, responsables de la estancia.

REFERENCIAS

Azcona, P.O. (2014). Tabasco la entidad donde vivo. Secretaría de Educación Pública. México, DGMIE/SEP. ISBN: 978-607-514-768-0, p.22.

Docherty, M. and Szokolay S. (1999). Climate analysis. In PLEA Note 5. Brisbane: Passive and LowEnergyArchitecture – University of Queensland

González, A, (2013) Clasificación de los sistemas pasivos de enfriamiento en base a los factores ambientales para lograr bienestar controlables térmico, Universidad Rafael Urdaneta.

Guimarães, M. M. (2012). Confort térmico y tipología arquitectónica en clima cálido-húmedo. [en línea]. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, [citado julio 16, 2016]. Disponible en: https://mastersuniversitaris.upc.edu/aem/archivos/2007-08-tesinascompletas/confort-termico-y-tipologia-arquitectonica-en-clima-calido-humedo.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016) [citado julio 16, 2016]. Disponible en: http://www.inegi.org.mx

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, versión 2013 [citado julio 21, 2016]. Disponible en: http://www.inafed.gob.mx/

Luna, A, (2009). Programa de Análisis Climático, Universidad Autónoma de Baja California.

CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS EFECTOS EN EL BIOCLIMA CÁLIDO SECO: ANÁLISIS RETROSPECTIVO Y PROSPECTIVO

Carlos A. García V., **Carlos E. Tapia L.**
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa

David Morillón G.
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria SN, Ciudad Universitaria, CP 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa Tel: 01 667 713 4043
Email: facing@uas.uasnet.mx

RESUMEN
Una de las grandes preocupaciones de la humanidad es el cambio climático, los impactos que este tiene en los diversos sectores y lugares deben ser motivo de estudio, por lo anterior en este trabajo se tiene como objetivo analizar el clima de Culiacán, Sin., ciudad ubicada en zona cálida seca, del periodo de 1950 a 2010, para identificar si se ha presentado un cambio, además de estudiar cuales son los efectos del cambio climático en el bioclima y edificios de la región, evidenciados con la modificación de la zona de confort, el aumento en los requerimiento energético de los edificios y las emisiones de CO2 relacionada, además de contar con las bases para definir medidas de mitigación y estrategias para la adaptación de los edificios, y caminar a la sustentabilidad.
La metodología parte de un estudio del bioclima, para las condiciones históricos y actuales, además de elaborar escenarios al 20150, para identificar el efecto que se ha tenido y tendrá en el confort higrotérmico, a partir del diagrama de isorrequerimientos calcular los días grado para enfriamiento y calentamiento, así como el consumo de energía en edificios debido al uso de sistemas de climatización, así como las emisiones de CO2 relacionadas con el uso de energía convencional, con objeto de tener bases para mitigar y adaptar los edificio ante el cambio climático. Como resultados se tiene que se ha presentado el cambio climático, por lo que ha aumentado las condiciones de calor, para un edificio, con las condiciones extremas, se analiza los requerimientos de energía para los tres escenarios y el CO2 relacionado., para finalmente para el caso de estudio se realiza una adecuación para cuantificar los beneficios en la mejora térmica, el ahorro de energía y mitigación de CO2.

ABSTRACT
One of the great concerns of humanity is climate change, the impacts that this has on the various sectors and places should be of study, so earlier in this work is aimed at analyzing the climate of Culiacan, Sin., City located in dry warm area, the period from 1950 to 2010, to identify whether there has been a change, in addition to studying what the effects of climate change in the bioclimate and buildings in the region, evidenced by modifying the comfort zone the increase in the energy requirements of buildings and related CO2 emissions, in addition to defining the basis for mitigation and adaptation strategies for buildings, and walk to sustainability.
The methodology is based on a study of bioclima, for historical and current conditions, and develop scenarios to 20150, to identify the effect it has had and will have on the hygrothermal comfort from the diagram of isorrequerimientos calculate degree day cooling and heating and energy consumption in buildings by the use of air conditioning systems, as well as CO2 emissions related to the use of conventional energy, in order to have a basis for building mitigate and adapt to climate change. As results have to be presented climate change, which has increased heat conditions for a building with the extreme conditions, the energy requirements for the three scenarios and related CO2 analyzed., And finally to if an adjustment is made study to quantify the benefits in improved thermal, energy savings and CO2 mitigation.

Palabras clave: Bioclima, confort, emisión de CO2, mitigación, cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN
Un problema que actualmente presentan los edificios es el uso excesivo de la energía convencional para la climatización, debido al origen de dicha energía se presentan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), por lo que es de gran importancia determinar el impacto en los edificios por el efecto del cambio climático y definir estrategias de mitigación con el fin de estimar los beneficios energéticos y ambientales.
A continuación determinar el impacto del cambio climático, mediante escenarios retrospectivos y prospectivos, en las condiciones de confort térmico, el uso de energía en los edificios, por la utilización de los sistemas de climatización y las emisiones de CO2 relacionas. Para definir estrategias y estimar los beneficios energéticos, económicos y ambientales, por la mitigación de los GEI y la adaptación de los nuevos edificios, el caso de estudio es la ciudad de Culiacán, Sinaloa, ubicada en clima cálido seco.

2. ANTECEDENTES

Los trabajos directamente relacionados con el estudio son los de Sheinbaum (1996) realizó un estudio energético de la vivienda en México y el CO2 relacionado con el equipamiento de la misma, Morillón (2004) presenta un atlas del bioclima en México, Tejeda (2007) presento un estudio sobre cambio climático y arquitectura, con el consumo de energía en la vivienda por ciudad para los escenarios de 2020 y 2050, Morillón (2008) Cuantifico el CO2 relacionado con medidas de mitigación en la vivienda para la hipoteca verde, Rosas-Morillón (2010) estudiaron el CO2 relacionado con la vivienda en México, Morillón-Garcia (2015) presentaron el consumo, uso final de la energía y CO2 relacionado en los edificios de los diversos climas de México, Morillón (2015) presenta el impacto del cambio climático en el bioclima de México, para las condiciones pasadas y presentes, por lo anterior es necesario estudiar la evidencia del cambio climático en el clima cálido seco, evaluar el impacto del cambio en el bioclima y la energía y CO2 relacionados.

3. METODOLOGIA (Actividades)

1. Se analiza en forma comparativa el clima de Culiacán, Sinaloa, para los periodos del 1951-1980 y 1981-2010
2. Se elabora escenario del clima al 2050, con base en los datos climáticos actuales y con la base del meteonorm
3. Se realiza un estudio del bioclima para obtener los diagramas de isorrequerimientos de los tres casos o periodos de tiempo
4. Se identifica los efecto en las condiciones de confort, comparando los diagramas de isorrequerimientos
5. Se cálculos los días grado para enfriamiento de cada caso
6. Se estima el requerimiento de energía para un edificio de fachadas de vidrio claro, para los tres casos
7. Se calcula el CO2 relacionado con el uso de energía, para los tres casos

4. RESULTADOS

El cambio climático en Culiacán es una realidad como se observa en la figura 1.

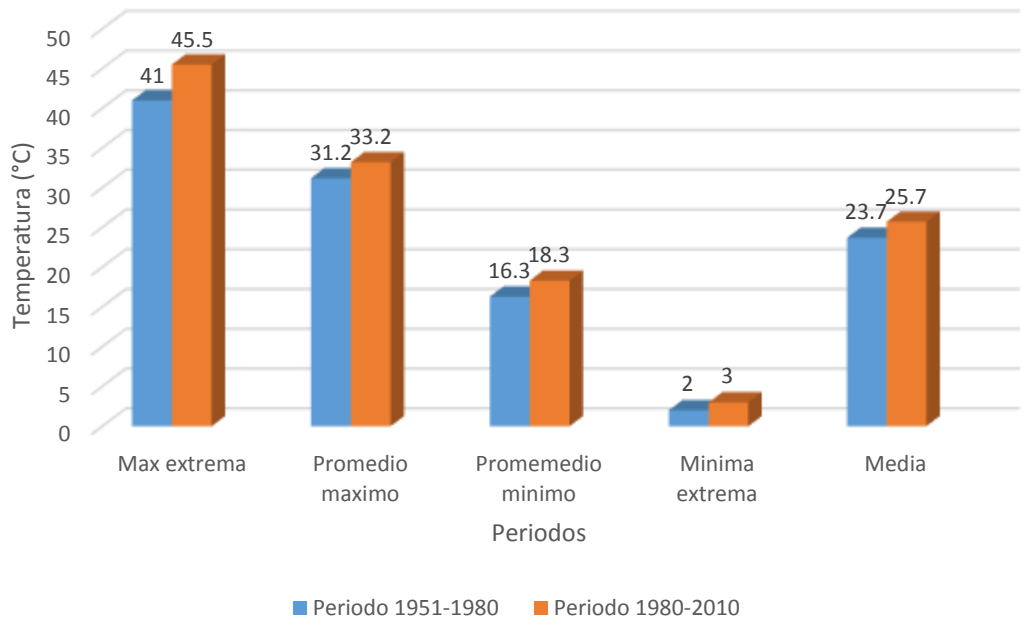


Figura 1. Comparación de la temperatura par los periodos 1951-1980 y 1981-2010

En la figura 1 se presenta de manera gráfica el cambio en la temperatura de los periodos seleccionado, para el caso de Culiacán, Sin., ciudad ubicada en clima cálido seco, el aumento entre 2 y 4 °C de las temperaturas, máxima extrema y promedio, como en las media y las mínimas extremo y promedio, del periodo de 1951-1980 al 1981-2010, es debido al cambio climático.

Escenario al 2050

A partir de las condiciones climáticas del periodo de 1981-2010 se estimó para el 2050, entre otros datos, las temperaturas promedio máxima y mínima, así como la medida (Figura 2)

PROYECCION EN LA TEMPERATURA
2050
CULIACAN, CULIACAN, SIN
ALTITUD 40 MS.N.M.

PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURAS													
PROMEDIO DE MAXIMA	29.9	30.6	32.2	34.7	36.8	37.1	35.9	35.4	35	35.1	32.4	30.6	33.8
MEDIA	22	22.9	24.4	26.9	29.5	31.7	30.9	30.4	30	28.9	25	22.9	27.1
PROMEDIO DE MINIMA	14.6	15.1	16.5	19.06	22.2	26.2	25.8	25.4	25.04	22.7	17.5	15.1	20.4

Figura 2. Escenario de temperaturas al 20150

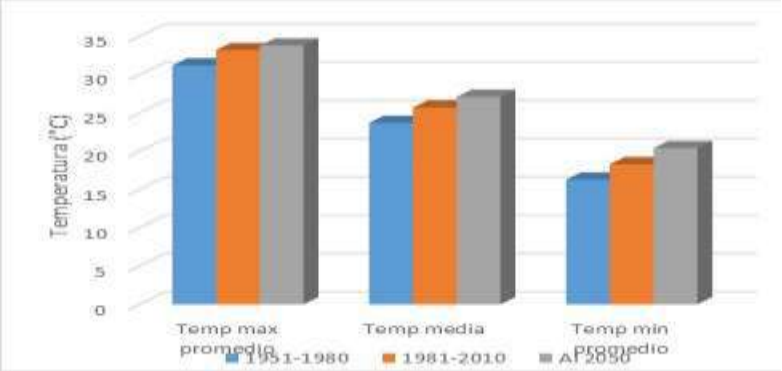


Figura 3. Comparación de las temperaturas de los tres periodos

Estudio del bioclima
Con los datos de cada uno de los tres periodos, tomando como retrospectiva (1951-1980), situación actual (1981-2010), como futuro al 2050, se realizan los estudios del bioclima, de cada caso, obteniendo los diagramas de isorrequerimientos, donde se identifican las condiciones de calor, confort y frio a horas y meses promedio del año (Fig. 4, 5 y 6).

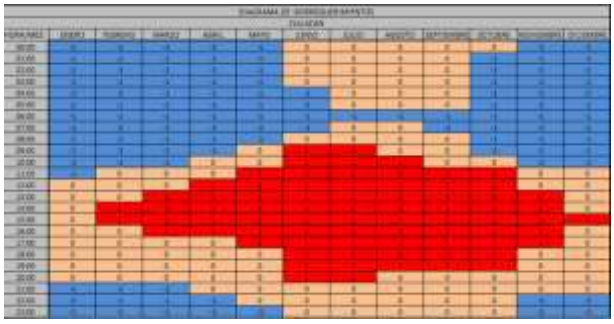


Figura 4. Diagrama de Isorrequerimientos para Culiacán, Sin. (1951-1980)

Figura 5. Diagrama de Isorrequerimientos para Culiacán, Sin. (1981-2010)

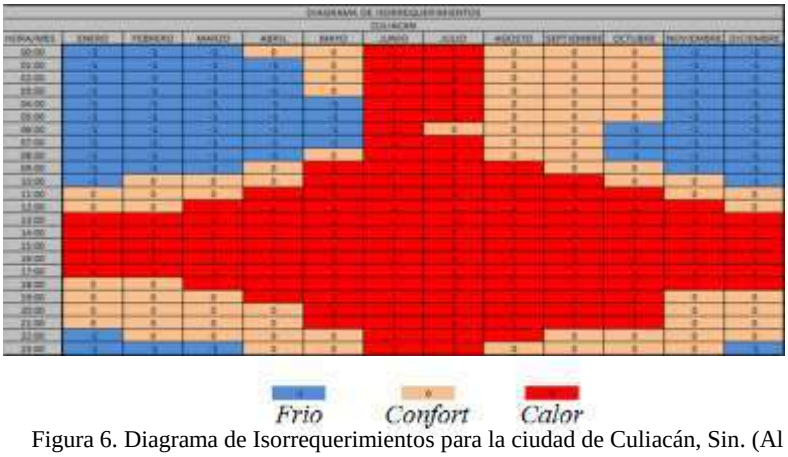


Figura 6. Diagrama de Isorrequerimientos para la ciudad de Culiacán, Sin. (Al 2050)

Del estudios de los tres periodos se observa los cambios significativos, principalmente en las condiciones de calor, durante el periodo 1951-1980 (Fig. 4) la ciudad presentada condiciones de calor predominando en los meses de verano, sin embargo presentaba condiciones de confort y frio en las estaciones de primavera, otoño e invierno, en el caso 1981-2010 (Fig. 5) las condiciones de calor aumentan y disminuye en confort y frio, en el escenario al 2050 (Fig. 6), debido al aumento de temperatura para todos los meses, aumenta de manera significativa las condiciones de calor.

Calculo de impactos

Con base a los estudios del bioclima se realizó el cálculo de los requerimientos de enfriamiento, consumo energético y emisiones de CO2 relacionadas.

Grado Día

Periodo	Ciudad	Grados día de enfriamiento anual (°C)
1951-1980	Culiacán, Sinaloa.	917.1
1981-2010	Culiacán, Sinaloa.	1,008.3
2050	Culiacán, Sinaloa.	1,149.8

Tabla 1. Grados día de enfriamiento anual para bioclima cálido seco, Culiacán, Sin. Retrospectiva, presente y Prospectiva

Consumo Energético

Se considere un edificio con fachadas de vidrio claro, caso extremo, pero cada vez más se construye.

Periodo	Ciudad	Energía para aire acondicionado (kWh/m^2)
1951-1980	Culiacán, Sin.	117
1981-2010	Culiacán, Sin.	128.65
2050	Culiacán, Sin.	146.7

Tabla 2. Total de energía al año para climatización por unidad de superficie, bioclima cálido seco, Culiacán, Sin. Retrospectiva, presente y Prospectiva

Emisión de CO2 relacionadas por el consumo de energía

Bioclima	Ciudad	Emisión de CO_2 por consumo de energía (kg/m^2)
1951-1980	Culiacán, Sin.	40.95
1981-2010	Culiacán, Sin.	45.03
2050	Culiacán, Sin.	51.45

Tabla 3. Emisión de CO_2 relacionadas por el consumo de energía, bioclima cálido seco, Culiacán, Sin.

CONCLUSIÓN

Con base en los objetivos de este trabajo se identificó que se presenta el cambio climático en la zona cálida seca de México, caso Culiacán, Sinaloa, y como este afecta a los edificios; energética y ambientalmente, para los escenarios del pasado, presente y en un futuro.

Las emisiones de CO_2 estimadas se refieren al consumo de energía convencional para la climatización, por uso de los sistemas de aires acondicionados. No obstante, es necesario evitar el uso excesivo de este por lo que se deben adoptar métodos de mitigación.

En el bioclima de Culiacán, debido a las condiciones climáticas, geográficas, topográficas, etc. el cambio climático se manifestará cono aumento en la temperatura. Por lo anterior es importante resaltar que se deben realizar acciones encaminadas

a la regulación del uso de energía convencional y el uso de materiales de construcción y diseños adecuados a las características de la región.
Por último, debe tomar en cuenta el mejoramiento y el impulso de programas de ahorro y uso eficiente de energía eléctrica como la hipoteca verde, para edificios comerciales y de servicios, pero sobre todo definir las estrategias para la adaptación de los nuevos edificios.

REFERENCIAS

Andrade L (2015) Diagnóstico y Adecuación Térmica de Tienda de Autoservicio para Bioclimas de la República Mexicana: Impactos y Beneficios Energéticos y Ambientales, Instituto Politécnico Nacional, México.

IPCC (1988) sustentó científicamente el calentamiento, por el programa de las naciones unidas para el medio ambiente.

James Hansen (1988), Cambio Climático Global como pronóstico del Modelo Tridimensional del Instituto Goddard de Estudios Espaciales publicado en Journal of Geophysical Research.

Jauregui, Ernesto & Tejeda Adalberto. 2001. A scenario of human thermal comfort in Mexico City for 2CO2 conditions. Revista Atmósfera, Vol. 14, 2001 Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.

Morillón, D (1993), Bioclimática - Sistemas Pasivos de Climatización. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.

Morillón, D (2004, Human bioclimatic Atlas for Mexico, Solar energy, Ed. Elsevier, Alemania.

United Nations Environment Programme (2009), Sustainable buildings and climate initiative "building and climate change", Naciones unidas,

Morillón D, Escobedo A y García I (2015) Línea Base del consumo y uso final de la energía eléctrica en edificios comerciales y de servicios de la República Mexicana, II-UNAM, México.

Morillón D (2011) Estrategias regionales y sectoriales para lograr un desarrollo sustentable y de baja intensidad de carbono en México, Centro Mario Molina, México.

Normales climatológicas (2016) CONAGUA, Disponibles en: http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=sin, México

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar

ISES International Solar Energy Society

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016

17 AL 21 DE OCTUBRE

CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO

¡OH TIERRA DEL SOL!

"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

2016

Energías Renovables
"ERE"

- Recursos Energeticos Renovables
- La Energia Solar en el Contexto Energetico Global
- Enseñanza de las Energias Renovables
- Energia Eolica
- Energia de la Biomasa
- Eficiencia Energetica
-

"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO "OFFSHORE" EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA

Luz I. R. A., José A. L.P.R., Robinson T. D. B.

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd Universitario 1000, 22260 Valle de las Palmas, B.C., México, (664) 546 7228, (664) 176-7800, (665) 653 4133, luz.rojano@uabc.edu.mx, a331575@uabc.edu.mx, robinson.delgadillo@uabc.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo analiza la alternativa de generar energía eléctrica con recursos renovables en las costas de Baja California, específicamente en Bahía Descanso, Playas de Rosarito. Implementando una tecnología que aprovecha el recurso eólico marino, con el fin de suministrar electricidad producida a las poblaciones cercanas del sitio potencial estudiado, de manera que se aprovechen las fuentes de energía renovable que proporciona la zona geográfica, reduciendo las emisiones de CO_2 generadas por fuentes de energía convencionales. Tomando en cuenta que Baja California es un sistema aislado a la red eléctrica nacional, el aumento de la demanda energética y por ende el desabasto de la misma, se consideró la instalación de un parque eólico tipo "offshore" (alejado de la costa). Se analizaron aspectos técnicos tales como recurso eólico, tipo de suelo y corrientes marinas. El análisis se realiza mediante simulaciones a través de software como RetScreen y Homer, evaluando datos técnicos - financieros y simulando sistemas renovables a partir de los cuales se obtiene una información más precisa del comportamiento del sistema.

Palabras clave: recurso renovable, eólico marino, alternativa, energía eléctrica.

ABSTRACT

This work analyzes the alternative to generate electrical energy with renewable resources in the coast of Baja California, specifically in Bahía Descanso, Playas de Rosarito. Implementing a technology that leverages the marine wind resource, with the purpose of supplying electricity to the nearby towns of the potential site studied, so as to take advantage of the renewable energy sources which provides the geographical area, reducing the CO2 emissions generated by conventional sources of energy. Taking into account that Baja California is an isolated system to the national electricity grid, the increase in energy demand and hence the deprivation of the same, it was considered the installation of a offshore wind farm. Technical aspects were analyzed such as wind resource, type of soil and sea currents. The analysis is performed using simulations via software like RetScreen and Homer, evaluating technical – financial data and simulating renewable systems from which you can get a more precise information on the behavior of the system.

Key words: renewable resource, offshore wind, alternative, electrical energy.

INTRODUCCIÓN

El aumento en el precio de algunas energías fósiles convencionales como el petróleo, es el reflejo de la creciente escasez de estos recursos, y un crecimiento vertiginoso en la demanda energética por parte de las economías emergentes han propiciado la innovación tecnológica para la extracción de vastos recursos fósiles no convencionales, como el gas de lutitas, y el uso de infinitos recursos renovables, como el viento y el sol, los que antes se consideraban inutilizables por el alto costo de las tecnologías requeridas para su generación.

Al mismo tiempo, los efectos del cambio climático, que son cada vez más severos y más costosos, son los que conducen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). México se encuentra en un momento clave tanto en la redefinición de su política energética como en la consolidación de las medidas que ya ha adoptado para reducir sus emisiones GEI, en particular con la implementación de la Ley de Cambio Climático, aprobada en 2012. A la par de estos esfuerzos por disminuir la intensidad e ineficiencia energéticas, México necesita un sector energético diversificado, en el que las energías renovables sean un componente esencial para alcanzar la seguridad energética, mejorar la competitividad presente y futura del país y garantizar el bienestar de todos los mexicanos (SENER, 2013).

Hoy en día la generación de energía eólica se presenta como la energía renovable más vendida en el ámbito internacional por potencia instalada (MW) y por energía generada, al ser una medida óptima para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que uno de los problemas más preocupantes son tanto el futuro energético como su sostenibilidad, ante los efectos negativos del cambio climático y la llegada de la máxima producción mundial de petróleo convencional.

SUPOSICIONES

México actualmente no cuenta con parques eólicos offshore, pero si con 31 parques eólicos onshore operando, que generan 2,551 MW según estudios arrojados en el 2013 por la Asociación Mexicana de Energía Eólica. Entre 2015 y 2018, se esperan inversiones por 14 mil millones de dólares para construir parques eólicos en el país, dijo Adrián Escofet, presidente de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE).

Con el transcurso del tiempo la demanda energética ha ido aumentando debido a la tasa de crecimiento poblacional del 1.3% anual, en este momento existimos 125,442,045 personas siendo en abril 2015 la demanda eléctrica nacional de 16, 906,989.120 MWh. Baja California está catalogado como uno de los estados con mayor capacidad para generar energía de forma sustentable, en cuanto a recurso eólico marino toda la costa es viable para construcción de aerogeneradores en cuestión de generación eléctrica. El estado de Baja California tuvo un consumo eléctrico de 9, 221,358 MWh en el año 2010. La tasa de crecimiento anual de Playas de Rosarito es de 2.21%. En este momento se cuenta con un total de 103,068 habitantes registrados, pero esto solo los residenciales.

MÉTODOS

Se tratará de buscar un emplazamiento en las costas de Baja California. Los lugares con velocidades de viento estables son la costa del pacifico al oeste del país de México. Otros criterios de selección fueron la proximidad de puertos con la infraestructura apropiada que satisfaga las necesidades logísticas del parque, astilleros e industria auxiliar en la proximidad del emplazamiento con capacidad de construcción de las plataformas, búsqueda de fondo marino estable para cimentación y buena infraestructura eléctrica para la integración a la red.

Análisis de la disponibilidad del recurso

A continuación, se muestra la tabla de velocidades de viento en el transcurso de un año con mediciones a 20 metros y velocidades extrapoladas a 90 m con la siguiente expresión:

$$\frac{v'}{v} = \left(\frac{z'}{z}\right)^{\propto} \tag{1}$$

Tabla 1 Mediciones de viento a 20 m.

MEDICIONES A 20 m	
VELOCIDAD PROMEDIO MENSUAL Velocidades del viento (11/08/2013) - (05/Nov/2015)	
Mes	**m/s**
ENERO	7.65
FEBRERO	7.43
MARZO	8.18
ABRIL	8.21
MAYO	9.52
JUNIO	7.95
JULIO	6.14
AGOSTO	7.51
SEPTIEMBRE	7.13
OCTUBRE	6.90
NOVIEMBRE	7.16
DICIEMBRE	8.22
Media	**7.67**

Tabla 2 Mediciones extrapoladas a 90m.

EXTRAPOLACIÓN A 90 m	
VELOCIDAD PROMEDIO MENSUAL Velocidades del viento (11/08/2013) - (05/Nov/2015)	
Mes	**m/s**
ENERO	9.446
FEBRERO	9.172
MARZO	10.091
ABRIL	10.132
MAYO	11.752
JUNIO	9.812
JULIO	7.577
AGOSTO	9.268
SEPTIEMBRE	8.806
OCTUBRE	8.521
NOVIEMBRE	8.843
DICIEMBRE	10.141
Media	**9.46**

En la caracterización del recurso energético, en este caso el viento, es necesario tener una buena probabilidad de duración en tiempo del recurso a explotar, para eso utilizamos la ley de distribución de Weibull de la velocidad del viento:

$$p(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \tag{2}$$

Dónde: V velocidad de viento (m/s) p(v) función de densidad de probabilidad de viento c factor de escala (m/s), normalmente es próximo a la velocidad media k factor de forma que caracteriza a la asimetría de la función de probabilidad e número de Euler 2.718281 y continua. La velocidad media de viento extrapolada a 90 m de altura es la que se usa para la distribución de Weibull. Los parámetros k y c son importantes para definir esta distribución y se obtienen de la siguiente manera: k se considera como 4 ya que es un valor estándar para caracterizar el viento medio marino, de acuerdo a la ubicación del parque eólico.

La relación que existe entre c y (V) es la siguiente:

$$\frac{< v >}{c} = r(1 + \frac{1}{k}) = \Gamma(.25) = 0.928v \tag{3}$$

De acuerdo con esta expresión tenemos que c = (v)/0.928= 10.19 con valores de k próximos a 4, por lo que tenemos (V) = 9.45 m/s, c = 10.19 m/s, k = 4.

Teniendo todos los parámetros para la distribución de Weibull se obtuvo la siguiente gráfica:

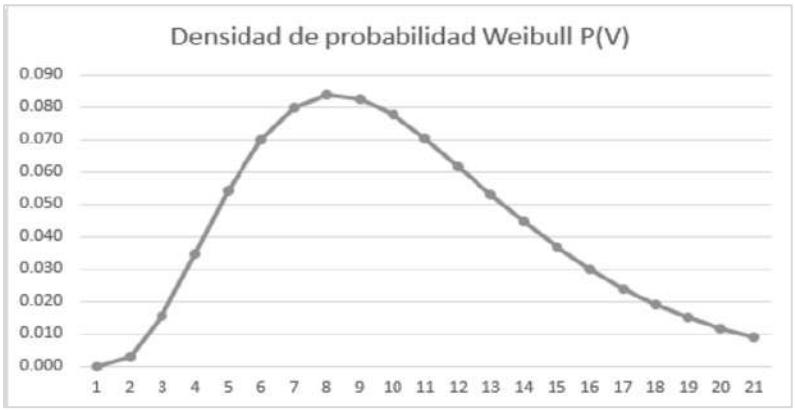


Fig. 1 Probabilidad de viento en la zona seleccionada.

Cálculo de la energía producida

Una vez conocidos las velocidades de viento, la potencia instantánea con ayuda del proveedor del equipo, la densidad de probabilidad con las formulas ya mencionadas anteriormente y por medio de la multiplicación de estas, se obtuvo la potencia de salida de la turbina en kW, para poder establecer cuantos kW estará generando nuestro parque eólico offshore. En la siguiente tabla se muestran los resultados.

Tabla 3 Generación en kW de la turbina con la densidad de probabilidad de viento en el sitio.

Velocidad (m/s)	Potencia instantánea de turbina (kW)	Densidad de probabilidad	Potencia de salida de la turbina en el sitio por velocidad, kW. (Potencia instantánea x Densidad de probabilidad
0	0	0.0000	**0.00**
1	0.0	0.003	**0.00**
2	0.0	0.016	**0.00**
3	21.3	0.035	**0.74**
4	84.9	0.054	**4.62**
5	197.3	0.070	**13.84**
6	363.0	0.080	**29.05**
7	600.0	0.084	**50.33**
8	900.0	0.083	**74.41**
9	1,274.0	0.078	**99.02**
10	1,633.0	0.070	**114.95**
11	1,863.0	0.062	**115.24**
12	2,000.0	0.053	**106.04**
13	2,000.0	0.045	**89.02**
14	2,000.0	0.037	**73.41**
15	2,000.0	0.030	**59.61**
16	2,000.0	0.024	**47.76**
17	2,000.0	0.019	**37.83**
18	2,000.0	0.015	**29.65**
19	2,000.0	0.012	**23.02**
20	2,000.0	0.009	**17.73**
	Total	**1**	**878.03**

Diseño del parque

Se ha seleccionado la zona de La Bahía Descanso, en Rosarito, en las aguas del Océano Pacifico cuyas coordenadas son:

Tabla 4 Tabla de resumen de ubicación.

Latitud	32°12'37.72"
Longitud	116°57'21.32"
Profundidad	55 m
Velocidad del viento	7.2 m/s
Altura de las olas	2.5 m

A continuación, se muestra la localización del emplazamiento en el mapa:

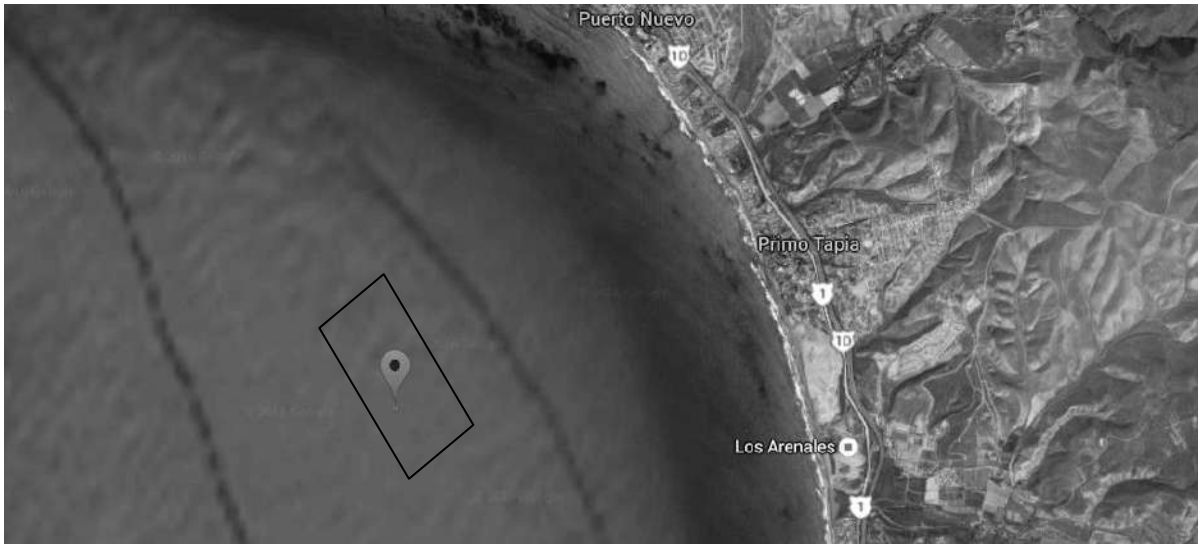


Fig. 2 Imagen 2015 DigitalGlobe, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Datos del mapa 2015 Google, INEGI

Batimetría

En cuanto a batimetría se consultó en el CICESE, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., donde se obtuvo un mapa batimétrico del lugar (ver figura 3). El mapa batimétrico general muestra que Bahía Descanso tiene profundidades menores de 90 metros en una franja adyacente a la costa, con ancho de 4 kilómetros. Las pendientes del fondo predominantes son menores de 2% (1/50). Las profundidades de 30 a 40 metros y las menores pendientes del fondo (1% a 2%). Según el sondeo que realizo la CICESE con mayor detalle en los alrededores de la zona de interés se obtuvo que las profundidades oscilan entre 20 y 50 m, a una distancia de la costa de 5 km.

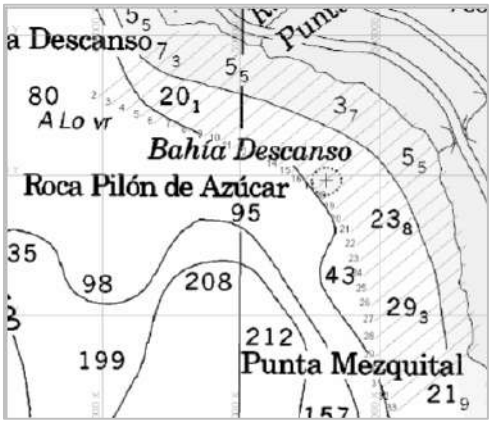


Fig. 3 Líneas del sondeo general (en azul), en Bahía Descanso, B.C. **(CICESE, 2013)**

Actualmente los parques eólicos marinos los podemos encontrar desde 1 a 100 metros de profundidad gracias a la nueva tecnología de plataformas flotantes, hoy en día el único límite a considerar es la distancia de la costa, por los altos costos de instalación de red eléctrica submarina.

Para la selección del tipo de cimentación, se llegó a la conclusión que debido a la profundidad del emplazamiento (entre 40 y 50 m) y una vez analizados los datos de oleaje y de mareas, se puede concluir que las estructuras más adecuadas para el proyecto en cuestión son las de tipo trípode y la estructura jacket. Incluso, por seguridad lo más adecuado sería utilizar la estructura jacket, ya que admite profundidades algo superiores a las estructuras tipo trípode.

Tecnología

Al finalizar el estudio de recurso y de la zona de emplazamiento, se ha decido que el parque estará conformado con 8 aerogeneradores de 2 MW cada uno, esto supone una capacidad instalada de 16 MW. El aerogenerador a utilizarse será el GAMESA G90 – 2.0 MW con un rotor de 3 palas de 90m de diámetro, un área de contacto con el viento de 6,363m^2, una velocidad de rotación de entre 9 y 19 rpm y un factor de potencia de 0.98. Las especificaciones completas se encuentran descritas en las siguientes tablas.

GAMESA G90-2.0 MW

Rotor

Diameter	90 m
Swept area	6,362 m²
Rotational speed	9.0 - 19.0 rpm
Rotational direction	Clock Wise (front view)
Weight (incl. Hub)	Approx. 36 T
Top head mass	Approx. 106 T

Blades

Number of blades	3
Length	44 m
Airfoils	DU (Delft University) + FFA-W3
Material	Preimpregnated epoxy glass fiber + carbon fiber
Total blade weight	5,800 kg

Generator 2.0 MW

Type	Doubly- fed machine
Rated power	2.0 MW
Voltage	690 V ac
Frequency	50 Hz
Protection class	IP 54
Number of poles	4
Rotational speed	900:1,900 rpm (rated 1,680 rpm) (50Hz)
Rated Stator Current	1,500 A @ 690 V
Power factor (standard)	0.98 CAP - 0.96 IND at partial loads and 1 at nominal power. *
Power factor (optional)	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range. *

Tubular Tower

Modular type	Height	Weight
3 sections	67 m*	153 T
4 sections	78 m	203 T
5 sections	100 m	255 T

Gearbox

Type	1 planetary stage / 2 parallel stages
Ratio	1:100.5 (50 Hz)
Cooling	Oil pump with oil cooler
Oil heater	2.2 kW

Fig. 4 Descripción del aerogenerador (GAMESA, 2015)

Capacidad de evacuación de la infraestructura eléctrica.

Para que un parque eólico cumpla su función es imprescindible que se pueda evacuar la energía eléctrica generada a través de las infraestructuras existentes de la red eléctrica. En México, el Sistema Eléctrico Nacional cuenta con una infraestructura que permite la transformación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica por todo el país a través de la CFE (Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027).

La tensión a la que están conectadas las turbinas del parque puede ser de 33, 35 y 66 kV. Para evitar la inclusión de una subestación offshore, se podría transmitir a la tensión interna del parque eólico. La principal ventaja de esta solución es que no se necesita la estación transformadora con el consiguiente ahorro de inversión e instalación que ello supone. Evidentemente la desventaja será la capacidad de transmisión, ésta se verá limitada a unos 50 MW con cables de 35 kV. Lo que supone la necesidad de instalar al menos dos cables submarinos hasta la costa.

Considerando que el parque diseñado se encuentra en el orden de los 50 MW y tras analizar esto se optará por un solo cable HVAC de 132 kV de XLPE. Implicando la instalación de una subestación marina de 30/132 kV. Y estudiando las líneas de transmisión de Baja California, se observó que no existe una línea para realizar la interconexión en la subestación existente en Rosarito, Pino Juárez (la más cercana a nuestro emplazamiento) ya que es de 230 kV, para solucionar esto se agregará equipo auxiliar regulador.

RESULTADOS

Se optó por escoger el área Noroeste del Océano Pacifico, frente a las costas de Playas de Rosarito, ubicándonos frente a Bahía Descanso (ver figura 2), porque se ha visto una fuente de recurso eólico considerable y donde no hay conflictos marítimos. De igual forma es de considerar que es un recurso renovable no explotado en México y una alternativa innovadora de generar energía amigable con el ambiente. Otro de los aspectos a considerar fue la velocidad de viento y la potencia que se obtiene con la instalación.

Al finalizar el estudio de recurso y de la zona de emplazamiento, se ha decido que el parque estará conformado con 8 aerogeneradores de 2 MW cada uno, esto supone una instalación de 16 MW. Como se puede observar en la figura 5 los vientos predominantes de la zona provienen del noreste, lo que se tiene en cuenta para realizar una conveniente orientación. Y se dejar un radio de 500 metros alrededor de cada torre para un óptimo aprovechamiento.

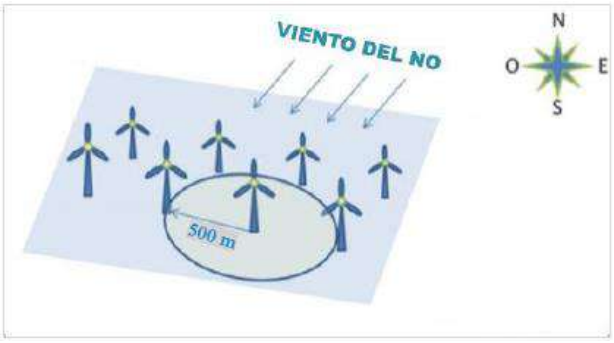


Fig. 5 Disposición del parque eólico offshore y acomodo de aerogeneradores.

Se ha establecido que la infraestructura sea trípode en zonas de aguas poco profundas, entendido como tales aquellas mayores de 10 metros, en nuestro caso llegaran no más de 55 metros de profundidad. Esta solución se ajusta mejor no sólo a las condiciones específicas

del Océano Pacífico, sino que además contempla el desarrollo tecnológico previsto para el momento en que se lleve a cabo la construcción de las instalaciones.

CONCLUSIONES

Las energías renovables son cada vez más indispensables para la vida cotidiana debido al crecimiento de la demanda energética año con año. El recurso eólico disponible en la tierra es basto, y cada vez la tecnología hace que se pueda explotar en porcentajes más altos. La energía eólica marina está tomando un auge considerable alrededor del mundo, con este estudio se concluye que es viable utilizar la tecnología de aerogeneradores tipo "offshore" en México. Las velocidades de viento son el factor más importante para determinar la viabilidad de un parque eólico, en este caso marino, por lo que se concluye de acuerdo a las tablas 1 y 2 que el recurso es óptimo para la instalación de aerogeneradores. Con los datos de velocidad de viento obtenidos en las costas de Rosarito Baja California, el análisis tecnológico, batimétrico y de interconexión a la red se determinó que sería rentable un mini parque de este tipo. Esto quiere decir que en zonas de la costa mexicana con mayor velocidad promedio existiría un beneficio mucho mayor, con lo cual este análisis dio a conocer resultados positivos para la instalación de aerogeneradores marinos en México.

Además, nos encontramos con una disponibilidad de recurso eólico muy alta a lo largo de las costas del país, que de aprovecharse de buena manera podríamos satisfacer las necesidades energéticas de la población y se vería reflejado en el crecimiento económico del país y en su desarrollo como sociedad, también reconocemos que es una gran oportunidad para inversionistas mexicanos y extranjeros de apostar por una industria creciente y muy rentable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y a la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC) por el apoyo y la oportunidad de realizar el trabajo el que se considera va a ser útil para México. Al profesor que nos apoyó en la investigación Rene Delgado Rendón, a nuestro coordinado de carrera el Dr. Felipe Noh Pat.

REFERENCIAS

[1] - Anatec (2005). Beatrice Windfarm – Phase 1 Ship Collision Study. Prepared by Anatec UK Ltd. on behalf of Talisman Energy (UK) Limited. June 2005. Report No. A1385- TE- CR-1.

[2] - Bilgili M. et Al, (2011) Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart

[3] - Bustamante, R. L. (noviembre de 2005). SISMOLOGIA. Recuperado el 28 de noviembre de 2015, de GEOS: http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos05- 1/sesiones_regulares/SIS.pdf

[4] - Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE). (15 de agosto de 2013). Informe Técnico: Caracterización del fondo marino de la región Costera de Bahía Descanso, Baja California: batimetría y sedimentos del fondo. Recuperado el noviembre de 2015, de CCDER: http://www.californiashipstoreefs.org/Resources/Documents/Projects/InfoTec_CCDER_a go15.pdf

[5] - Elsam Engineering (2004) The Danish Offshore Wind Farm Demonstration Project: Horns Rev and Nysted Offshore Wind Farms, Review Report).

[6] - European Environment Agency (2009) Europe's onshore and offshore wind energy potential

[7] - EWEA. European (2009) http://www.ewea.org/ Wind Energy Association

[8] - GAMESA. (10 de OCTUBRE de 2015). CATÁLOGO. Obtenido de GLOBAL TECHNOLOGY EVERLASTING ENERGY: http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/

[9] - I/S Elsam (2000) Horns Rev Offshore Wind Farm. Environmental Impact Assessment. Summary of EIA Report.

[10] - IGS. (2014). ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA COMPETITIVIDAD EN MEXICO. Recuperado 20 de agosto, 2015, de http://www.igs.org.mx/sites/default/files/ENERGIASRENOVABLES_22MAYO_WEB. pdf

[11] - INAFED. (2013). Playas de Rosarito. Obtenido de Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México: http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM02bajacalifornia/municipios/02005a. Html.

[12] - Meteoblue. (10 de octubre de 2015). Meteoblue weather close to you. Obtenido de Meteoblue.com: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/semana/32.183N- 116.923E.

[13] - Nuñez, G. M. (10 de OCTUBRE de 2015). BAJA CALIFORNIA: PERFIL ENERGÉTICO 2010-2020 Propuesta y Análisis de Indicadores Energéticos para el Desarrollo de Prospectivas Estatales. Obtenido de energiabc.gob.mx: http://www.energiabc.gob.mx/files/public/pdf/PerfilEnergeticoBC2010-2020.pdf

[14] - PROMEXICO. (2012). ENERGÍAS RENOVABLES. Recuperado 20 de agosto, 2015, de http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/42/2/Energias_Renovables_ES.pdf

[15] - RESNOM. (Diciembre de 2002). SISMICIDAD DE LA REGIÓN NORTE DE BAJA CALIFORNIA, REGISTRADA POR RESNOM EN EL PERIODO ENERO- DICIEMBRE DE 2002. Recuperado el 28 de Noviembre de 2015, de GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C: http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos02- 3/Resnom02-3.pdf

[16] - Solé, A. C. (2013). AEROGENERADORES . Tijuana : CANO PINA, S.L. EDICIONES CEYSA

[17] - Universidad de Cádiz (2010) La energía eólica marina en la provincia de Cádiz

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

RADIACIÓN SOLAR EN EL ESTADO DE NAYARIT: SU IMPULSO HACIA EL DESARROLLO LOCAL SUSTENTABLE

Héctor H. Ulloa-Godínez, Mario E. García-Guadalupe
Centro de Arte Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara Calzada Independencia Norte No. 5075, Huentitán El Bajo S.H. Guadalajara, Jalisco, 44250, México (33) 36164937
Claudia E. Saldaña-Durán, Y. Rodríguez-Lazcano, Sarah R. Messina-Fernández
Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura "Amado Nervo", Tepic, Nayarit, 63155, México, (311) 2118800.

RESUMEN

La mayor parte del territorio mexicano se ubica en la zona intertropical y se caracteriza por la diversidad climática, topográfica y condiciones que favorecen el desarrollo de las energías renovables. En este caso, la energía solar constituye una fuente significativa e inagotable para su aprovechamiento. En el estado de Nayarit, predominan los climas cálido y templado; la temperatura media anual es de 24 °C y estudios previos demuestran que es una zona propicia para el impulso de la energía solar. Para incentivar el diseño de nuevas políticas que incrementen la utilización de las energías limpias en las zonas urbanas, entre ellas el recurso solar, es necesario cuantificar su disponibilidad y distribución temporal en la región. Fuentes de información internacional y nacional reportan valores promedio de insolación alrededor de 5 kWh/m^2-día para esta área geográfica. El objetivo de este trabajo es cuantificar la cantidad de radiación solar incidente en la ciudad de Tepic Nayarit, a través de la medición de datos en superficie, obtenidos mediante la estación solar perteneciente al proyecto Inventario Nacional de la Radiación Solar del CEMIE-Sol. Los resultados pueden incentivar el desarrollo local sustentable a través del planteamiento de esquemas productivos que aprovechen este tipo de energía a nivel local, además de constituir un mecanismo de mitigación ante los efectos de la contaminación y cambio climático.

Palabras clave: Energías Renovables, Energía Solar, Desarrollo Sustentable.

ABSTRACT

Most of the Mexican territory is located at the intertropical zone and characterized by a climatic and topographic diversity and conditions that favor the development of renewable energies. In such case, solar energy is a significant and infinite source for its use. In Nayarit, hot and warm weather is predominant; the average annual temperature is 24 ° C and some previous studies demonstrate that it is a favorable area to promote solar energy uses. In order to encourage the design of new policies that increase the use of clean energy in urban areas, including solar resource, it is necessary to quantify its availability and temporal distribution in this region. Sources of national and international information, report a value of 5 kWh/m^2 for the average daily insolation for this region. The aim of this study is to quantify the amount of solar radiation incident in the city of Tepic Nayarit, through the measurement of surface data obtained by the solar station belonging to the project "National Inventory of Solar Radiation" CEMIE-Sol. The results may encourage local sustainable development through productive approach schemes that exploit this type of energy at local scale, besides, as a mechanism to mitigate the effects of pollution and climate change.

Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, Sustainable development.

INTRODUCCIÓN

En México, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), además de la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE) promulgadas en el año 2008, abrieron el escenario para la promoción de las energías renovables y la creación de estrategias de eficiencia energética en el país (Breiholz, 2013). Se señala que México está destinado a la utilización de la energía solar térmica y fotovoltaica, tanto para la instalación de calentadores solares para la vivienda, industria y agricultura, así como, para la generación de energía eléctrica. Esto deberá reflejarse en ahorros económicos y energéticos sustanciales.

La mayor parte del territorio mexicano se ubica en la zona intertropical y se caracteriza por la diversidad climática, topográfica y condiciones que favorecen el desarrollo de las energías renovables. En este sentido, la energía solar constituye una fuente significativa e inagotable para su aprovechamiento.

Para incentivar el diseño de nuevas políticas que incrementen la utilización de las energías limpias en las zonas urbanas, entre ellas el recurso solar, es necesario cuantificar su disponibilidad y distribución temporal en la región. Fuentes de información nacional e internacional reportan valores de insolación promedio diaria de 5.5 kWh/m^2 para esta área geográfica (IIE, 2013). La obtención de datos precisos de radiación solar es relevante para impulsar el desarrollo sustentable.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la cantidad de radiación solar incidente en la ciudad de Tepic, Nayarit, a través de la medición de datos en superficie obtenidos de la estación solar perteneciente al proyecto Inventario Nacional de la Radiación Solar del CEMIE-Sol mismos que se pueden contrastar con datos de radiación solar que se obtienen de la información de satélites de libre acceso.

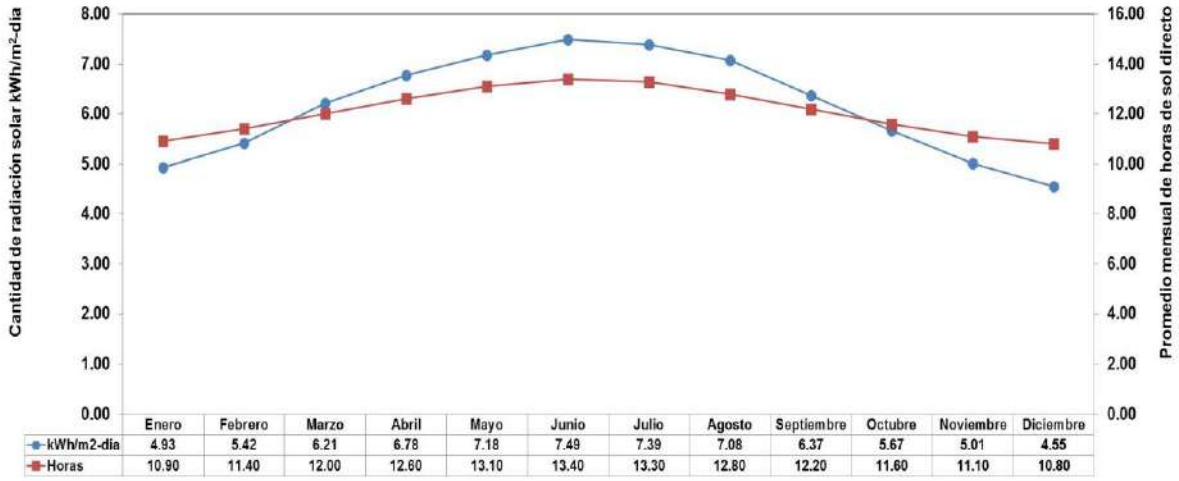
METODOLOGÍA

La información para el municipio de Tepic fue obtenida de la Atmospheric Science Data Center (ASDC, 2016) y de un promedio mensual de 22 años (1983-2005) de insolación incidente para cielo despejado en superficie horizontal medido en kWh/m^2-día. En este trabajo se emplean los datos de satélite como una herramienta de correlación con los obtenidos en superficie, que se obtendrán de Estación Solarimétrica No. 8 del Proyecto Inventario Nacional de la Radiación Solar del CEMIE-Sol. La estación fue instalada en el mes de marzo de 2016 y permitirá conocer los indicadores del potencial solar en la región, su viabilidad y su aprovechamiento como una fuente de energía sustentable.

RESULTADOS

El ASDC de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) reporta una estadística de 22 años, cubriendo el periodo 1983-2005. Esta información fue utilizada para mostrar el comportamiento promedio mensual de insolación en la ciudad de Tepic, Nayarit (Figura 1).

Los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero presentan valores entre 5.00 y 5.50 kWh/m^2-día; meses que corresponden a la mitad de las estaciones otoño e invierno. Así mismo, en el mes de marzo (transición invierno-primavera) comienza a observarse un incremento en los valores de insolación de 6.21 kWh/m^2-día. En este orden, entre los meses de abril y agosto se reportan rangos de 6.50 a 7.50 kWh/m^2-día. Estos resultados corresponden al lapso de primavera y parte del verano. Los meses de mayo, junio, julio y agosto se pueden identificar como los más significativos en la zona de estudio.



	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
kWh/m2-dia	4.93	5.42	6.21	6.78	7.18	7.49	7.39	7.08	6.37	5.67	5.01	4.55
Horas	10.90	11.40	12.00	12.60	13.10	13.40	13.30	12.80	12.20	11.60	11.10	10.80

Figura 1. Comportamiento promedio mensual de radiación solar y de horas de sol directo diario (Fuente: Elaboración propia con datos de ASDC, 2016)

En este contexto, a partir del mes de septiembre la cantidad de radiación solar muestra un ligero descenso (6.37 kWh/m^2-día); esta tendencia se mantiene durante el mes de octubre (5.67 kWh/m^2-día). Estos meses corresponden al período de verano-otoño. Cabe señalar, que el relieve del territorio interviene con el dominio de sombras que los sistemas montañosos propician. Finalmente, considerando el análisis mediante la insolación promedio anual para cielo despejado en Tepic, se reportan valores de entre 4.50 y 7.50 kWh/m^2-día.

En cuanto a los resultados más significativos de datos de promedio mensual de horas de Sol directo diario, se destaca que los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero presentan valores entre 10.80 y 11.40 horas, correspondiendo a la temporada seca y fría (otoño-invierno). Entre los meses de marzo y junio, se reportan un promedio de 12.00 horas de Sol directo diario que puede alcanzar hasta las 13.40 horas, siendo junio el mes más significativo. Considerando las estaciones del año astronómico, este período corresponde al ciclo de primavera y parte del verano. Así mismo, durante el mes de julio se registra un ligero descenso (13.30 horas) en relación al mes anterior, mientras que el mes de agosto se mantiene en 12.80 horas. Finalmente, los meses de septiembre y octubre reportan una reducción que alcanza las 12.20 y 11.60 horas de Sol. En este caso, el período mencionado se ubica en la estación de verano y principios del otoño.

Estudios reportan que los países ubicados en el Cinturón Solar Global (CSG) representan alrededor del 75% de la población mundial y el 40% de la demanda mundial de electricidad. No obstante, los elevados niveles de radiación solar, la capacidad instalada en estos países sólo representa el 9% a nivel global (Amelio, 2011). Un estudio en 2010 señala que los países ubicados en esta región (entre las latitudes de ± 35° respecto al ecuador) tienen un potencial solar que aún no ha sido eficazmente explotado (SPE, 2015).

México está ubicado en el CSG de la tierra. Tiene una alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo, los 5 kWh/m^2-día al norte del país es un ejemplo de ello. A nivel mundial, nuestro país presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía. Sin embargo, este potencial no se ha aprovechado ampliamente (CONUEE, 2015). Morton (2006) señala que el sistema Tierra-Atmósfera recibe en una hora más energía solar de lo que las actividades humanas consumen en un año. Gerhard Knies, expone que el Sol ofrece un punto de partida trascendente debido a que solo en seis horas, los desiertos reciben más energía en relación a lo que la humanidad consume en un año (DESERTEC Fundation, 2010).

Por otra parte, en el mes de marzo de 2016, la Universidad Autónoma de Nayarit participó en los trabajos de instalación y puesta en operación de la estación solar No. 8 del proyecto 16 del CEMIE-Sol “Inventario Nacional de Radiación Solar”. Este proyecto es de gran

relevancia a nivel nacional y sin precedente en cuanto a la forma de evaluar el recurso solar en México. Cada estación cuenta con protocolos de medición estandarizados y con información de datos radiacionales y meteorológicos obtenidos de instrumentos de alta precisión de la marca Kipp & Zonen como son: un seguidor solar - Solys 2, Piranómetros CMP11 para la medición de radiación global y difusa en el plano horizontal, y a la latitud del lugar, un Pirheliómetro para medición de radiación directa, un Pirgeómetro para medición de radiación infrarroja, un sensor quantum Licor para medición de radiación PAR, un fotómetro Licor para medir iluminancia y una estación climatológica con sensores de temperatura ambiente, precipitación pluvial, presión atmosférica, velocidad y dirección de viento, como se muestra en las imágenes de la figura 2.

Figura 2. Participación de estudiantes de la Universidad Autónoma de Nayarit en Instalación y puesta en marcha de la estación solar No. 8 del proyecto Inventario Nacional de Radiación Solar del CEMIE-Sol.

Se busca generar los mapas de radiación solar y modelos solares de nuestro país, mediante instrumentos de alta precisión y sensibilidad para la medición del recurso solar. Los resultados serán de gran importancia ya que de ahí depende la toma de decisiones en materia energética. En la estación solar local, ubicada en el campus de la UAN ya se está midiendo valores de radiación global, directa y difusa, infrarroja, iluminancia y radiación de actividad fotosintética; estos parámetros son importantes para detonar el aprovechamiento del recurso, la generación de políticas públicas, la planificación de estrategias de los sectores de energía, de salud y del agropecuario.

CONCLUSIONES

Los planes de desarrollo de energía solar son benéficos desde el punto de vista ambiental y específicos para cada región. Esta energía puede ser convertida, capturada y almacenada de manera constante para su uso haciendo a las regiones autosuficientes energéticamente.

Aprovechar el potencial solar en el territorio de acuerdo con sus condiciones meteorológicas, climatológicas, *la cantidad de radiación solar recibida* en la superficie y *las horas de Sol directo* que se registran diariamente, son aspectos que deben ser considerados.

De acuerdo a los resultados analizados, la región de Tepic recibe una cantidad significativa de radiación solar que oscila alrededor de 5 kWh/m^2-día y un promedio de 11 a 12 horas de Sol directo diario; razón suficiente para que se lleve a cabo su impulso y desarrollo.

La información derivada de este trabajo permite atraer la atención del gobierno, inversionistas y sociedad en general sobre el uso de la energía solar. La ciudad de Tepic, Nayarit, está experimentando un crecimiento urbano excesivo y desorganizando, además de, índices nocivos de contaminación atmosférica; una consecuencia del incremento del parque vehicular, del auge agrícola e industrial. Por ello, impulsar la utilización de la energía solar en viviendas, industrias, empresas y dependencias de gobierno, puede aportar soluciones encaminadas a mitigar los efectos de la contaminación ambiental y del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al fondo SENER-CONACYT y al CEMIE-Sol Proyecto 16 “Inventario Nacional de Radiación Solar” por la instalación de la estación solar No. 8 en el campus de la Universidad Autónoma de Nayarit.

REFERENCIAS

1. Aguilar L. (2010). Cultura política y participación electoral en elecciones locales de la ciudad de Tepic, Nayarit. Universidad Autónoma de Nayarit - Área de Ciencias Económicas y Administrativas - Unidad Académica de Economía - Maestría en Desarrollo Económico Local. Tesis de Grado. Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net. http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1329. Pp. 268. México.
2. Aguilar L. (2012). El miedo, la frustración y la indiferencia electoral y política en la ciudad de Tepic, Nayarit. Universidad de Guadalajara - Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas - Coordinación de Posgrado - Maestría en Dirección de Mercadotecnia. Tesis de grado. Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1332. Pp. 146. México.
3. Amelio M. (2011). Energía fotovoltaica: Presente y futuro. Revista de Energías Renovables. ANES, AC. Número 9 Año 3 Enero-Marzo 2011. Pp. 28.
4. Atmospheric Science Data Center (2016). NASA surface meteorology and solar energy – Location. http://eosweb.larc.nasa.gov.
5. Breiholz J. (2013). Desarrollo con energía. Proyectos de la cooperación entre México y Alemania. Editorial Deutsche Gesellschaft für- Programa energía sustentable en México. Pp. 19. México D.F.
6. CONUEE (2015). “Energía solar”. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. www.conuee.gob.mx.
7. Desertec foundation (2015). Opinión de Gerhald Knies, presidente de la fundación. http://www.desertec.org.
8. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Delimitación de Zonas Metropolitanas de México INEGI. www.inegi.gob.mx.

9. Sarah Messina, I. Paz Hernández Rosales, Claudia E. Saldaña Durán, J. Jesús Quiñones, P.K. Nair. (2014) Comparative study of system performance of two 2.4 kW grid connected PV installations in Tepic-Nayarit and Temixco-Morelos in México. *Energy Procedia*; 57:161–167.
10. ER (2015). Informe sobre la tendencia de inversión en Energía Renovable.
11. Instituto de Investigaciones Eléctricas – IIE (2013). Mapa de radiación solar diaria promedio anual de la República Mexicana. www.webosolar.com/2013/03.
12. Lewis N. & Nocera D. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. PNAS 103, 43:15729-15735.
13. Morton O. (2006). Solar energy: A new day dawning? Silicon Valley Sunrise. Nature, 443: 19-22.
14. Solar Power Europe (2015). European Photovoltaic Industry Association. Estudio de los países con gran potencial solar ubicados dentro del cinturón global solar en el año 2010. http://www.solarpowereurope.org.
15. Thomas U. et al. (2013). De lo Insostenible a lo Sustentable. Propuestas básicas, indicadores y casos de éxito para tomar decisiones sustentables en México. Editorial IEXE. ISBN: 978-607-95539-4-4.
16. Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol) http://cemiesol.mx/archivos/category/proyectos

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DESCENTRALIZADOS CERCANOS A LOS CENTROS DE CONSUMO

Francisco J. Madrid Rea
Posgrado en Humanidades, Estudios en Arquitectura. Departamento de Arquitectura y Diseño. Universidad de Sonora.
Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México
e-mail: javiermadrid1@gmail.com

Gabriela Mantilla Morales
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua,
Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales
Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México
e-mail: mantilla@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

Se realizó una investigación acerca del aprovechamiento de las aguas residuales mediante sistemas de tratamiento descentralizados y cercanos a los centros de consumo; específicamente para utilizar el efluente tratado en la irrigación de parques, jardines y camellones de la ciudad de Hermosillo, Sonora, para sustituir el uso de agua de primer uso por agua residual tratada. El análisis se enfoca en evaluar dos propuestas para la irrigación de un parque urbano. La primera revisa la ampliación de una línea morada ya existente, mientras que la segunda contempla un sistema de tratamiento compacto, ubicado en el sitio. Los puntos evaluados fueron: la ampliación de la línea morada, costos de bombeo y mantenimiento, la implementación de un sistema compacto, el costo energético, mantenimiento y operación; posibilidad de utilizarlos en el sitio de reúso y la instalación de un sistema solar fotovoltaico.

Se analizó un parque urbano y se consideraron los consumos anuales por metro cúbico (m^3) de los árboles adultos existentes. Para el cálculo de la derivación del agua residual procedente de los colectores cercanos al parque se utilizaron los datos promedio de habitantes por vivienda, una dotación de agua potable de 350 L/hab-día y una aportación del 75%. Por otro lado, se evaluó la aceptabilidad social de usuarios de áreas verdes regadas con agua residual tratada por medio de encuestas analíticas a una muestra determinada. La ampliación de la línea morada representa una erogación de $5,600,000, mientras que la instalación de un sistema compacto es de $1,187,650, el cual considera el uso de un sistema solar fotovoltaico, conformado por 14 paneles solares de 280 watts cada uno (generación promedio: 3.92 kwh/día; nivel de irradiación global de la ciudad Hermosillo de 5.5 kwh/m^2).

ABSTRACT

This research focuses on the reclamation of treated wastewater using decentralized treatment systems nearby to the consumption centers, specifically to take advantage of treated wastewater, for irrigation of parks and gardens in the city of Hermosillo, Sonora. The aim of this study focuses on the evaluation of two proposals for the irrigation of a local park.

The first one reviews the extension of a reclaimed water line. The second provides a wastewater treatment compact system which would be located in site. The evaluated points are: the extension of the reclaimed water line; pumping and maintenance costs, the implementation of a compact system, energy costs, maintenance, operation and the installation of a photovoltaic solar system.

An urban park was analyzed as a case study, the annual consumptions per cubic meter (m3) of existing mature trees were considered.

To calculate the derivation of wastewater from collectors nearby the park the average data of people per house were used, (an endowment of drinking water of 350 liters capita per day with a contribution of 75%).

In order to asses the social impact in using treated wastewater to irrigate public green zones a number of surveys were done.

The extension of the reclaimed water line represents an investment of $ 5,600,000 MXN, while installing a compact system of $ 1,187,650 MXN the latter includes installing a photovoltaic solar system consisting of 14 solar panels of 280 watts each one with an energy generation average of 3.92 kwh/day (global radiation level in Hermosillo: 5.5 kwh/ m2).

Palabras claves: Agua residual tratada, aprovechamiento de aguas residuales, reúso, riego de parques

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital, valioso y necesario para vivir. Cuando su disponibilidad disminuye se ven afectadas las comunidades, sus actividades cotidianas y su bienestar. El binomio conformado por agua y saneamiento es un indicador de la calidad de vida y salud de una población. El desarrollo y fortalecimiento de una comunidad urbana se evalúa por la calidad de sus servicios básicos e indispensables: agua

potable, alcantarillado, saneamiento, energía eléctrica, así como áreas de esparcimiento. Si bien existen variantes como extensión territorial, número y densidad de población, clima, entre otros, se vuelve complejo homologarlos para todos los asentamientos humanos.

Es difícil homologar estas variantes en México debido a su megadiversidad, por ejemplo, entre un municipio en el estado de Morelos y uno de Sonora. Por un lado, se presentan las variantes climatológicas, la ubicación, densidad de población, la precipitación pluvial, etcétera. Sin embargo, ambos estados convergen en un punto común, la falta de cultura en torno al cuidado del agua. En las zonas urbanas, la población está acostumbrada a obtener agua potable al abrir un grifo, por lo cual se considera que el recurso es de fácil accesibilidad y que debe ser subsidiado por el gobierno al ser una necesidad vital. Si bien el agua es un recurso natural renovable no es ilimitado.

Más del 50% del territorio nacional presenta un clima seco, muy seco o cálido (INEGI 2015), y se presenta en la parte del centro y norte del país. El promedio de la precipitación de todo el territorio mexicano es de 740 mm anuales (Atlas del agua en México 2015, CONAGUA), con valores extremos de menos de 100 mm en el desierto de Altar, Sonora, y valores máximos en la zona chiapaneca de hasta 2200 mm/año. El problema se centra en que la distribución del agua de lluvia no coincide con las necesidades de abastecimiento del país, lo cual conlleva a la sobreexplotación de acuíferos y en ocasiones se favorece la contaminación de los mismos por intrusión salina en las zonas costeras. Debido a esas cuestiones, el agua debe reutilizarse al máximo, sobre todo en zonas de baja disponibilidad.

En el Inventario Nacional de Plantas de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en operación de 2014, (CONAGUA, 2014) están censadas 2,892 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de las cuales, 2,237 están en operación, con una capacidad instalada de 151,883 l/s y un caudal tratado de 111,253.51 l/s, lo que representa una cobertura nacional de tratamiento del 52.7%. Sin embargo, existen 555 plantas que están fuera de operación (29% del total de las plantas instaladas) debido a distintos factores: falta de operación, mantenimiento, productividad, o porque los organismos operadores en los municipios no tienen los recursos económicos para reactivar su operación. No obstante, la demanda del agua residual tratada incrementará a medida que aumente la escasez y la falta de disponibilidad de las fuentes de abastecimiento de agua de primer uso. La reutilización de las aguas residuales tratadas está en función de la calidad del agua requerida para su reúso. El reutilizar el agua residual implica un costo que involucra su tratamiento y su conducción a los sitios de reúso. La reutilización es, en cierta manera, una reconciliación con la naturaleza, a manera de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades del futuro, para contribuir con el desarrollo sustentable.

SITIO DE ESTUDIO Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EXISTENTES

El sitio de estudio es la ciudad de Hermosillo, capital del Estado de Sonora, localizado en el norponiente de México, con coordenadas geográficas en el paralelo 29º05’47” de latitud norte, y en el meridiano 110º57’03” de longitud oeste. Se caracteriza por tener un clima muy seco. Los meses más extremos son junio, julio y agosto, con temperaturas máximas promedio de 39ºC, mínima promedio de 26ºC y humedad relativa promedio de 40%. En la época más cálida las temperaturas extremas rebasan los 46ºC.

La precipitación promedio anual es de 365.7mm, siendo los meses de julio, agosto y septiembre donde se presentan la mayor parte de las lluvias. La Ciudad de Hermosillo, a lo largo de su historia, ha tenido problemas de escasez de agua, principalmente por el periodo de estiaje prolongado desde hace quince años (CONAGUA, Monitor de Sequía en México, 2015). Para cubrir la demanda debido al incremento de la población, se han realizado diversos proyectos que permiten aumentar la disponibilidad de agua potable. Actualmente, una de sus principales fuentes de abastecimiento es el “Acueducto Independencia”, el segundo más grande de México, con una longitud de 135.045 km, y 48” de diámetro en la sección bajo presión, y variable entre 48” y 52” de diámetro en la sección por gravedad. Mediante esta línea se aprovechan las aguas embalsadas en la presa Plutarco Elías Calles, (“El novillo”), de la cual se extraen 75 Mm^3 /año.

Aguas residuales

De acuerdo con el organismo operador “Agua de Hermosillo”, la ciudad cuenta con 34 PTAR, de las cuales 32 pertenecen a la industria y dos al municipio. Sin embargo, el Inventario Nacional 2014 de la CONAGUA reporta cuatro PTAR para tratamiento de agua residual municipal (Tabla 1), e incluye dos plantas privadas. Existe una línea de conducción de agua residual tratada denominada “línea morada”, de aproximadamente 7,800m, procedente de las plantas “La Sauceda” y “Los Arroyos”, que distribuyen el efluente tratado en campos deportivos públicos, parques urbanos, áreas verdes y jardines, lo cual representa el 8.5% de las denominadas áreas verdes de la ciudad.

Tabla 1. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización de Tratamiento de Aguas Residuales en operación 2014

PTAR	$Q_{diseño}$ (l/s)	$Q_{operación}$ (l/s)	Proceso	Observaciones
Fracc. Los Lagos	80.0	60.0	Lodos activados	Riego de jardines. Áreas verdes, campo de golf.
La Sauceda	50.0	17.4	Lodos activados	Línea morada. Riego de áreas verdes y campos deportivos
Los Arroyos	113.0	38.4	Lodos activados	Línea morada. Riego de áreas verdes y campos deportivos
Unión Fenosa -CFE	110.0	85.0	Lodos activados	Reúso en procesos industriales
TOTAL	**353**	**200.8**		

A pesar de estos equipamientos urbanos, el volumen de agua residual tratada representa apenas el 8.5% del agua residual generada por la población. Actualmente, el resto de las aguas residuales se concentran en una caja repartidora y son vertidas sin ningún tipo de tratamiento al cuerpo receptor y confluye con el canal llamado “El Jagüey”, del ejido “La Yesca”. El agua residual cruda es utilizada en campos agrícolas para la irrigación de trigo, garbanzo, maíz y sorgo, y comprenden un área 3084 hectáreas. En la Figura 1 se presenta la gráfica del volumen de agua residual tratado a nivel municipal con referencia al volumen de agua residual generada. En la Figura 2 se muestra el porcentaje de agua residual tratada de la ciudad en relación con el promedio estatal y nacional, según el Programa de Gestión de Organismos Operadores 2014 (PIGOO). Se observa que las PTAR están subutilizadas y operan al 56.9% de su caudal de diseño, ya que la red de colectores no es suficiente para encauzar el agua residual a los sistemas de tratamiento actuales.

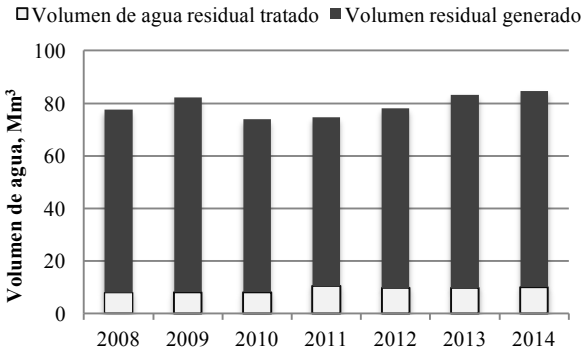


Figura 1. Agua residual generada y agua residual tratada

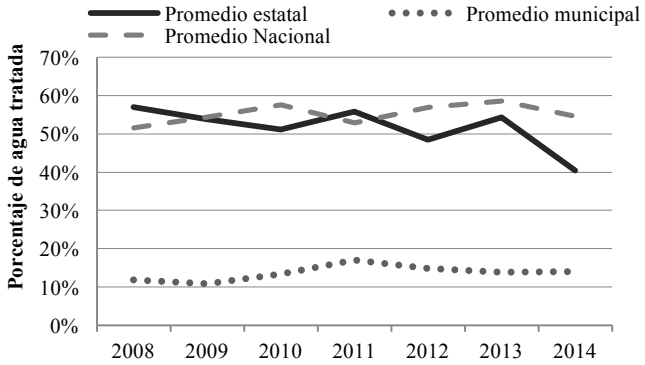


Figura 2. Agua residual tratada municipal, estatal y nacional

Para resolver esta situación, se encuentra en pruebas y estabilización la PTAR Hermosillo, que inició su construcción en el año 2012, con una capacidad total de diseño de 2,500 l/s. El gasto de operación en su etapa inicial es de 2,000 l/s, y se considera que en el año 2021 alcanzará el gasto de diseño. El efluente debe cumplir con la NOM-003 SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (con contacto directo, DBO_5 = 20 mg/l; SST=20 mg/l). Para solventar los costos de inversión, operación y mantenimiento de la PTAR, se publicó en la Ley de Ingresos y Presupuestos del ayuntamiento del municipio de Hermosillo para el ejercicio fiscal 2016 (artículo 51 bis), un aumento del 35% a la tarifa sobre el importe de consumo mensual de agua potable. Asimismo, se publicaron las tarifas para el de agua residual tratada ($5.10/m^3) y para el agua residual cruda ($9.26/m^3), ambos más impuestos. No obstante, en el artículo 50 de esta misma ley, se especifica que el usuario quedará exento de pago cuando implique un beneficio para la comunidad de la ciudad.

METODOLOGÍA

Se analizó el uso de agua residual tratada y potable para riego de campos deportivos, parques urbanos, camellones y jardines de la ciudad de Hermosillo. Para ello, se solicitó a la Coordinación de Infraestructura y Desarrollo Urbano (CIDUE), por medio de la Dirección de Parques y Jardines, el volumen de agua utilizada para estos fines (septiembre 2015 – febrero 2016). La información proporcionada no establece la proporción de volúmenes entre el agua potable y el agua residual tratada, por lo que no es factible determinar cuál es el ahorro de agua de primer uso. Adicionalmente, esta instancia proporcionó el inventario de parques urbanos y áreas verdes por sectores cardinales en la ciudad, donde se especifica su ubicación y superficie.

Mediante la selección de un parque urbano como caso de estudio se evaluaron dos posibilidades: la ampliación de una línea de agua residual tratada proveniente desde una PTAR existente para riego y la implementación de un sistema compacto de tratamiento de aguas residuales *in situ*. Se calculó el volumen de agua requerido para el riego de sus árboles, así como el caudal de los colectores cercanos para la derivación del agua residual a ser tratada. Para el cálculo del caudal, se utilizaron los datos del Panorama Sociodemográfico de Sonora (INEGI 2010), que especifica el promedio de número de habitantes por vivienda, la dotación de agua potable por habitante por día reportado por el organismo operador, y el porcentaje de aportación del agua residual generada. En ambos casos se comparó la factibilidad técnica y económica. Posteriormente, se evaluó la aceptabilidad social de los usuarios que pudieran estar en contacto directo con el agua residual tratada. El método para la recopilación de datos fue a través de encuestas analíticas con una muestra determinada.

ELEMENTOS CONSIDERADOS PARA LA PTAR E IRRIGACIÓN DEL PARQUE

Para evaluar la factibilidad del sistema de tratamiento de agua residual, se consideraron algunos aspectos determinantes como: tipo y cantidad de árboles existentes, consumo y requerimientos anuales de agua en m^3; ubicación de colectores sanitarios adyacentes y su caudal; niveles de terreno natural y la ubicación idónea de la PTAR.

Tipo de vegetación y requerimientos de agua

El parque urbano Pitic cuenta con una superficie 37,000 m^2, cuenta con canchas deportivas, una iglesia, estacionamiento y un auditorio, una cisterna de almacenamiento de 48 m^3 y una red de riego para árboles y césped. El área donde están esparcidos los árboles es de 12,201 m^2. En la Tabla 2 se presentan las características de la vegetación actual.

Tabla 2. Árboles y requerimientos de agua anuales.

Nombre común	Nombre científico	Tiempo de crecimiento	Requerimientos de agua anual (m^3)	Cantidad	Consumo total de agua anual (m^3)
Eucalipto	*Eucalyptus camaldulensis*	Lento	77.60	40	3,104.0
Olivo negro	*Bucida Buceras*	Medio	145.51	80	11,560.8
Palma washingtonia	*Washingtonia robusta*	Medio	8.38	20	167.6
Naranjo	*Citrus x sinensis*	Rápido	18.91	20	378.2
Mezquite	*Proposopis velutina*	Lento	27.94	40	1,117.6
Yucateco	*Ficus microcarpa*	Rápido	411.95	8	3,295.6
			Totales	218	19,623.80

El insumo anual total de agua requerida para el riego de los 218 árboles es 19,623.80 m^3 (53.76 m^3/día), esto es, 0.62 l/s. Para obtener ese gasto es importante analizar los caudales de los colectores adyacentes y determinar si es factible la derivación del colector del agua residual hacia la PTAR. En este análisis no se considera el riego del césped.

Colectores sanitarios adyacentes

Los colectores sanitarios son conductos de alcantarillado de la red pública de drenaje en el que se vierten las aguas residuales generadas por los usuarios. Para el cálculo del gasto medio de agua residual (Q_{MED}), se utiliza el valor de la dotación por habitante por día y una aportación del agua residual generada (MAPAS, 2016). La aportación es el volumen diario de agua residual descargado a la red de alcantarillado, establecido como un porcentaje del valor de la dotación de agua potable. En zonas habitacionales, se adopta un porcentaje del 75%, mientras que el 25 % restante, se consume antes de llegar a las atarjeas. La dotación especificada por el organismo operador para la ciudad de Hermosillo es de 350 l/hab-día. La ecuación para el cálculo consiste en la siguiente fórmula:

$$Q_{MED} = \frac{A_p * P}{86{,}400} \quad (1)$$

Donde:
Q_{MED} = Gasto medio de aguas residuales (l/s)
A_P = Aportación de aguas residuales
P = Población, en número de habitantes
86,400 = Número de segundos por día

Como el gasto se obtuvo mediante el requerimiento de agua para los árboles y la aportación es una constante, es necesario determinar el número de habitantes. Para ello despejamos los valores de la ecuación original quedando de la siguiente manera:

$$P = \frac{Q_{MED} \text{ x } 86400}{A_p} \qquad P = \frac{0.62 \text{ l/s x } 86400}{75\ \%} \qquad P = 714.2 \text{ habitantes}$$

Para obtener el número de habitantes, por medio de las viviendas colindantes con el parque se realizó una consulta al Panorama sociodemográfico de Sonora (INEGI, 2010), donde especifica 3.7 habitantes promedio por vivienda. Por lo tanto, la cantidad necesaria para garantizar el gasto necesario (Q_{MED}) es de al menos 193 viviendas.

Se consultaron los planos de alcantarillado y drenaje sanitario de la ciudad (Agua de Hermosillo, 2015), para confirmar la pendiente y el flujo del colector más cercano al sitio para la derivación del agua residual. En la Figura 3, se presenta el número de viviendas por manzana colindantes al parque, las líneas de alcantarillado, y atarjeas sanitarias.

Figura 3. Número de viviendas por manzana, líneas de alcantarillado sanitario y atarjeas

El total descargado en el colector principal adyacente al parque es de 242 viviendas en 20 manzanas analizadas, esto es equivalente a 895 habitantes. Si se considera la dotación de 350 l/hab-día, y una aportación del 75%, el gasto del colector principal es de 2.72 l/s de agua residual, suficiente para ser derivada, tratada y reutilizada en la irrigación del parque.

Sistema de tratamiento de aguas residuales

Existen diversos métodos para el tratamiento del agua residual, en algunos casos se combinan varios procesos, esto en función de la calidad del agua residual a tratar (influente), y la calidad de agua que se desea obtener (efluente). Para este caso en particular, el proceso seleccionado debe cumplir con la norma NOM-003-SEMARNAT-1997. Primero se pensó en un humedal; un proceso natural por su simplicidad de operación, bajo consumo energético o nulo, y una buena integración con el medio ambiente. Sin embargo, el principal

inconveniente es la superficie que requiere el sistema, de 4 a 5 m^2 por habitante, esto es un área de 2,880 a 3,600 m^2. Debido a esto, el método de depuración mediante humedales se vuelve inviable al ocupar una gran parte del parque.

Se seleccionó una propuesta mecanizada, por ser compacta en comparación con los sistemas convencionales al ocupar aproximadamente 25 m^2. El proceso consiste en un sistema aerobio de biofiltro sumergido con soporte de material sintético que cuenta con movimiento circular, para mantener en contacto homogéneo la biopelícula con el medio exterior aireado.

El consumo energético, según la ficha técnica, es de 21.31 kwh/día. Se analizó el costo de la energía eléctrica proporcionada por la CFE (Tarifa 6, Bombeo de aguas potables o negras, de servicio público) con una tarifa de $1.911 por kw/h y cargo fijo de $348.26. Para reducir el consumo de energía eléctrica del 100%, y pagar solo el cargo fijo, se consideró el uso de un sistema solar fotovoltaico (SSFV), conformado por 17 paneles solares de 280 watts cada uno, para ello se tomó en cuenta el nivel de irradiación de 6.0 kwh/día (Almanza S. et al., 1997), y una eficiencia del 75% del sistema, por lo tanto se obtiene como resultante un total generado de 21.42 kwh/día. Debido a que el método de depuración de las aguas residuales, es un proceso biológico, el sistema debe de trabajar de manera continua. Por otro lado, para determinar los costos de operación se consideró un sueldo de $6.75 diarios por operador, ocupándose del equipo durante 45 minutos diarios ($2,463.75/año). En el mantenimiento se consideró un costo anual de $9,800.00 (bombas sumergibles, soplador, filtro de arena y bombas de retrolavado) y un monto anual de $3,036.80 por desinfección.

RESULTADOS

En la Figura 4 se presentan los costos por operación y mantenimiento (O&M) en el uso de pipas, PTAR y línea morada. Para determinar los costos para el riego con pipas, se analizó la distancia recorrida desde la PTAR existente hacia el parque; el costo por diésel ($13.77/l) y un rendimiento, según Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE), de 2.5 km/l. Para la línea morada se estimaron los costos por bombeo hacia el parque. Se consideraron los costos con y sin erogación del agua residual cruda para el caso de la PTAR y del agua residual tratada para pipas y línea morada. En la Figura 5 se muestran los costos de inversión, el costo de la PTAR descentralizada fue proporcionado por el fabricante, mientras que el monto de inversión para el SSFV de $1,950 USD kw/instalado (SolarTech, 2016), fue proporcionado por un proveedor local de la ciudad de Hermosillo y para la ampliación de la línea morada (7 km de longitud), se estimó un costo de $800.00/ metro lineal.

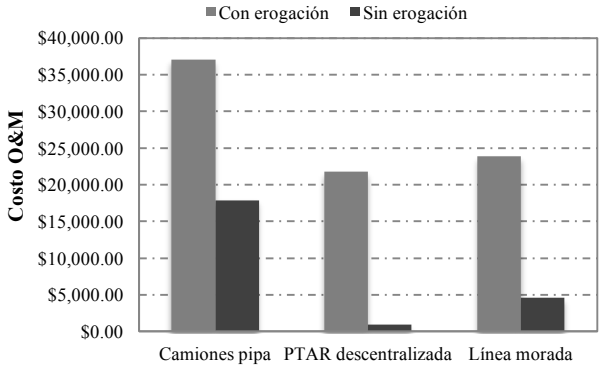


Figura 4. Costos de O&M mensual (pipas, PTAR y línea morada)

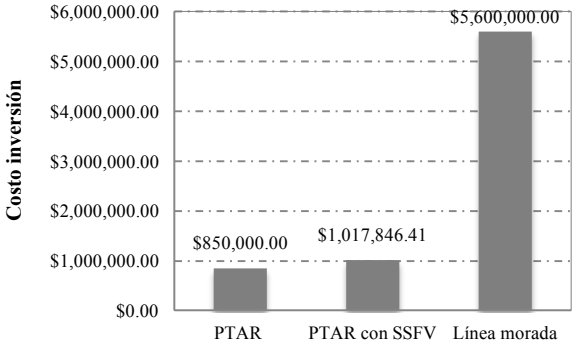


Figura 5. Costos de inversión: PTAR, PTAR con SSFV y línea morada

Al realizar el análisis comparativo del costo mensual por mantenimiento de la PTAR descentralizada se observa que es menor que las otras opciones, el se consideró el uso de un SSFV para reducir el consumo energético. En la Figura 6 se muestra la comparativa con y sin el uso del sistema SSFV, excluyendo la erogación por concepto de agua residual cruda. En la Figura 7 se observa un ahorro mensual, con SSFV, de $1,569.69, lo que representa un ahorro anual estimado de $18,836.28 y por consiguiente un retorno de inversión de 8.9 años.

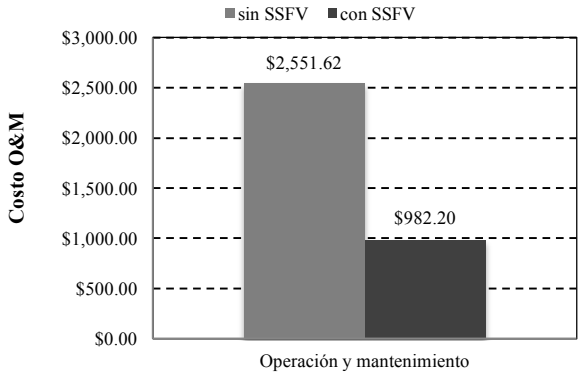


Figura 6. Costos O&M PTAR con SSFV y sin SSFV

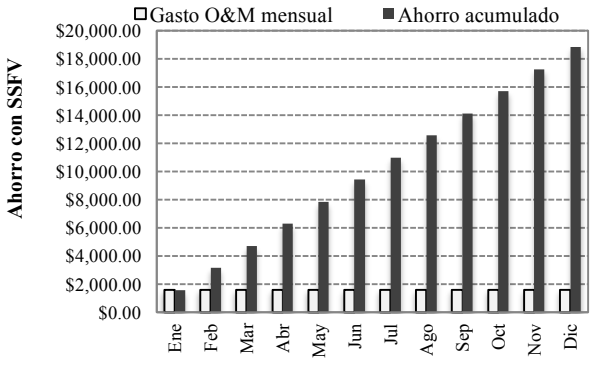


Figura 7. Ahorro anual con SSFV en la O&M de la PTAR

En la Figura 8 se muestra el porcentaje de aceptabilidad por parte de los usuarios, mientras que en la Figura 9 se presentan las observaciones con respecto a las condiciones principales que debe cumplir la PTAR.

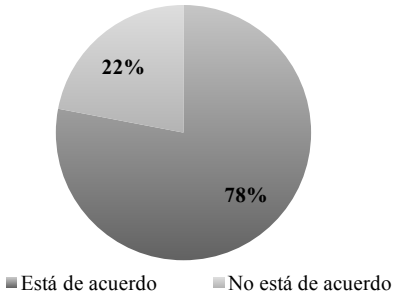


Figura 8. Aceptabilidad de los usuarios de una PTAR en el sitio

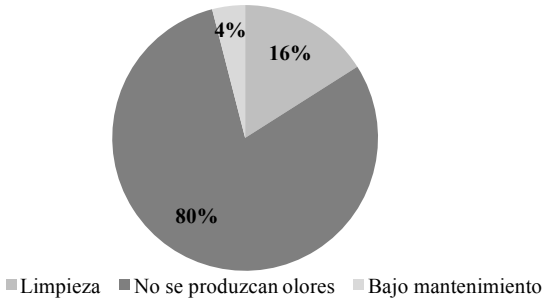


Figura 9. Observaciones de los usuarios de la PTAR

CONCLUSIONES

La elección de una PTAR centralizada o descentralizada está en función de diversos factores como: calidad del agua, colectores y redes de alcantarillado, ubicación del sistema y el reúso que se le quiera dar al efluente; ambas opciones tienen sus ventajas y desventajas. La ampliación de una línea morada proveniente de una PTAR existente, a pesar de ser una inversión mayor, puede ser una buena elección si se considera que se pueden hacer derivaciones para la irrigación de otras áreas cercanas al trayecto de la línea como: camellones, parques, campos deportivos, o bien en otros procesos de la industria y el comercio, como establecimientos de lavado de autos.

El costo de agua residual tratada ($5.10/$m^3$) comparado con las tarifas de agua potable para uso doméstico, $10.61/$m^3$; comercial y de servicios, $30.46/$m^3$; y para industria con altos consumos, $48.59/$m^3$; hace que el uso de agua residual tratada sea más viable para dos últimos rubros al sustituir el agua de primer uso.

En parques y jardines, un punto clave es la implementación de vegetación nativa que requiera poco riego o nulo, para que sea verdaderamente sustentable. Existen parques urbanos en zonas áridas con árboles que no son de la región y consumen un gran volumen de agua, esto provoca que se vuelva difícil mantenerlos cuando la disponibilidad de agua disminuye cada vez más. Los parques y jardines públicos en las ciudades con climas secos pueden ser de gran beneficio, principalmente para mitigar las islas de calor urbanas generadas por las grandes extensiones de asfalto y pavimento. Si bien la Organización Mundial de la Salud sugiere una superficie de 9m^2 de área verde por habitante, en climas áridos el concepto tradicional de "área verde" se vuelve insostenible y es difícil homologarlo con otras regiones. Por consiguiente, un área verde en zonas áridas puede definirse como un espacio urbano con vegetación endémica y que puede ser utilizado como zona de esparcimiento, recreación, ornato y que permite mejorar la calidad del aire, ser un sumidero de CO_2 y un espacio donde se pueda amortiguar el impacto producido por la edificación y urbanización.

REFERENCIAS

Agua de Hermosillo (2015) Catastro. Plano de drenaje sanitario. Plano de ubicación de plantas de tratamiento.

Agua de Hermosillo (2009). Manifestación de impacto ambiental, modalidad particular (2009). Planta municipal de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Almanza S. R., Cajigal R. E., Barrientos A. J. (1997). "Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana. Reportes de insolación de México". Southwest Technology Development Institute, NMSU, (1999), sitio web: http://www.econotecnia.com/radiacion-solar.html

Árbol 2000. Vivero de Hermosillo, Sonora (2016). Tabla de requerimientos de agua para árboles adultos.

COCEF (2011). Proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Hermosillo, Son., BD 2011-8.

CAPUFE (2016). Tabla de rendimientos de combustible para vehículos, maquinaria y conservación 2004, sitio web: http://www.capufe.gob.mx.

CONAGUA (2014). Inventario Nacional de Plantas municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

CONAGUA (2015). Servicio Meteorológico Nacional. Monitor de Sequía en México.

CONAGUA (2015). Atlas del agua en México. Subdirección General de Planeación.

CONAGUA (2016). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. 20 Alcantarillado Sanitario. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

CONAGUA (2015). Programa de tratamiento de aguas residuales (PROTAR). Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Gerencia de Programas Federales de Agua Potable y Saneamiento.

Congreso del Estado de Sonora (2016). Ley de Ingresos y Presupuestos de Hermosillo, Sonora para el Ejercicio Fiscal 2016.

Domínguez, J., Martínez, D., Palacios, A., Peña, A. (2013). El monitoreo social del derecho humano al agua y saneamiento. Colegio de México A.C., México.

García, J., Morato, J., Bayona, J. (2004). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos, Barcelona, España

IMTA (2016). Programa de indicadores de gestión de organismos operadores, México, sitio web: http://www.pigoo.gob.mx.

INEGI (2016). Panorama sociodemográfico de Sonora 2010, sitio web: http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/.

Moeller Chávez et al. (2011). Tratamiento de aguas residuales. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Normas Oficiales Mexicanas (2013). CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

USO DEL TUNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA EL DISEÑO AERODINAMICO EN LOS EDIFICIOS

José María Velázquez Soto[1], Alfonso Rivas Cruces[1], Verónica Huerta Velázquez[1].
[1]Departamento de Medio Ambiente, División de Ciencias y Artes para el Diseño
Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Colonia Reynosa Tamaulipas,
Delegación Azcapotzalco, Ciudad de México C.P. 02200. Teléfono 01 55 5318 9000
jmvs@correo.azc.uam.mx, arc@correo.azc.uam.mx, vhv@correo.azc.uam.mx,

RESUMEN

El uso del túnel de viento de baja velocidad es empleado en disciplinas como la ingeniería civil y la arquitectura, para visualizar y cuantificar la interacción del flujo de aire en las construcciones. Su objetivo es producir una corriente de aire a través de la sección de pruebas del túnel, a fin de observar los diferentes fenómenos que se producen como resultado del movimiento del fluido y su interacción con un objeto sólido. El túnel de viento del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, es una instalación de circuito abierto y de baja velocidad, equipado con 4 ventiladores centrífugos de presión media, controlados por un variador de frecuencias que permite cambiar la velocidad del fluido, obteniendo diferentes escenarios dentro de la zona de pruebas.

En este trabajo, se propone una metodología de medición, visualización e interpretación de resultados para el estudio aerodinámico en los edificios, a través del uso del túnel de viento. La metodología incluye la preparación de modelos con semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Se aborda la preparación previa de la instalación y del equipo de medición. Así mismo, se plantea la técnica de visualización con iluminación láser como parte de la metodología, a fin de obtener información cualitativa y cuantitativa del fenómeno. El trabajo concluye con una serie de recomendaciones para el uso del túnel de viento, apoyado por estándares internacionales, acentuando la importancia del estudio del viento para el diseño sostenible en las edificaciones.

ABSTRACT

The use of the wind tunnel low speed is used in disciplines such as civil engineering and architecture, to visualize and quantify the interaction of airflow in buildings. Its objective is to produce air flow through the test section of tunnel to observe the various phenomena that occur as a result of fluid motion and its interaction with a solid object. The wind tunnel testing of the Autonomous Metropolitan University, is an installation of open circuit and low speed, equipped with 4 centrifugal fans medium pressure, controlled by a frequency shifter that allows changing the fluid velocity obtaining different scenarios within the test area. In this paper, a methodology for measuring, visualization and interpretation of results for the aerodynamic study in buildings is proposed, through the use of the wind tunnel. The methodology includes the preparation of models with geometric, kinematic and dynamic similarity. The prior preparation of installation and measurement equipment is addressed. The visualization technique laser illumination as part of the methodology is proposed, in order to obtain qualitative and quantitative information phenomenon. The paper concludes with a series of recommendations for the use of the wind tunnel, supported by international standards, emphasizing the importance of studying the wind for sustainable design in building

INTRODUCCION

La utilización del túnel de viento como herramienta de diseño en las edificaciones permite realizar numerosos estudios. Inicialmente esta herramienta fue utilizada en aeronáutica. Hoy en día el túnel de viento o túnel aerodinámico es utilizado en diferentes áreas de conocimiento, como por ejemplo en balística, automovilismo, turbinas de viento, deportes, paracaidismo, puentes y edificios. Uno de los primeros túneles de viento fue diseñado por los hermanos Wright en 1901. Alemania por su parte desarrollo durante la Segunda Guerra Mundial un túnel de viento natural atreves de túneles subterráneos.

Experimentos realizados por el inglés Osborn Reynolds, demostraba cómo se comporta el flujo de aire en un modelo solido a escala lo cual marco el inicio de la comprensión científica de los movimientos de los fluidos y una compresión mayor de los fenómenos de turbulencia. El número de Reynolds o simplemente “Re” es un número adimensional que es usado en

mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido y se describe por tres tipos de flujo: Laminar, transitorio y turbulento.

En el campo de la arquitectura a comienzos del siglo XX Gustavo Eiffel construyó una máquina en el segundo nivel de la torre que lleva su nombre. Se trataba de dejar caer, de forma guiada, el objeto a ensayar y registrar la fuerza que oponía al avance en la corriente de aire inducida por su caída. El registro de la fuerza y el tiempo se tomaba de forma simultánea en el cilindro que sujetaba el objeto a ensayar y en otro similar que no llevaba ningún objeto. Este segundo cilindro servía de referencia para las medidas del primero.

Figura 1: Gustavo Eiffel y el túnel de viento diseñado por el mismo

Actualmente muchos edificios altos son sometidos en pruebas de túnel de viento, también es utilizado en la arquitectura para estudiar la ventilación natural a través del análisis de la geometría la posición y forma de las ventanas del edificio. El túnel de viento es una herramienta confiable para medir las variables antes mencionadas.

JUSTIFICACION

En la normatividad el túnel de viento en los edificios con formas no habituales o edificios altos es obligatorio México. Las Normas Técnicas Complementarias de la CDMX menciona lo siguiente en relación al viento y los edificios *"Deberán revisarse la seguridad de la estructura principal ante el efecto de las fuerzas que se generan por las presiones (empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la construcción expuestas al mismo y que son transmitidas al sistema estructural. La revisión deberá considerar la acción estática del viento y la dinámica cuando la estructura sea sensible a estos efectos. Deberá realizarse, además, un diseño local de los elementos particulares directamente expuestos a la acción del viento, tanto los que forman parte del sistema estructural, tales como cuerdas y diagonales de estructuras triangulares expuestas al viento, como los que constituyen sólo un revestimiento (láminas de cubierta y elementos de fachada y vidrio*. A su vez sugiere el uso de túnel de viento cuando: *"En construcciones de forma geométrica poco usual y con características que las hagan particularmente sensibles a los efectos de viento, el cálculo de dichos efectos se basará en resultados de estudios en túnel de viento. Podrán tomarse como base resultados existentes de ensayes realizados en modelos de construcciones de características semejantes. Cuando no se cuente con estos resultados o cuando se trate de construcciones de particular importancia, deberá recurrirse a estudios de túnel de viento en modelos de la construcción misma."*[1]

En México existen algunas instituciones que cuentan con túneles de viento, tal es el caso del Instituto de ingeniería de la UNAM. Su túnel de viento cuenta con una sección de pruebas de 0.80x1.20 m y longitud de 2.40 m, donde se producen velocidades de hasta 150 Km/h. Por otra parte el Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología cuenta con un túnel de viento de fabricación reciente, se trata de un túnel de circuito cerrado, que permite tener un control adecuado del flujo (velocidad, presión y temperatura). El ventilador generará vientos con una velocidad máxima de 100 km/h. En condiciones experimentales llega a simular los efectos turbulentos de vientos equivalentes a un huracán de categoría 4. Cuenta con dos secciones de pruebas. La primera tiene dos mesas giratorias separadas entre sí 14 m, gracias a lo cual está considerado entre los 10 de mayor capacidad en el mundo en su tipo.

[1] Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento. Ciudad de México.

Este túnel de viento es utilizado para:

- Mejorar la confiabilidad del diseño estructural.
- Diseñar dispositivos para mitigar los efectos del viento.
- Determinar cargas estáticas y dinámicas del viento sobre puentes, edificios, chimeneas y otras estructuras civiles singulares.
- Estudiar efectos del viento en diversos elementos constructivos y arquitectónicos como fachadas, ventanas, adhesivos, etc.
- Análisis somero de problemas derivados del transporte de masas gaseosas contaminantes.
- Determinación de las condiciones de viento (en flujos) sobre terrenos complejos.
- Elaboración de normas.

Por su parte la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco cuenta con un túnel de viento diseñado especialmente para el campo de la arquitectura, se trata de es una instalación de circuito abierto de baja velocidad que permite simular el viento que incide sobre un objeto bajo condiciones controladas. Cuenta con 4 ventiladores de 5 caballos de fuerza cada uno, mismos que se encuentran dentro del túnel de viento, controlados por medio de un variador de frecuencias que inducen el movimiento del volumen de aire, succionándolo hacia la entrada del túnel e induce la entrada de aire hacia la zona de la campana, para después dirigirse hacia los tubos estabilizadores que tienen la función de disminuir la turbulencia y estabilizar el aire cuando este atraviesa por la zona de pruebas una vez que recorre esta distancia continua su dirección hacia los ventiladores y posteriormente es enviado por un ducto vertical para después liberarlo a la atmosfera a través de la salida del túnel.

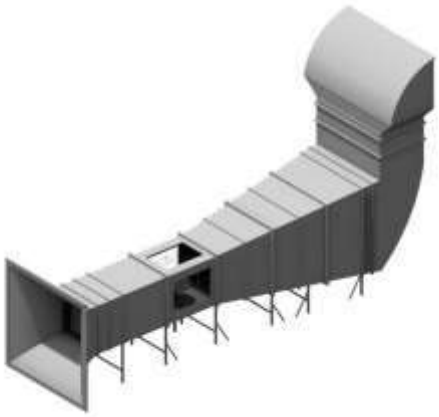


Figura 2. Túnel aerodinámico del laboratorio de Diseño Bioclimático de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

METODOLOGIA DE USO DEL TUNDEL DE VIENTO Y CONDICIONES GENERALES PARA LOS EXPERIMENTOS DE MODELOS A ESCALA

Conocer el perfil y la magnitud de velocidad en diferentes puntos dentro de la zona de pruebas es fundamental y se deben llevar mediciones antes de comenzar con los experimentos para hacer una correlación entre la frecuencia y la velocidad del aire dentro de la zona de pruebas, este es el primer punto que se debe de conocer antes de realizar las pruebas con modelos a escala. El objetivo de las mediciones es conocer los perfiles de velocidad que se generan en la zona en donde se colocara la maqueta.

Las mediciones dentro del túnel pueden ser de dos formas cuantitativa y cualitativa. La primera es obtenida mediante sensores de presión que son conectados al modelo a escala. La segunda se obtiene mediante técnicas de visualización.

CARACTERISTICAS GENERALES PARA MEDICIONES EN TUNEL DE VIENTO

Los siguientes puntos son fundamentales para lograr que los experimentos realizados en el túnel de viento sean correctamente reproducibles y confiables.

- El horario de experimentación debe ser promediado con el registro de las condiciones ambientales del sitio utilizando un instrumento de medición climática. Colocando el aparato en un lugar libre de posibles interferencias.
- Definición de fechas y horarios de uso del túnel de viento a partir de las condiciones climatológicas históricas obtenidas de las mediciones climáticas.

- Las tareas de mantenimiento en el túnel aerodinámico deben ser exhaustivas antes de realizar los experimentos con la finalidad de impedir mediciones erróneas por obstáculos, partículas suspendidas y elementos que interfieran en las mediciones en el túnel.
- Los instrumentos deben estar calibrados y revisados antes de la medición.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN TÚNELES AERODINÁMICO

La Asociación de Ingenieros Mecánicos Americana (ASME) y la Asociación de estándares Canadiense (CSA) Sugieren las siguientes recomendaciones para el control de la calidad de los datos en ensayos utilizando túneles de viento:

- Las propiedades del flujo de aire en escala real son las mismas que en el modelo a escala.
- La representación de los modelos y procesos físicos afectados por el viento se ajustan a la escala y se lleva a cabo un procedimiento de semejanza a partir de los criterios de semejanza antes mencionados.
- Los instrumentos utilizados en los experimentos deberán estar calibrados y en perfectas condiciones.
- Los programas informáticos para la adquisición de datos deberán tener un rendimiento fiable y preciso.
- Las interpretaciones teóricas corresponden con los reflejados en la realidad del problema.
- Se deberán tomar medidas para minimizar los errores humanos en todos los aspectos del estudio y la información obtenida es completamente entendida por el usuario.

Según la Sociedad de Ingenieros Civiles Americana en su División Aeroespacial recomienda que en todas las fases de las pruebas en donde se utilice el túnel aerodinámico se debe procurar los siguientes aspectos:

- Fechas y horarios
- Se deberán definir las tareas a realizar, el establecimiento de los experimentos, los programas en ejecución, el control de instalaciones, programación y control de la documentación.
- Mantenimiento del túnel aerodinámico en buenas condiciones.
- Identificación y estado de los equipos y la calibración de los instrumentos.
- Interrupciones y horario de funcionamiento de los instrumentos.
- Programas informáticos utilizados, manejo de archivos de todos los experimentos así como de los resultados.

IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES ERRORES EN LAS MEDICIONES EN UN TÚNEL AERODINÁMICO

- En la visualización se deben grafican los resultados de las mediciones y puede conducir rápidamente al reconocimiento de resultados anómalos en los puntos de medición.
- Las comparaciones de los resultados experimentales con la teoría deben mantener coherencia.
- Mantener calibrados y en perfectas condiciones los instrumentos de medición llevando una bitácora de incidentes al llevar a cabo los experimentos.
- Mantener un registro de las actividades llevadas a cabo en la utilización con el túnel de viento.

MODELOS A ESCALA DENTRO DEL TÚNEL AERODINÁMICO

Los modelos a escala se emplean para ahorrar recursos, ya que es mucho más económico construir modelos a escala que fabricar el prototipo a escala real. Para llevar a cabo el escalamiento se utilizan criterios de semejanza los cuales son necesarios para tener resultados precisos. Existen tres niveles de semejanza que se deben satisfacer antes de afirmar que un modelo es completamente semejante. La semejanza dinámica es la fuerza sobre el modelo y el prototipo debe guardar la misma proporción. La semejanza geométrica impondrá que todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tengan la misma relación de escala. La semejanza cinemática impondrá que dos partículas homólogas habrán de pasar por puntos homólogos en instantes homólogos.

MEDICIÓN DE VELOCIDAD CON TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

Para realizar un estudio de caídas de presión se cuenta con un gabinete con tres transductores de presión[2] digital, con una fuente de poder cada uno y una tarjeta de adquisición de datos que manda la señal a través de un cable USB a la computadora. Estos transductores permiten medir la velocidad del flujo de aire en un punto determinado cuando se utiliza un instrumento de medición por ejemplo, un tubo Pitot L[3], conectado a través de dos puertos integrados a cada uno de los transductores.

TECNICAS DE VISUALIZACIÓN

Existen diversas técnicas de visualización del flujo de aire dentro de la cámara de ensayos de túneles de viento. En general se utiliza la que mejor describa el comportamiento del movimiento del flujo fluido. La investigación del flujo de los líquidos

---

[2] Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica.

[3] El tubo de Pitot se utiliza para calcular la presión total, también denominada presión de estancamiento, presión remanente o presión de remanso que es la suma de la presión estática y de la presión dinámica.

tiene aplicaciones en la ingeniería naval para el diseño de buques, también es ampliamente utilizado en la ingeniería civil en el diseño de puentes grandes edificios y estructuras en general (Frits H. Post, 1993). En todos los tipos de investigación de flujo de fluidos, la visualización es una cuestión clave.

Las técnicas de visualización experimental del flujo de fluidos son utilizadas por varias razones:

I. Para tener una idea del flujo de fluidos en torno a un modelo a escala a partir de uno real, sin la necesidad de realizar ningún tipo de cálculos.
II. Desarrollo de nuevas mejores teorías de la experimentación con flujos de fluidos.
III. Investigación de nuevas teorías aplicadas a modelos experimentales

La técnica experimental de visualización según la literatura es ampliamente utilizada, sin embargo también existen algunos inconvenientes en la utilización de estas técnicas:

I. El flujo de fluido a menudo se ve afectada por la técnica experimental y no todos los fenómenos del flujo de fluido pueden ser visualizados con la técnica experimental.
II. La construcción de modelos físicos a escala y la utilización de equipos experimentales como los son los túneles de viento son de costo elevado y el tiempo necesario para llevar a cabo los experimentos regularmente también es elevado.

Existen diferentes tipos de técnicas de visualización en túneles de viento las cuales se mencionan a continuación:

TRAZADORES

Los trazadores son aditivos agregados al fluido que permiten observar los patrones de flujo. Un trazador efectivo no altera el patrón del flujo, sino que es transportado por el flujo y es fácil de observar. Es importante que los trazadores no se vean afectados por fuerzas gravitacionales centrifugas que produzcan diferencias de densidad. Además su tamaño deberá ser por lo menos de un orden de magnitud más pequeño que la escala de longitud del campo de flujo.

BURBUJAS DE HIDROGENO

En general, se utilizan burbujas de hidrogeno como trazador puesto que son más pequeñas que las de oxígeno, y se forman muchas más. Las burbujas son transportadas por el campo de flujo.

VISUALIZACIÓN DE FLUJO CON CAOLÍN

Es una mezcla de aceite y tinte que se puede aplicar a la superficie del modelo. Cuando el flujo de aire hace contacto con el modelo, el aceite y partículas de colorante se mueven lentamente en la dirección de la corriente local. Para mejorar la visibilidad del flujo de aceite, un tinte ultravioleta puede ser usado de tal manera que cuando se ilumina con una luz ultravioleta el tinte fluorescente pueda mostrar claramente el patrón de flujo.

PARTICULAS DE AIRE

Las partículas de aire pueden ser introducidas como burbujas de helio. Con la selección apropiada de una mezcla de jabón y agua, se producen burbujas de jabón llenas de helio que no flotan; es posible producir diámetros de burbuja del orden de 4mm.

VISUALIZACIÓN CON HUMO

Es una de las técnicas de visualización más empleadas en túneles de viento se trata de una técnica de inyección es el llamado método del hilo humeante, donde el humo es generado vaporizando aceite con un hilo fino extremadamente calentado. El humo también puede ser emitido por tubo de diámetro pequeño para crear una o más líneas instantáneas (Potter and Wiggert, 2002).

ILUMINACION LASER

La técnica de visualización con humo e iluminación laser alrededor de los objetos sólidos dentro del túnel de viento posibilita una descripción cualitativa del comportamiento del flujo de aire, facilitando la realización y estudio de posibles soluciones de diseño. Esta técnica es muy útil para observar el movimiento de los fluidos. Permite estudiar el movimiento del flujo de aire de manera sencilla ya que la naturaleza del flujo es tridimensional y por lo tanto es complicado analizar. Con el uso de esta técnica es posible analizar diferentes planos en forma de barrido horizontal y vertical en el modelo a escala.

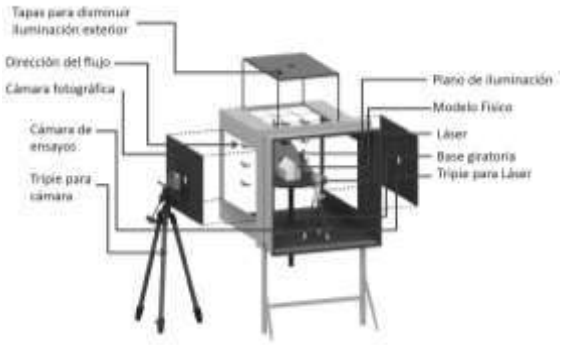


Figura 3. Ubicación de los instrumentos dentro de la zona de pruebas del túnel de viento

La figura 3 muestra la colocación de los instrumentos para la realización de la visualización del flujo de aire utilizando la técnica de visualización con iluminación laser y la generación de humo. Se colocaron tres tapas solidas en lugar de las ventanas del túnel de viento para reducir la iluminación al interior de la zona de pruebas para optimizar la visualización mediante la iluminación de láser. La figura 4 muestra el resultado de visualización utilizado la técnica de iluminación laser. En ella se puede observar los planos de análisis los cuales atraviesan el modelo haciendo posible analizar cada con detalle el movimiento del flujo de aire dentro y fuera del modelo a escala. Esta técnica es recomendable para realizar estudios por planos y no de forma tridimensional ya que de esta forma se vuelve más sencillo analizar el flujo de aire en los modelos.

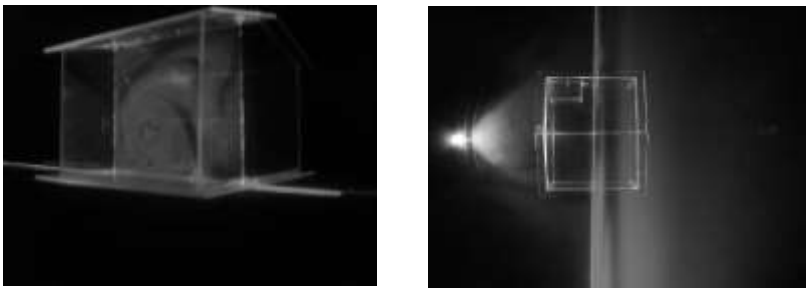


Figura 4. Visualización mediante la técnica de iluminación laser e iluminación Led

CONCLUSIONES

El uso del túnel de viento para estudiar la aerodinámica en las edificaciones es fundamental, ya que permite conocer no solo el tipo y forma de la estructura, también ayuda a predecir cómo será la ventilación de un edificio a través del diseño de la geometría, la posición y dimensión de las aberturas y obstáculos alrededor del edificio. El túnel de viento sigue siendo la herramienta más confiable para el estudio del flujo de aire en las edificaciones. Actualmente con el desarrollo de la tecnología han surgido herramientas computacionales que calculan a partir de datos promediados el movimiento del flujo de fluidos. Sin embargo los experimentos físicos siguen siendo los más confiables debido a la alta complejidad de la naturaleza tridimensional de la turbulencia.

El método cualitativo con la técnica visualización con iluminación laser permite observar claramente el movimiento del flujo alrededor y dentro de una maqueta de estudio, mediante secciones o planos de análisis. Las técnicas de medición y visualización son variadas, el uso de cada una de ellas dependerá del investigador o diseñador ya que cada una de ellas arrojan información relevante que ayudan a comprender cada vez más la naturaleza del flujo de aire y con ello contribuir al diseño de edificaciones más sustentables.

REFERENCIAS

BAKER, J. P., MAYDA, E. A. & VAN DAM, C. P. 2006. Experimental analysis of thick blunt trailing-edge wind turbine airfoils. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme, 128, 422-431.

BOMPHREY, R. J., LAWSON, N. J., HARDING, N. J., TAYLOR, G. K. & THOMAS, A. L. R. 2005. The aerodynamics of Manduca sexta: digital particle image velocimetry analysis of the leading-edge vortex. Journal of Experimental Biology, 208, 1079-1094.

CHENG, S. Y., TSUBOKURA, M., NAKASHIMA, T., NOUZAWA, T. & OKADA, Y. 2011. A numerical analysis of transient flow past road vehicles subjected to pitching oscillation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 511-522.

CHILDS, P. R. N. 2010. Rotating Flow, Estados Unidos, Elsevier Science.

DRUCKER, E. G. & LAUDER, G. V. 2000. A hydrodynamic analysis of fish swimming speed: Wake structure and locomotor force in slow and fast labriform swimmers. Journal of Experimental Biology, 203, 2379-2393.

DUARTE, C. A. & NIÑO, J. R. 2007. Introducción a la Mecánica de Fluidos, Universidad Nacional de Colombia.

DURGIN, F. H. 1992. Pedestrian Level Wind Studies at the Wright-Brothers-Facility. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 44, 2253-2264.

ECKERLE, W. A. & AWAD, J. K. 1991. Effect of Freestream Velocity on the 3-Dimensional Separated Flow Region in Front of a Cylinder. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 113, 37-44.

ENGINEERS, A. S. O. C. 1999. Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures, Estados Unidos, Amer Society of Civil Engineers.

FRANZINI, J. B. & FINNEMORE, E. J. 1999. Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería, España, McGraw-Hill.

FRITS H. POST, T. V. W. 1993. Fluid Flow Visualization. Springer.

LESIEUR, M. 2008. Turbulence in fluid, Dordrecht, Springer.

MORA, R. B. 2005. Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica. Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

MOTT, R. L. 2006. Mecánica de fluidos, Prentice Hall

NADAL, I. S. & MUÑUZURI, V. P. 2006. Fundamentos de meteorología, Universidad de Santiago de Compostela.

ONERA Fotografía tomada dentro de un túnel aerodinámico usando la técnica de PIV visualizado en un plano mediante iluminación láser.

PETROSINO, F., MINGIONE, G., CAROZZA, A., GILARDONI, T. & D'AGOSTINI, G. 2011. Ice Accretion Model on Multi-Element Airfoil. Journal of Aircraft, 48, 1913-1920.

POTTER, M. C. & WIGGERT, D. C. 2002. Mecánica de fluidos, México, Thomson.

ROBERT W. FOX, A. T. M., PHILIP J. PRITCHARD 1989 Introducción a la Mecánica de Fluidos,
Nueva Editorial Interamericana.

SMITS, A. J. 2003. Mecánica de fluidos:una introducción física, Alfa Omega

SPACE SHUTTLE COLUMBIA, R. Caminos de Von Kármán fotografiados desde el espacio desarrollados en la atmosfera de la Tierra. .

TOMAZIC, T., PLEVNIK, V., VEBLE, G., TOMAZIC, J., POPIT, F., KOLAR, S., KIKELJ, R., LANGELAAN, J. W. & MILES, K. 2011. Pipistrel Taurus G4: on Creation and Evolution of the Winning Aeroplane of NASA Green Flight Challenge 2011. Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57, 869-878.

UPP, E. L. 2002. Fluid Flow Measurement A practical guide to accurate flow measurement, Woburn, Gulf Professional Publishing.

WARK, K., WARNER, C. F. & DAVIS, W. T. 1998. Air Pollution Prevention and Control, Addison Wesley.

WIKIMEDIA. 2012. Principio de Bernoulli [Online]. Fundación Wikimedia, Inc. [Accessed].

ZHU, Z. W., GU, M. & CHEN, Z. Q. 2007. Wind tunnel and CFD study on identification of flutter derivatives of a long-span self-anchored suspension bridge. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22, 541-554.

VELAZQUEZ, J.M. 2012 Análisis Físico y Numérico del Comportamiento del Viento en un Edificio. UAM, México

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES Y ESTUDIO DE CORROSIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Areli Jazmín Melquiades Cruz, Energías Renovables Calidad y Ahorro de la Energía, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 4481136885, cruzareli61@gmail.com

Martha Herrera Velázquez, Energías Renovables Calidad y Ahorro de la Energía, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 7731119208, herrera.velazquez.martha98@gmail.com

Andrés Dector, Ingeniería en tecnología Industriales. (ITM, IM & ITA). Universidad Politécnica de Querétaro. Carretera estatal 420 S/N, El Rosario, El Marqués, Querétaro. C.P. 76240, México, 4423172801, andres.dector@upq.edu.mx

Ángel Marroquín de Jesús, Energías Renovables, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 4271657455, a_marroquin2003@yahoo.com.mx

RESUMEN

El biodiesel se produce a partir de una reacción química en donde se mezcla aceite vegetal con metanol en presencia de un catalizador. Es usado principalmente en motores convencionales de combustión interna, reduciendo grandes cantidades de hidrocarburos no quemados. El objetivo de este proyecto fue obtener biodiesel a partir de aceite vegetal tal como aceite de girasol. El biodiesel se caracterizó por medio de la medición de la densidad, pH y la técnica de espectrofotometría de infrarrojo, para esto se tomó como patrón las propiedades del diésel de Pemex®. Además, para verificar la corrosión que provoca este biodiesel en los motores se realizó un análisis en probetas de hierro gris extraídas directamente de la cámara de combustión de un motor diésel Navistar® mediante sumersión en biodiesel, diésel y mezclas de diésel / biodiesel basados en la norma ASTM 1045, con un periodo de tiempo de 30 días a temperatura ambiente.

ABSTRACT

Biodiesel is produced from a chemical reaction wherein vegetable oil is mixed with methanol in the presence of a catalyst is mainly used in conventional internal combustion engines, reducing large amounts of unburned hydrocarbons. The objective of this project was to obtain biodiesel from vegetable oil such as sunflower oil. It was characterized by the density measurement and infrared spectrophotometry for this pattern taken as the properties of diesel Pemex®. In addition, an analysis to verify corrosion causing engine is performing an analysis on specimens of gray iron which are extracted from the combustion chamber of a Navistar® diesel engine, immersed in biodiesel with a time period of 30 days to room temperature.

INTRODUCCIÓN

Un motor de combustión interna basa su funcionamiento en el quemado de una mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro con el fin de incrementar la presión y generar con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón.

La mayoría de los motores de combustión interna trabajan con base en un ciclo de cuatro tiempos, cuyo principio es el ciclo termodinámico de Otto (con combustible gasolina o gas) y el ciclo termodinámico de Diésel (con combustible A.C.P.M.). Por lo tanto, su eficiencia está basada en la variación de la temperatura tanto en el proceso de compresión isentrópico, como en el calentamiento a volumen (Otto) o presión constante (Diésel).

El alto costo del petróleo y la tendencia de que éste siga aumentando de precio, así como la disminución de sus reservas, han provocado que la seguridad energética a nivel mundial se vea afectada. Por otra parte, se encuentra la constante preocupación por el calentamiento global, causado en gran medida por la liberación de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles tal como la gasolina o el diésel. Como consecuencia, es cada vez mayor el interés por el empleo de fuentes de energía renovables como el biodiesel, que posee grandes ventajas con mínimos daños al ambiente.

El biodiesel es un biocarburante líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas en la actualidad para este fin. Las propiedades del biodiesel son prácticamente las mismas que las del gasóleo (gasoil) de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por todo ello, el biodiesel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente.
Sin embargo, aunque el biodiesel ha surgido como una opción en cuanto a ser un combustible más amigable con el medio ambiente, éste ha mostrado tener problemas en cuanto a su aplicación debido a la corrosión que provoca en los materiales de un motor de combustión debido a los contenidos de sosa caustica los cuales tienen efectos químicos que provocan que el material del motor se haga más frágil y pierda sus propiedades, además se tiene una observación de oxidación y picadura.
Este trabajo se enfoca en el análisis de piezas de hierro gris proveniente de un motor de automóvil, específicamente en el cilindro de pistón, para obtener el tiempo de vida útil de éste en cuanto a la determinación de la velocidad de corrosión al emplear diésel, biodiesel y mezclas de estos según la norma ASTM 1045.

METODOLOGÍA

Síntesis de Biodiesel

El aceite vegetal seleccionado para la síntesis de biodiesel fue el aceite de girasol (Cristal, Aceites grasas y derivados S. A), esto debido a alta producción a nivel industrial.
La densidad y el pH del aceite vegetal del girasol fue determinada empleando un densímetro Ludwig Schneider tiras de papel pH, respectivamente.
Por otra parte, se realizó una reacción de transesterificación al hacer reaccionar el aceite vegetal con metanol (J. T. Baker 99.98% ACS) en presencia de hidróxido de sodio (J. T. Baker ACS) como catalizador. Esta reacción se llevó a cabo en un sistema de destilación a reflujo. La relación de las materias primas utilizadas fueron 5/1 aceite vegetal / metanol con el 0.035% de catalizador.
Posteriormente, la solución obtenida se dejó reposar 8 horas en un embudo de separación y se separó en las fases de biodiesel y glicerol mediante lavados del biodiesel. Estos últimos, consistieron en mezclar el biodiesel con agua en una relación 1/1 para eliminar los residuos de hidróxido de sodio. Posteriormente, la mezcla se dejó reposar por 8 horas en un embudo de separación. Finalmente, las fases fueron separadas y la operación fue repetida dos veces más.

Caracterización de Biodiesel

El biodiesel obtenido fue caracterizado midiendo su densidad, pH y el espectro de Infrarrojo. Como referencia se tomó la muestra de diésel de PEMEX.

Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión para el hierro gris fue investigada sobre diferentes mezclas de diésel/biodiesel basándose en la norma ASTM 1045 y sobrepasando la misma cómo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Mezclas de diésel/bidiésel empleadas en la determinación de la velocidad de corrosión sobre el hierro gris

Nombre de muestra	% de diésel	% de biodiesel
*B0	100	0
*B15	85	15
*B20	80	20
B50	40	60
B100	0	100

*Muestras dentro de la Norma ASTM 1045.

Las probetas de hierro gris con dimensiones de 1.5 x 1.5 x 0.5 cm fueron pulidas, lijadas, limpiadas con agua y acetona, y pesadas previo a realizar las pruebas de inmersión en 600 mL de la mezcla diésel/biodiesel correspondiente. Fueron realizadas duplicados por cada prueba mencionada.

Para la obtención de la velocidad de corrosión fue empleada la siguiente ecuación:

$$velocidad\ de\ corrosión = \frac{(m_2 - m_1)\ x\ 24\ x\ 365}{\rho tS\ x\ 1000} = 8.76\ x\ \frac{\Delta m}{\rho tS}$$

Donde la velocidad de corrosión es calculada en milímetros por año (mm año^{-1}), m_1 es el peso antes de la corrosión (g), m_2 es el peso después de la corrosión (g), ρ es la densidad del metal (g cm^{-3}), t es el tiempo de exposición y S el área expuesta (m^2).

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Síntesis de Biodiesel

Caracterización del aceite vegetal

En la tabla 2 se muestran los resultados de densidad y pH del aceite de girasol.

Tabla2. Densidad y pH de aceite de girasol

Propiedad	
Densidad (gr/cm^3)	0.900
pH	7

Caracterización de biodiesel

Medición de densidad

En la tabla 3 se muestran los resultados de densidad del biodiesel y diésel.

Tabla 3. Densidad de biodiesel y diésel

Tipo de diésel	Densidad (gr/cm^3)
Biodiesel	0.880
Diesel PEMEX	0.824

La densidad del biodiesel tiene una ligera diferencia respecto al diesel de PEMEX. Sin embargo están dentro de las especificación que es de 0.87 – 0.95 gr/cm^3 de acuerdo a la hoja de seguridad del Diesel Pemex. Cabe señalar que de acuerdo a la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, no hay especificación.

Medición de pH

En la tabla 4 se muestran los resultados de pH de los Biodiesel y Diesel. Podemos observar que no hay variación del pH. No hay especificación para esta propiedad.

Tabla 4. pH de biodiesel y diésel

Tipo de diesel	pH
Biodiesel de girasol	7
Diesel	7

Análisis por Espectrofotometría de infrarrojo

En la figura 1 se muestran los espectros de infrarrojo de biodiesel comparativamente con el diesel.
Al comparar los espectros se observan claramente señales características del biodiesel que están presentes en el diesel, como son dos grupos de bandas de absorción propia de los esteres metílicos que lo conforman, así en la región de la huellas dactilares aparece la banda entre (1200-1300)cm^{-1} originada por la deformación axial asimétrica C-O y en la región de los grupos funcionales entre 1750cm-1 y 1730cm^{-1} se encuentra el pico intenso correspondiente al grupo carbonilo (C=O) propio de los esteres; que está relacionado con la vibración de estiramiento relativamente constante y libre de interferencia, siendo esta señal la mayor diferencia con el espectro del diesel; para ambos espectros también es común la banda de absorción entre (2950 y 3000)cm^{-1}, correspondiente al estiramiento de los enlaces CH3, CH2 y CH propio de carbonos alifáticos.

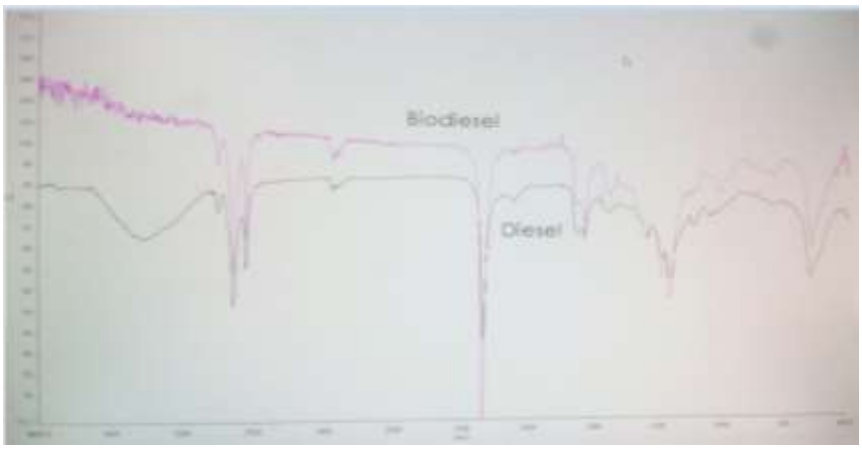


Figura 1. Espectros de infrarrojo de biodiesel, 1ª de Maíz comparativamente con el diésel PEMEX.

Pruebas de Velocidad de corrosión

La literatura marca que cuando es empleado biodiesel como combustible en un motor, éste causa corrosión en sus componentes debido a la presencia de componentes como ácido graso insaturado, átomos de oxígeno activos, entre otras. Lo que aún no ha sido investigado es la corrosión que causan distintas mezclas de diésel/biodiesel. En la figura 2 es mostrada la velocidad de corrosión basadas en las mezclas marcadas por la ASTM 1045 (B15 y B20) a temperatura ambiente durante 30 días en comparación con el blanco B0 (100% diésel). Los resultados indican que aunque la velocidad de corrosión incrementa conforme es aumentada la proporción de biodiesel en las mezclas (siendo mayor para la muestra B20) no existe una diferencia representativa.

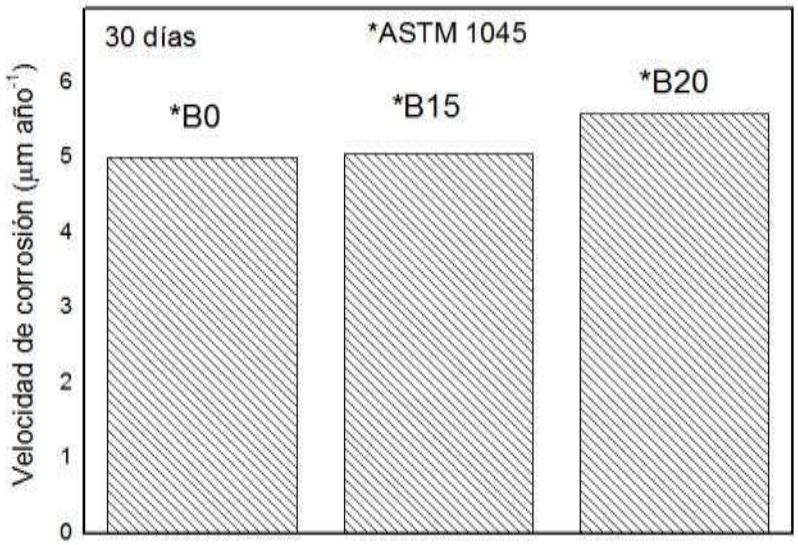


Figura 2. Velocidad de corrosión para las piezas de hierro gris expuestas a las mezclas de diésel/biodiesel basadas en la norma ASTM 1045 a temperatura ambiente.

Por otra parte, cuando se observa la velocidad de corrosión para las mezclas de diésel/biodiesel que sobrepasan las marcadas en la norma (Figura 3), es observada la misma tendencia de corrosión con el incremento del porcentaje de contenido de biodiesel. Aunque, es importante notar que en una mezcla con 30% más de biodiesel (B50) a partir de la B20 no se observa un incremento considerable. Un incremento notorio se da hasta la mezcla B100.

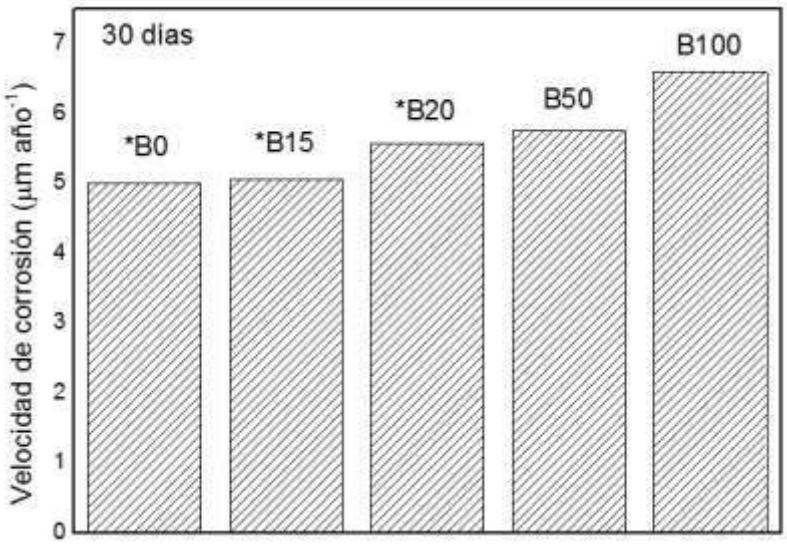


Figura 3. Velocidad de corrosión para las piezas de hierro gris expuestas a las mezclas de diésel/biodiesel que sobrepasan las marcadas en la norma ASTM 1045 a temperatura ambiente.

CONCLUSIÓN

Fue obtenido un biodiesel a partir de aceite vegetal de girasol con características en densidad y pH similares al diésel marca PEMEX. El biodiesel obtenido fue empleado para la determinación de la velocidad de corrosión con distintas mezclas de diésel en probetas de hierro gris obtenidas directamente de una cámara de cilindro de un motor a diésel.

Las velocidad de corrosión determinada no mostró un incremento considerable dentro de las mezclas marcadas por la norma ASTM 1045, sin embargo si se observó un ligero incremento de la mezcla B20 (dentro de la norma) comparada con la mezcla B50 (sobrepasada de la norma). Un incremento muy grande puede notarse con la mezcla B100.

De lo anterior puede concluirse que las mezclas marcadas dentro de la Norma ASTM 1045 provocan una baja velocidad de corrosión sobre el hierro gris provocando así una baja corrosión dentro del motor. Por otra parte, es necesario resaltar la elevada velocidad de corrosión que se lleva a cabo sobre el hierro gris cuando es empleado biodiesel al 100% (B100), lo cual crea áreas de oportunidad para el estudio de nuevos materiales o recubrimientos dentro de los componentes del motor.

Palabras claves

Hierro gris, velocidad de corrosión, diésel, biodiesel.

5. Bibliografía

1. (s.f.). Obtenido de 1. http://www.banrepcultural.org/node/92121
2. Amaya, A. A. (s.f.). Estudio de los efectos corrosivos del diesel y biodiesel sobre una fundición de hierro gris. *Rev. Latin Am.Metal.Mat*. Obtenido de www.rlmm.org
3. Eliseo GarcÍa Peréz, A. P. (2013). *Energia alterna y biocombustibles .* Estado de México: bba.
4. Hector Ramírez, H. A. (s.f.). Optimización del proceso de obtencion de biodiesel a partir de calza silvestre (Brassica Campestris). (pág. 10). Peru: Facultad de ciencias agropecuarias .
5. Querini, C. (30 de mayo del 2007). *El aceite de girasol en el mercado de los biocombustibles.*
6. Rodríguez, A. C. (s.f.). Produccion cientifica mundial sobre biodiesel . 19.
7. Silva, M. S. (s.f.). *La globalización de la economía mexicana (problemas y perspectivas).* México: Instituto politécnico nacional .
8. *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.*
9. Hoja de datos de seguridad PEMEX DIÉSEL, Fecha elab: 30/10/1998, Revisión: 5, Fecha rev:06/07/2011

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISPOSITIVOS DE VENTILACIÓN NATURAL CON ATENUACIÓN SONORA PARA RENOVACIÓN DE AIRE

Yoshiaki Ando Ashijara, Aníbal Figueroa Castrejón
Posgrado en Diseño Bioclimático, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco
Av. San Pablo Xalpa 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco, Ciudad de México, 02200, México
Tel. 53189189 Ext. 5530, andoashijara@gmail.com, fca@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

La ventilación natural es una de las principales estrategias de diseño bioclimático, en cuanto a la renovación del aire en los espacios cerrados, para conservar la calidad del oxígeno cuando hay un porcentaje elevado de dióxido de carbono producido por la respiración de los habitantes u otros contaminantes, o bien, para efectos de climatización cuando se puede utilizar el viento para acondicionar la temperatura interior de una edificación, teniendo la ventaja del ahorro energético que representa.

Un inconveniente es cuando se requiere mantener simultáneamente condiciones de confort acústico y de renovación de aire por las actividades que se realizan en el espacio, o por la sensibilidad y las alteraciones que pueden tener los habitantes debido al ruido ambiental exterior. Es un problema complejo debido a que el aire es un medio conductor del sonido. La manera más eficiente de aislar el ruido es sellando todas las infiltraciones de aire que puede tener un espacio, además de que el sistema constructivo debe tener un adecuado nivel de aislamiento, sistemas especiales de acristalamiento en ventanas, y por lo tanto se tiene que acondicionar por medios mecánicos.

El artículo presenta un análisis de algunos dispositivos de ventilación natural con atenuación sonora para renovación de aire que se han desarrollado y patentado internacionalmente, así como las ventajas y desventajas de los mismos.

Palabras clave: Diseño bioclimático, ventilación natural, atenuación sonora, dispositivos, patentes.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the main strategies of bioclimatic design, regarding the renewal of air in enclosed spaces, to preserve the quality of oxygen when there is a high percentage of carbon dioxide produced by respiration of the inhabitants or other contaminants or, for the purposes of air conditioning when can use the wind to condition the interior temperature of a building, having the advantage of energy savings it represents.

A disadvantage when is required a simultaneously acoustic comfort conditions and renewal of air through the activities undertaken in space, or the sensitivity and alterations that may have the inhabitants due to external environmental noise. It is a complex problem because the air is a sound conducting medium. The most efficient way to isolate the noise is sealing all air leaks that can have a space, in addition to the constructive system must have an adequate level of insulation, special glazing systems, and therefore must be conditioned by mechanical means.

The article presents an analysis of some natural ventilation devices with sound attenuation for air renewal that have developed and patented internationally, as well as the advantages and disadvantages of them.

Keywords: Bioclimatic design, natural ventilation, sound attenuation, devices, patents.

INTRODUCCIÓN

La ventilación natural es una estrategia del diseño bioclimático que se emplea para "mantener las condiciones de calidad del aire en los interiores y para proporcionar condiciones térmicas confortables".[1]

Uno de los aspectos fundamentales es el saneamiento del aire de los espacios cerrados por la disminución de la calidad del oxígeno debido a la emisión de dióxido de carbono por el proceso de respiración de los habitantes, la actividad metabólica que puede incrementar el número de cambios de aire por hora, emisiones de monóxido de carbono por la combustión de gas o leña en la estufa y calentador de agua. También se pueden tener emisiones de otros gases como el formaldehído que emiten los adherentes que se utilizan en materiales comprimidos derivados de la madera (aglomerados, *MDF*, *OSB*), que se pueden encontrar en muebles, puertas, pisos laminados y otros acabados.[2]

El otro aspecto relevante es para efectos de climatización. Por ejemplo, en climas cálidos se recomienda promover el intercambio térmico de la temperatura menor del aire exterior con la temperatura mayor del aire interior de un espacio. En clima cálido húmedo, como una estrategia pasiva se recomienda la ventilación cruzada de un flujo de aire constante durante todo el día. En clima cálido seco, durante el día la temperatura del aire exterior puede resultar más elevada que la interior en rango de confort, por lo tanto, no se recomienda la ventilación durante el día, pero sí la ventilación nocturna, mientras la temperatura sea menor y se pueda mantener en confort el espacio

[1] Fuentes, V., Rodríguez, M. (2004), p. 56
[2] ASHRAE (2007), p. 29

interior. En clima templado, si la temperatura de aire del espacio interior es más fría que la temperatura de confort, y la temperatura del aire exterior está en el rango de confort, se puede utilizar el aire para nivelar la temperatura de confort.[3]

Mientras se ventila, los habitantes se pueden exponer a otros factores que pueden afectar el confort interior: ingreso de polvo, polen, gases contaminantes, olores, insectos (entre otros) y el ruido ambiental exterior. Todos estos elementos pueden afectar gravemente la salud de los habitantes, lo que implica un dilema al momento de querer ventilar y a su vez, el tener que seleccionar si se va a utilizar un sistema pasivo o uno activo.[4]

En las ciudades, la estrategia que se está realizando para satisfacer la demanda de vivienda es la re-densificación de los terrenos con crecimiento vertical. Se están cambiando las viviendas unifamiliares por edificios en las que se construyen por lo menos seis departamentos de acuerdo al uso de suelo permitido. En la Ciudad de México, por ejemplo, este cambio se está dando sobre vías primarias donde se pueden observar una gran cantidad de edificios nuevos y en construcción en los últimos años. Es notorio ver lo que muchos habitantes hacen para convivir a escasos metros de una vía con una alta carga vehicular. Se pueden observar edificios que se ocupan rápidamente y que al poco tiempo se están rentando o revendiendo. Otros en que los habitantes colocan doble cancelería (afectando en ocasiones la apariencia del diseño original del edificio) y posiblemente instalan muros ligeros adicionales con relleno de aislante acústico. Por la misma razón de atenuar el ruido, van a bloquear todas las entradas de aire, por lo tanto, la ventilación.

Para dar una solución, se han popularizado los sistemas compactos de aire acondicionado. En el diseño bioclimático se recomienda cuando las condiciones climáticas son extremas (dependiendo del presupuesto para un acondicionamiento), estos sean la opción inmediata más viable para los habitantes. Aunque pueden tener un impacto desfavorable en la salud, en el consumo energético y en la economía de los usuarios. Es por ello que se pretende dar relevancia a los sistemas pasivos.

Cabe destacar que las patentes y productos encontrados de ventilación con atenuación sonora son diseñados y producidos principalmente en Estados Unidos, Australia, Inglaterra, Alemania, Italia, Corea y Japón. En México son pocos los proveedores y son productos de importación.

OBJETIVO

Realizar una búsqueda documental y analizar algunas patentes y dispositivos comerciales de ventilación natural con atenuación sonora que se encuentran disponibles en el mercado.

DESARROLLO

En la investigación se tomó como aspecto fundamental de la búsqueda, la atenuación sonora en dispositivos de ventilación para renovación de aire. Se encontraron muchas patentes y pocos productos comerciales. Se revisaron 93 patentes (existen más, pero eran conceptos similares) principalmente de *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) y de *World Intellectual Property Organization* (WIPO) y se comentarán los conceptos más representativos. Para poder clasificar la tipología se tomó en cuenta la clasificación de De Salis, Oldham y Sharples (2002), en la cual, tenemos tres tipos de estrategias (con variantes) de ventilación natural con atenuación sonora para las edificaciones: pasivas, activas e híbridas:

Pasivas

Estos dispositivos de ventilación requieren características especiales para su adecuado funcionamiento: Generar una ventilación cruzada, con una orientación de la entrada de aire en barlovento (presión positiva con respecto a los vientos dominantes) y tener alguna salida en sotavento (presión negativa). La eficiencia puede depender en cuanto a sus dimensiones y a las dimensiones del espacio que se requiere ventilar, para ello se estima el factor de ventana (proporciones de entrada y de salida) que nos define el área libre de entrada y salida de aire.

Este tipo de dispositivos pueden ser aperturas directas o con conductos en paredes, techo o el piso (ventanas, aireadores, compuertas, rejillas, domo abatible), Algunos modelos se pueden colocar en los marcos de las ventanas como el de la Figura 1, del cual existen patentes en USPTO desde 1883, en donde es claro que el problema del ruido exterior ya era un problema para algunos habitantes. De este tipo de modelo se siguen diseñando nuevos productos y diversos fabricantes con el mismo fundamento. Como van integradas al diseño de un marco de ventana, tienen variables y accesorios que permiten otra característica adicional como: protección solar o sombreado, privacidad, desvío de lluvia, protección contra insectos. La atenuación del ruido es muy pequeña debido a que sus dimensiones por lo general son del ancho del muro, como utilizan material de absorción acústica[5] en su interior, esta tiene relación proporcional con el espesor y son eficaces sólo para algunas frecuencias medias y altas.

Otro modelo como el de la figura 2, consiste en reducir la presión sonora que ingresa a través de orificios que permiten el paso del aire. Los conductos son asimétricos y no lineales. En el interior tienen una cámara de aire con material que absorbe las ondas sonoras de algunas frecuencias. Tendrá mayor eficiencia mientras aumente el espesor y tenga diferentes desvíos de ondas en su interior, que a su vez puede reducir la presión del flujo de aire. Por esto, la mayoría de los dispositivos comerciales que se tienen de este tipo son las rejillas o *louvers* que permiten el paso directo del flujo de aire y generan la atenuación engrosando las rejillas con material absorbente acústico y su eficiencia también es proporcional al espesor que se le dé al recorrido del flujo de aire.

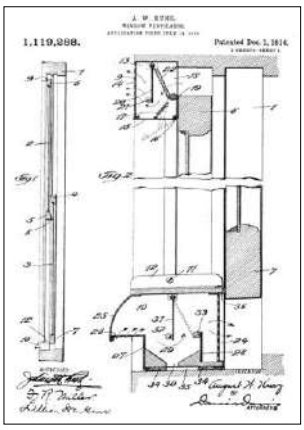
Existen otro tipo de dispositivos llamados “aireadores”, los cuales consisten en un conducto independiente a las ventanas, donde la entrada de aire está en la fachada y el otro extremo está en el interior. Son ductos cortos del espesor del muro (Figura 3), tienen una rejilla de entrada, el ducto está forrado de material absorbente acústico y tienen una compuerta de salida regulable. Otros modelos tienen un recorrido vertical u horizontal con la función de aumentar el trayecto y “filtrar” el ruido (figuras 4, 5 y 6). En el interior llevan diferentes capas de material absorbente acústico (espuma de poliuretano, lana mineral) con un desplazamiento no lineal del aire.

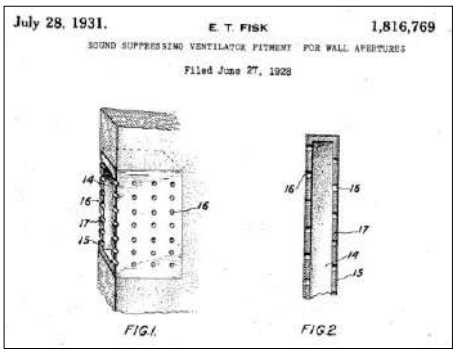
---

[3] García, J.R., Fuentes, V. (2005), p. 101-150

[4] Ibídem

[5] Los materiales absorbentes acústicos industriales más comunes son lana mineral, lana de fibra de vidrio y poliuretano.





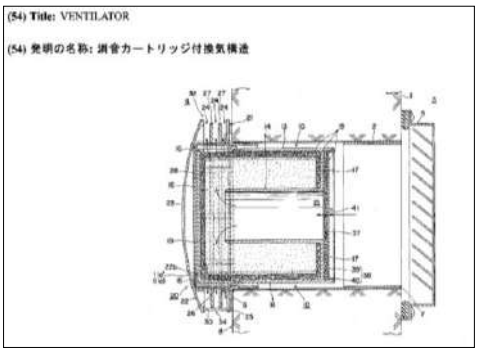
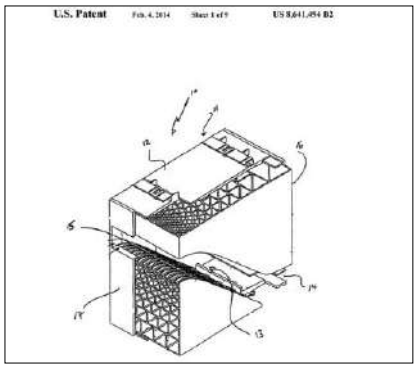
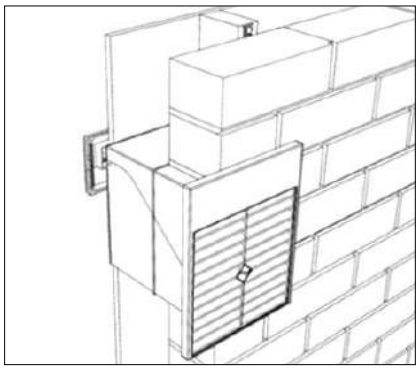


Figura 1. (Izquierda), Patente No. 1,119,288, de August W. Kurz de Nueva York, Estados Unidos en 1914 (Fuente: USPTO)
Figura 2. (Centro), de Ernest Thomas Fisk de Sydney, Australia en 1931 (Fuente: USPTO)
Figura 3. (Derecha), Patente No. WO 2004/094920 A1, de Fumihara Takeda de Tokio, Japón en 2004 (Fuente: WIPO)





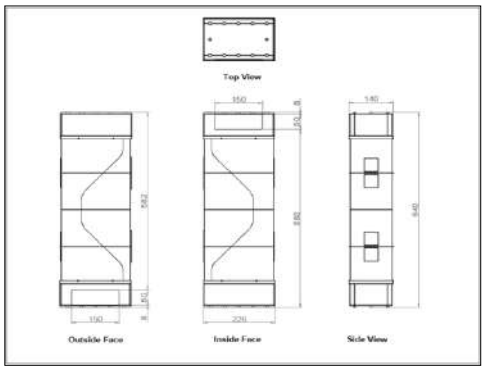
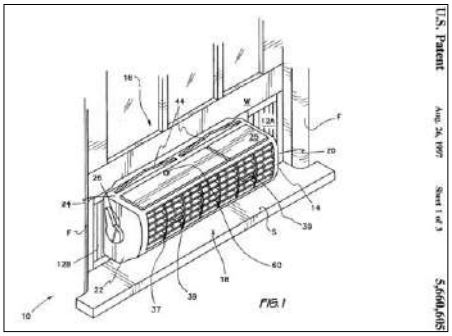


Figura 4. (Izquierda), Patente No. US 8,641,494 B2, de Christopher James Matthews, de Rozelle, Australia en 2014 (Fuente: USPTO)
Figura 5. (Centro), Producto comercial de la marca australiana Silenceair, modelo 10-0001-01 (Fuente: http://www.silenceair.com/)
Figura 6. (Derecha), Producto comercial de la marca australiana Silenceair, modelo 10-03-01 (Fuente: http://www.silenceair.com/)

Activas

Las activas comprenden dispositivos eléctricos que van a hacer el proceso de inyección de aire por medio de ventiladores y pueden ser elementos de sobre poner en las ventanas (figuras 7 y 8). También existen dispositivos que están integrados en el marco de la ventana, que hacen el proceso de inyección y extracción de aire en el mismo elemento (sin tener la necesidad de generar una ventilación cruzada), este mecanismo se lleva a cabo desde un mismo sitio, y solo funciona estando el dispositivo conectado a la energía eléctrica. Tienen la ventaja de que se cuenta con el flujo de aire en cualquier momento y además se pueden controlar con temporizador. El inconveniente es que en algunos modelos se tiene que convivir con el ruido de los ventiladores, con una intensidad similar al de los extractores eléctricos de baños y cocinas. Otros modelos tienen un motor general con un sistema de ductos que distribuyen el aire a distintas partes de un espacio, al requerir un motor de mayor potencia por lo general tienen mayor nivel de ruido. Se han desarrollado modelos que tienen ventiladores eléctricos con niveles reducidos de ruido (figuras 9 y 10). Las desventajas son que siempre requieren de energía eléctrica para estar en marcha, implican desgaste de componentes, mantenimiento y costos de funcionamiento.



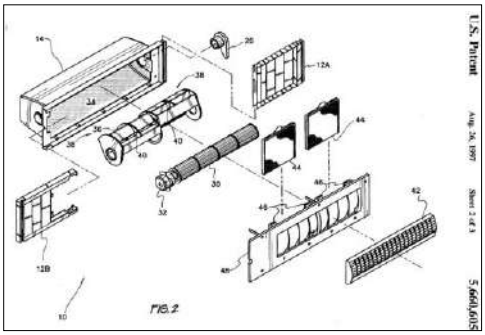
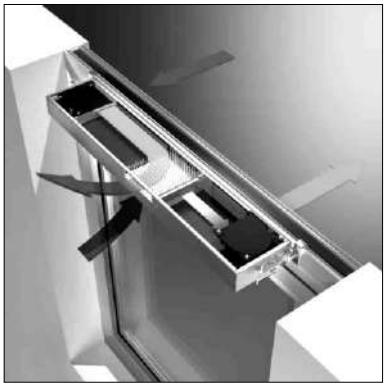


Figura 7. (Izquierda), Patente No. 5,660,605, de Thomas Chan y Johnson Hsu de Massachussets, Estados Unidos en 1997. (Fuente: USPTO)
Figura 8. (Derecha), Explosivo de la patente No. 5,660,605 (Fuente: USPTO)



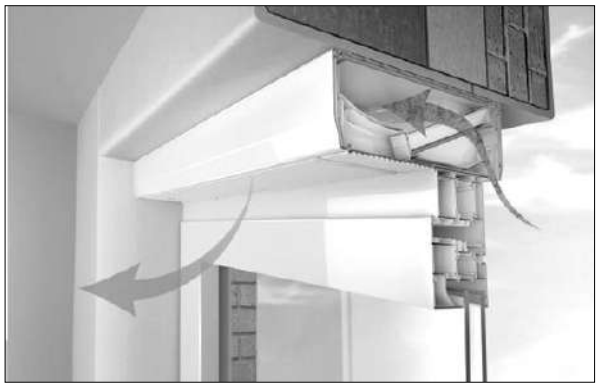


Figura 9. (Izquierda), Producto comercial de la marca alemana Schüco (Fuente: http://www.schueco.com/web2/com)
Figura 10. (Derecha), Producto comercial de la marca italiana Thesan (Fuente: http://www.thesan.com)

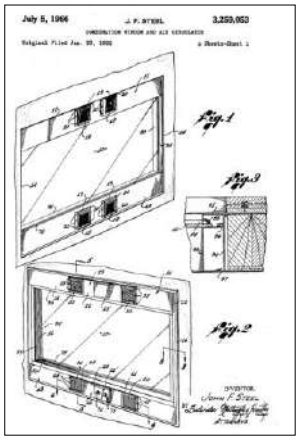
Híbridas

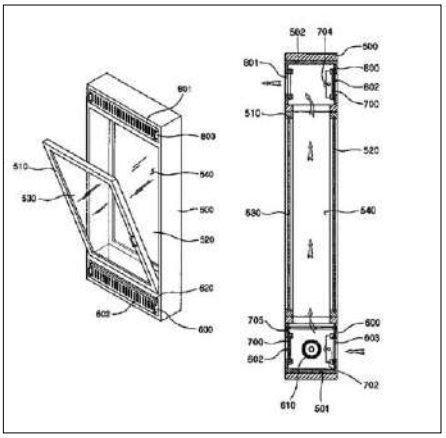
Las híbridas o mixtas van a combinar elementos pasivos con elementos mecánicos[6] de acuerdo a las necesidades. Algunas combinan otras funciones como calentamiento o enfriamiento del aire con fines de climatización, humidificación, aromatización, atenuación acústica, entre otros.

Algunas pueden aprovechar el flujo natural del viento con cámaras de aire aprovechando el efecto de la convección del aire y tener la opción de forzarlo por medio de ventiladores en caso de ser necesario. Tienen ubicados los ventiladores de inyección de aire en la parte inferior y los de extracción en la parte superior (figura 11).

Otros modelos que se han desarrollado tienen la capacidad de climatizar de manera pasiva con la radiación solar que pasa a través del cristal. Realizan esta función al ingresar el aire del exterior, pasándolo con ventiladores por la cámara que se forma con el doble acristalamiento y lo ingresan a la habitación por medio de una compuerta regulable. Para enfriar, se extrae el aire caliente por medio de otras compuertas interiores y pasan el aire a través de los laterales del marco de ventana para generar un flujo al exterior (figura 12).

Este tipo de dispositivos pueden tener controles electrónicos y sensores, ideales para los proyectos de edificios inteligentes, lo que por los elementos tecnológicos se convierten en las opciones más costosas. En cuanto al control de ruido, se combinan las características de utilización de materiales de absorción acústica en los conductos del aire, pero es muy probable que se perciba el ruido de los ventiladores funcionando al mismo tiempo.





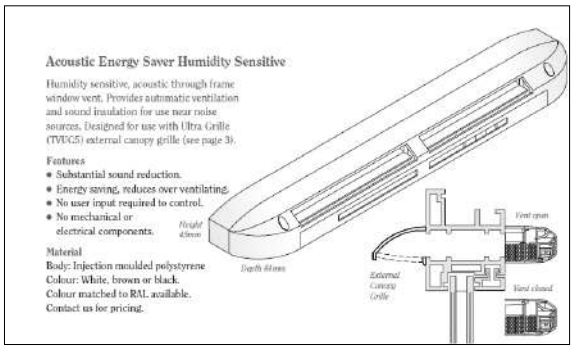


Figura 11. (Izquierda), Patente No. 3,259,053, para John F. Steel de Florida, Estados Unidos en 1966. (Fuente: USPTO)
Figura 12. (Centro), Patente No. US 7,270,600 B2, para Seung Woo Kim y Sung Joo Cho de Seúl, Corea del Sur en 2007. (Fuente: USPTO)
Figura 13. (Derecha), Producto comercial modelo TVES4dB de la marca inglesa Passivent (Fuente: http://www.passivent.com/)

CONCLUSIONES

La ventilación natural mejora las condiciones de confort de los espacios interiores. De manera paradójica pueden ingresar elementos que afectan a la salud y bienestar de los habitantes de las grandes ciudades. Con el incremento de las viviendas plurifamiliares sobre avenidas primarias y por la demanda existente, hace que los habitantes desde una preventa adquieran a un menor precio un departamento sin estar conscientes de la carencia de aislamiento acústico. Este problema lo detectarán al momento de habitar el espacio, y es común observar que existen este tipo de afectaciones en los edificios. Como se menciona en un principio, al sellar las entradas de ruido se sellan las entradas de aire. Las afectaciones se pueden percibir cuando el clima es caluroso y se tiene que ventilar. Se recurre al uso de sistemas mecánicos como aire acondicionado, ventiladores fijos en el plafón o ventiladores movibles de pie o de mesa. Y si los espacios están cerrados, solamente se está recirculando el aire sin reducir el nivel de contaminantes que pudiera tener. En los Estados Unidos y otros

[6] ASHRAE (2005), p. 610

países, se ha incrementado el uso de sistemas de ventilación natural debido al alto costo de la energía y para la reducción de gases efecto invernadero.

Al querer ventilar y abrir las ventanas entra el ruido exterior. El nivel de ruido que se puede atenuar por medio de los dispositivos de ventilación, no va a ser mayor que el nivel de aislamiento que tenga el edificio y por otras causas como la vibración. Para poder determinar la eficiencia de los dispositivos, se tendría que medir el nivel de ruido de fondo de la habitación con las ventanas abiertas y cerradas, detectar el origen del ruido dominante, el horario y medir el tiempo de reverberación del espacio interior.[7] La eficiencia se determinará calculando la diferencia del ruido de fondo del espacio completamente cerrado y con el dispositivo funcionando. Existen niveles de ruido ambiental que se pueden considerar tolerables o que se vuelven costumbre por la cotidianidad, por lo tanto, el valor de la diferencia no es muy estricta.[8]

Ha existido una gran motivación de inventar y patentar dispositivos de ventilación natural con atenuación sonora. Es notorio que el ruido es un problema ligado al progreso de las ciudades. El ruido provocado por el paso de aviones, tráfico vehicular, fábricas, máquinas refrigerantes de los edificios, música, ladridos, entre otros, son los que se convierten en el ruido ambiental urbano, y causan molestias a muchos habitantes a través del tiempo. Las patentes que se revisaron surgen desde el año 1883, década por década sucesivamente hasta la década presente hay patentes registradas, y son muy pocas las variantes de productos que hay en el mercado internacional en la actualidad.

Además, en México no hay suficiente oferta de dispositivos de ventilación natural con atenuación sonora. Lo más común es encontrar en el mercado nacional las rejillas o *louvers* industriales con atenuación sonora, al cotizarse con un proveedor que las importa, resultaron ser muy costosas debido a que un módulo de 30 x 35 x 20 cm oscilaba los $460.00 dólares americanos más impuestos, precio directo del fabricante en los Estados Unidos. Por lo tanto, se podría afirmar que es un área de oportunidad para el diseño industrial mexicano en el diseño bioclimático.

Para finalizar, se propone fomentar el diseño de dispositivos de ventilación natural, que puedan funcionar con las características del viento del sitio, no utilicen energía, en su caso tengan un consumo mínimo o utilicen energías renovables, reduzcan la presión sonora del ruido exterior a un nivel tolerable, puedan filtrar gases contaminantes y partículas suspendidas, sean adaptables al estilo de construcciones nuevas o existentes, la mayor parte sea de producción nacional (tomando en cuenta la tendencia de producción de componentes en países industrializados con mano de obra de bajo costo), tengan un bajo impacto ambiental en su ciclo de vida y se provean alternativas para que se puedan adquirir con un precio accesible para la mayoría.

REFERENCIAS

ASHRAE (2007). Standard 62.1-2007: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Estados Unidos: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE (2009). Use natural or mixed mode ventilation where appropriate. *Indoor air quality guide: Best practices for design, construction and commissioning*. Estados Unidos: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, p. 610-629.

Awbi, H. (1998). Ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.2, p. 157-188.

De Salis, M.H.F., Oldham, D.J., Sharples, S. (2002). Noise control strategies for naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, No. 38, p. 471-484.

Field, Ch. (2010). Satisfactory background noise levels in naturally ventilated buildings – challenging acoustic criteria used in the past. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, ICA 2010, p. 1-5.

----- (2015). Acoustic design criteria for naturally ventilated buildings – unnecessarily stringent? *Ecolibrium*. Feb. 2015: 30-33.

Fuentes, V., Rodríguez, M. (2004). *Ventilación natural: Cálculos básicos para arquitectura*. México: Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco.

García, J.R., Fuentes, V. (2005). *Viento y arquitectura: El viento como factor de diseño arquitectónico*. México: Trillas.

Páginas de consulta

- *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), http://www.uspto.gov/
- *World Intellectual Property Organization* (WIPO), http://www.wipo.int

[7] ASHRAE (2009), p. 612

[8] Field (2015), p. 31

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE AGAVE AMERICANA L. Y SU CARACTERIZACIÓN EN UN MOTOR STIRLING

Elizabeth Ortiz Haro, Energías Renovables Calidad y Ahorro de la Energía, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 4272197906, elizabethortizharo@gmail.com

Sandra Soto Álvarez, Energías Renovables, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 4271168175, sotoalsandra@gmail.com

Ángel Marroquín de Jesús, Energías Renovables, Universidad Tecnológica de San Juan Del Rio, Av. La palma No.125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, 76826, México, 4271657455, a_marroquin2003@yahoo.com.mx

RESUMEN

El bioetanol se considera como una fuente de energía renovable y sostenible, aunque existen algunas controversias sobre las materias primas que son utilizadas para su producción; el bioetanol puede producirse a partir de un gran número de plantas. En México hay muchas zonas áridas donde podría cultivarse maguey (Agave Americana L) y aprovechar la cantidad de sacarosa que este tipo de agave nos proporciona para la producción de un combustible alterno. Producir de manera sostenible y sustentable el bioetanol utilizando como materia prima el maguey, ayudaría a disminuir el consumo de combustible fósil, empleándolo en mezclas con gasolina para reducir los gases contaminantes ya que este bioetanol emite entre 40 y 80% menos gases invernadero al aire. En una comunidad cercana a la Universidad Tecnológica de San Juan del Río, se consiguió el aguamiel, utilizando una torre de destilación se obtuvo bioetanol con un 87% de pureza. Para caracterizar el bioetanol obtenido se utilizó un motor Stirling, en el que se midió las RPM y temperatura generadas por el bioetanol el cual tuvo ligeramente una menor eficiencia comparativamente con el alcohol grado reactivo.

ABSTRACT

Ethanol is considered a renewable energy source and sustainable although there are some controversies on raw materials that are used for their production; bioethanol can be produced from a large number of plants. In Mexico there are many arid areas where they could be grown maguey (Agave Americana L) and take the amount of sugars that this type of agave provides for the production of an alternative fuel. Produce sustainably and sustainably using bioethanol as raw material maguey, help reduce fossil fuel consumption, using blended with gasoline to reduce polluting gases since this Bioethanol releases between 40 and 80% less greenhouse gas air. In a community near the Technological University of San Juan del Rio, mead was achieved, using a distillation tower bioethanol was obtained with 87% purity. To characterize the bioethanol obtained a Stirling engine is used, wherein the measured RPM and temperature generated by bioethanol which had slightly lower performance comparatively reagent grade alcohol.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se están utilizando otros combustibles distintos al petróleo, los cuales se denominan combustibles alternos a la "gasolina". La razón de estos combustibles es el de buscar opciones que permitan minimizar los efectos no amigables al ambiente que se producen al quemar combustibles de origen fósiles.

El Etanol (alcohol del etilo, alcohol de grano, ETOH) es un líquido claro, incoloro con un olor característico agradable. En solución con agua, tiene un sabor dulce, pero en soluciones más concentradas tiene un sabor ardiente. El etanol se hace a partir de un éter, el éter del ethyltertiary-butyl (ETBE), que tiene propiedades interesantes para la oxigenación de la gasolina y combustibles reformulados.

El bioetanol, el combustible del futuro, es químicamente alcohol común (etano-1-ol) con la característica de haberse obtenido de una biomasa, normalmente con alto contenido de sacarosa y sometida a fermentación. El alcohol producido, 12-15 % en peso de la biomasa, se separa por destilación y se obtiene el alcohol común, constituido por 96 % etanol y 4 % agua. Considerado como combustible, el bioetanol tiene alto calor de combustión, alto octanaje y bajo cetanaje. Mezclado con nafta, produce un combustible de alto calor de combustión y alto poder energético, el gasohol o la alconafta, que tienen características combustibles similares a la nafta. Cabe señalar el gran uso actual de la alconafta en el mundo, aunque todavía no ocurre en nuestro país.

La producción del Etanol a nivel industrial se realiza en ocho pasos básicos: 1. Molienda: Si la biomasa es sólida es convertida en polvo fino. 2. Licuefacción: El polvo se mezclará entonces con agua. 3. Sacarificación: La mezcla anterior se le agrega una enzima secundaria para convertir los almidones en azucares fermentables, si es el caso. 4. Fermentación: Se agrega levadura para fermentar los azúcares y obtener el etanol y dióxido de carbono. En un proceso de fermentación continua, la mezcla se queda en el fermentador por espacio de 48 horas antes de iniciar el proceso de destilación. 5. Destilación: La masa fermentada, ahora llamada "la cerveza", contendrá sobre 10% de alcohol, así como todos los sólidos no- fermentables y las células de levadura. La masa se bombeará entonces al sistema de destilación donde al alcohol se le quitará los sólidos y el agua. El alcohol dejará el tope de la columna de destilación con una pureza alrededor del 96%, y el residuo, será transferido de la base de la columna a otros procesos para obtener co-productos. 6. Deshidratación: El alcohol del tope de la columna pasará entonces a través de un sistema de la deshidratación donde el agua restante será quitado. La mayoría de las plantas de etanol utilizan un tamiz molecular para capturar el último residuo de agua en el etanol. El producto del alcohol en esta fase se llama etanol anhídrido (puro, sin agua). 7. Desnaturalización: El etanol que se usará para combustible se desnaturaliza con una cantidad pequeña (2-5%) de algún producto, como gasolina, para hacerlo no consumible por el ser humano. 8. Co-Productos: Hay dos co-productos principales creados en la producción de etanol: dióxido de carbono y grano de los destiladores. El dióxido de carbono se emite en grandes cantidades durante la fermentación y muchas plantas del etanol recolectan ese dióxido de carbono, lo limpian de cualquier alcohol residual, lo comprimen y lo venden para carbonatar bebidas o fabricación de hielo seco. Los sólidos de destiladores, húmedo y seco, son altos en proteína y otros nutrientes y son valorados ingredientes en la fabricación de alimentos para animales. Algunas plantas del etanol también fabrican un "jarabe" que contiene algunos de los sólidos que pueden ser vendidos además del sólido del destilador. La producción de Etanol es un proceso donde todo es aprovechado lo que agrega valor a la biomasa.

Para su uso en medios de trasporte, el etanol ofrece diversas posibilidades de mezclas para la obtención de biocombustibles, se mezcla con combustibles convencionales en pequeñas cantidades que oscilan entre un 5 y 10%, las cuales son reguladas y supervisadas por organismos encargados de velar por la salud ambiental. En muchos países de Europa y en Estados Unidos rige una ley que determina los niveles de mezcla y exige que se cumplan. Dicha ley se ha convertido en modelo a copiar en otros regiones que apuestan igualmente a que los biocombustibles reduzcan los gases contaminantes y por ende, el efecto invernadero. (OXFAM, 2013). Dos mezclas altas de etanol, E-85 y E-95 están explorándose como combustible alterno en programas de demostración.
Las propiedades de estas mezclas son:
E5: es una mezcla de 5% etanol y 95% de nafta. Esta es una mezcla habitual, es la máxima autorizada en la actualidad por la regulación europea y la regulada a utilizar en nuestro país a partir del año 2010. Para el caso de nuestro país, la regulación está especificada por el contenido de oxígeno elemento (2.7%) que debe tener la mezcla y corresponde al uso de etanol al 7,8%. Sin embargo, es previsible una modificación de la normativa europea que aumentará el límite a 10 % (E10) ya que diferentes estudios revelan que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas de hasta el 10% en etanol y que los beneficios en cuanto a ahorro de hidrocarburos y para el ambiente son significativos.
E10: es una mezcla de 10% de etanol y 90% de nafta. Esta es la mezcla más utilizada en los Estados Unidos, ya que hasta esta proporción de mezcla los motores no necesitan ninguna modificación e incluso produce una elevación de un octano en la gasolina. Consecuentemente, mejora su resultado y se obtiene una reducción en la emisión de gases contaminantes.
E85: es una mezcla de 85 % de etanol y 15 % de nafta y requiere motores especiales. En los Estados Unidos, las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas. También se comercializan, en algunos países, vehículos con motores adaptados a una variedad de mezclas (motores Flex). En estos motores, sensores especiales pueden determinar la mezcla de carburantes y ajustar automáticamente la sincronización de ignición del motor y los coeficientes aire/combustible. Estos motores permiten la utilización de cualquier relación nafta/alcohol y hasta la utilización de nafta pura.
E95 y E100: mezclas de hasta 95 % y 100% de etanol se utilizan en motores especiales para esos usos. Su uso en Brasil es muy difundido.

Investigadores, académicos y funcionarios de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) inauguraron la Planta Piloto para la Producción de Etanol a partir de Jugo y Biomasa de Agave Tequilero y Mezcalero, cuyos resultados tendrán un impacto científico, tecnológico y social.
El proyecto, impulsado por la SAGARPA, propone aprovechar de manera integral las plantas de agave tequilero y mezcalero con fines bioenergéticos. Lo anterior representa una alternativa para que el producto pueda mezclarse con gasolina a efecto de lograr una buena oxigenación, con lo que se podrán reducir las emisiones de monóxido y dióxido de carbono. Con ello, diferentes universidades del país como la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), la Universidad de Guanajuato y el Tecnológico de Celaya, Guanajuato, con su investigación científica iniciada en 2011, se colocan como pioneros en los procesos de producción de bioetanol a base de materiales celulósicos. Esto, luego de alcanzar resultados de hidrólisis (ruptura de la matriz celulósica hacia azúcares), fermentación (transformación de azúcar a alcohol) y de separación, a fin de obtener alcohol puro.
El gerente estatal del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), destacó que el proyecto impulsa la seguridad energética y la mitigación de los efectos del cambio climático, en el marco de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Señaló que se coadyuva a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, además de que se establecen las bases para promover la producción de insumos con fines bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas y procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.

En general, los beneficios de usar bioetanol son reducir la necesidad de importación de petróleo, prevenir la contaminación y utilizar un combustible renovable.

La espectrometría infrarroja se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional.

Un motor Stirling es un motor térmico operando por compresión y expansión cíclica de aire u otro gas, el llamado fluido de trabajo, a diferentes niveles de temperatura tales que se produce una conversión neta de energía calorífica a energía mecánica. O más específicamente, un motor térmico de ciclo cerrado regenerativo con un fluido gaseoso permanente, donde el ciclo cerrado es definido como un sistema termodinámico en el cual el fluido está permanentemente contenido en el sistema, y regenerativo describe el uso de un tipo específico de intercambio de calor y almacenamiento térmico, conocido como el regenerador. Esta inclusión de un regenerador es lo que diferencia a los motores Stirling de otros motores de ciclo cerrado.

METODOLOGÍA

Síntesis de Bioetanol

Selección del maguey

El aguamiel se recolecto de una comunidad cercana a la UTSJR el cual fue extraído directamente del maguey (Agave Americana L). Figura 1.

Figura 1. Extracción de aguamiel del agave americana L.

Caracterización del aguamiel

Se determinaron los Grados Brix al aguamiel de maguey, los cuales nos determinan la cantidad de sólidos solubles presentes en el mosto, expresados en porcentaje de sacarosa. Los sólidos solubles están compuestos por los azúcares ácidos, sales y demás compuestos solubles en agua y fueron determinados utilizando un refractómetro óptico (Refractómetro ATAGO, modelo NAR 1T), calibrado con agua des ionizada.

Fermentación

La fermentación se realizó en garrafones con capacidad de 20 lt, con un volumen efectivo de trabajo de aproximadamente 10 litros en anaerobiosis a temperatura ambiente por 7 días, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Fermentación de aguamiel del agave americana L.

Destilación

El proceso de destilación se llevó a cabo en una torre de destilación simple (modelo PIGNAT) con capacidad de 8 litros, la cual emplea aceite como fluido de calentamiento. La temperatura de operación en una primera destilación fue de 90°C, en una segunda destilación de 85°C y en una tercera destilación de 80°C. Esto para asegurar la máxima extracción del bioetanol de la biomasa fermentada. La temperatura de ebullición del etanol a condiciones normales de presión y temperatura es de 78.3°C. Figura 3.

Figura 3. Destilación de bioetanol de aguamiel del agave americana L.

Caracterización del bioetanol

Pureza del bioetanol

Se determinó la pureza del bioetanol expresada en % volumen a 20°C por medio de un alcoholímetro marca Alla France.

Espectrofotometría de Infrarrojo

Se analizó cada una de las muestras por espectrofotometría de infrarrojo (FT- IR spectrum BX, Perkin Elmer con un rango de medición de 4000 cm-1 a 400 cm-1) para verificar la obtención del bioetanol. La pureza está limitada debido a la formación de una mezcla agua-etanol conocida como mezcla azeotrópica. Se analizó comparativamente con el alcohol grado reactivo.

Eficiencia en Motor Stirling

Se determinó la eficiencia del bioetanol al medir las RPM y temperatura que trabajaba el motor al ser accionado con la muestra para determinar la conversión de energía calorífica a mecánica. Se analizó comparativamente con el alcohol grado reactivo. Figura 4.

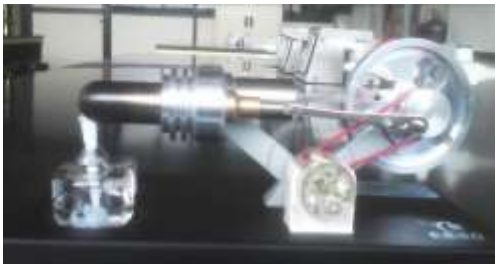


Figura 4. Motor Stirling

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Síntesis de Bioetanol

Caracterización del aguamiel de agave

Para determinar los azucares fermentables disponibles en el mosto tanto al inicio de la fermentación como al final se realizó la medición de Grados Brix. En la Tabla 1 se muestran los resultados de estas mediciones.
La disminución de los Grados Brix indica que se está llevando a cabo la fermentación alcohólica.

Tabla 1. Medición de grados Brix al inicio y final de la fermentación del aguamiel de agave

Material	**Grados Brix**	**Grados Brix**

	inicial	final
Agave	5.5	1

Caracterización del bioetanol

Pureza y rendimiento del bioetanol

El rendimiento del bioetanol se obtuvo a partir de la ecuación 1, dándonos como resultado la relación que existe entre los litros de bioetanol producido respecto a la cantidad de biomasa inicial. También se determinó la pureza del bioetanol expresada en % volumen. En la tabla 2 se muestran los datos del rendimiento del bioetanol producido y el % de bioetanol en volumen.

Rendimiento = Bioetanol (lt)/Biomasa (lt) (1)

Tabla 2. Rendimiento y Pureza del Bioetanol

Material	L de bioetanol /L de biomasa	% vol. etanol
Bioetanol	0.024	87
Etanol		96

Después de una tercera destilación del bioetanol se obtiene una pureza del 87% en volumen, lo cual es indicativo de que se requiere de un proceso más selectivo para poder obtener una pureza similar a la del etanol grado analítico (96 % en volumen).

Análisis por Espectrofotometría de Infrarrojo

El bioetanol obtenido fue analizado en un espectrómetro de infrarrojos el cual puede ser utilizado para identificar un compuesto o investigar la composición de una muestra.

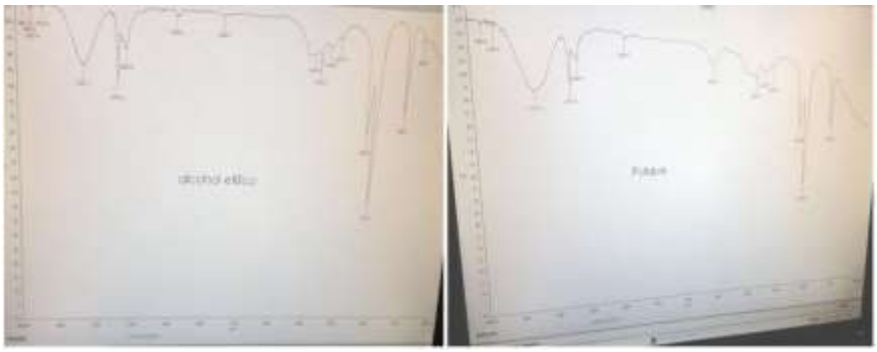


Figura 5. Espectros de infrarrojo del Etanol y bioetanol

Al comparar los espectros se observan claramente señales características del bioetanol que están presentes en el etanol, como son las bandas que indican que existe la presencia del enlace: O-H: 3400 – 3650 cm^{-1}, C-O: 1050 -1150 cm^{-1}, C-H: 2850 – 2960 cm^{-1}, C-C: 800 - 1300 cm^{-1}.
Lo que nos arrojan estas cifras es la longitud de onda de cada enlace y estos cuatro grupos funcionales aparecen en el espectro, y se puede distinguir fácilmente el enlace O-H (alcohol) ya que su onda de longitud es muy amplia de tamaño 3353.7 cm^{-1}, estas curvas son intensas y podemos observarlas en la figura 5.

Eficiencia en Motor Stirling

Al aplicar bioetanol al contenedor del fluido de trabajo y encender la mecha, el motor empieza a trabajar, transformando la energía calorífica en energía mecánica; cuando el motor está en constante movimiento se mide la velocidad generada en RPM del motor y la temperatura del contenedor que recibe la energía calorífica, los datos se muestran en la tabla 3. Las mediciones se realizaron por triplicado y comparativamente con el etanol grado reactivo.

La velocidad del motor se midió con un tacómetro y la temperatura con un termopar.

Tabla 3. Eficiencia del alcohol en motor Stirling

Material	**RPM**	**Temperatura (°C)**
Etanol	1163	138
Bioetanol	897	125

La eficiencia por el bioetanol es ligeramente menor respecto al etanol, esto puede ser debido a la diferencia de concentraciones a las que se encuentran los combustibles, 97% en volumen el bioetanol y 96% en volumen el etanol. Las temperaturas medidas también tienen una diferencia, aunque en este caso no es muy significativa.

CONCLUSIÓN

El bioetanol obtenido aun esta hidratado por lo que se requiere de un proceso más selectivo para deshidratarlo y utilizarlo como biocombustible; o utilizarse hidratado para la industria alimenticia, farmacéutica o en la industria química como solvente o materia prima para otros derivados.

El rendimiento del bioetanol a partir de desechos orgánicos es bajo, esto, debido al nivel de azúcar que contienen, comparado con el rendimiento que da la caña de azúcar que es de 0.08 l/kg de biomasa. Sin embargo, el rendimiento del bioetanol podría mejorarse si aumentamos el rendimiento en la fermentación utilizando un microorganismo que nos ayude con ello, tal como la Saccharomyces cerevisiae.

La eficiencia del bioetanol respecto a la del etanol determinados con el motor Stirling es ligeramente menor, sin embargo podemos decir que el bioetanol de agave podría utilizarse en las mezclas con gasolina para disminuir el uso de combustibles fósiles y contribuir en la disminución de la contaminación ambiental.

Los biocombustibles representan en la actualidad una fuente potencial de energía renovable, además de que podrían generar nuevos y grandes mercados para los productores agrícolas lo cual forma parte de una estrategia competitiva a nivel mundial principalmente para países desarrollados. Es también una opción al uso de combustibles fósiles como el petróleo, cualquier camino que lleve a una reducción del consumo de energía no renovable choca en el camino lucrativo ya que la ganancia que obtienen miles de empresas es significativo, aumentan las oportunidades y desafíos para el desarrollo sustentable ofreciendo reducir el problema del cambio climático.

Se pretende incentivar a los países a buscar métodos alternos para generar su propia energía con el fin de mitigar la contaminación global. México interviene perseverante en el propósito de mejorar la calidad del medio ambiente con varios convenios que benefician considerablemente al país. Se debe considerar producir biocombustibles de materias primas que no formen parte importante de la alimentación de los mexicanos como el maíz, el cual se presenta como un gran problema y limitación ya tendría un gran impacto en los consumidores nacionales y los precios incrementarían considerablemente sobre algunos productos de la canasta básica.

Se requiere abordar varios temas sobre el comercio de biocombustibles y al desarrollo sustentable como las nuevas políticas que se implementaran en distintos países, las ventajas y desventajas que traerán consigo la promoción de estos, su eficiencia y el tiempo de uso.

El acceso a nuevas tecnologías permitirá la exportación de este tipo de energías alternas, en los cuales hay diferentes investigaciones para la producción de combustibles que aseguran su viabilidad especialmente para países pobres.

Palabras clave

Producción de Bioetanol, fermentación, destilación, Agave.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.J. Shmit, F. C. (2014). Bioetanol a partir del Maguey (Agave americana) y su prospectiva en México. Revista de Ciencia e Ingeniería del Instituto Superior de Coatzacoalcos, 75-81.
2. A.S. Castro Díaz, J. G. (2013). El agave y sus productos. México.
3. Alonso, S. M. (2014). ¿Combustible de nopal o maguey? Diario Xalapa.
4. Arcelia González Merino, Y. C. (2008). Biocombustibles, Biotecnología y alimentos. Impactos sociales para México. México.
5. (2013). Energía Alterna y Biocombustibles. En E. G. Arturo Pérez Vásquez, Innovación e investigación para un desarrollo sustentable (págs. 67-76). Editorial del Colegio de Postgraduados.
6. Bello, A. G. (Enero de 2015). Ley de Hidrocarburos: Asignaciones, Contratos, Reglamentos y mucho más.
7. Carlos Razo, S. A.-M. (Junio de 2007). Biocombustibles y su impacto potencial en la estructura agraria, precios y empleos en América Latina. Santiago, Chile.
8. Claudop R. Bernal B, J. D. (2008). Evaluación de una celda de combustible -DMFC- utilizando etanol, con miras a determinar la flexibilidad de las celdas y el uso eficiente de recursos energéticos. Revista: Educación en Ingeniería.
9. Fabiola Serna, L. B. (28 de Enero de 2011). Impacto social y económico en el uso de Biocombustibles. Journal og Tecnology Managment & Innovation.
10. Georgina Estrada, E. M. (2001). Obtención y caracterización de genes que codifican para la enzima alcohol deshidrogenasa a partit de la microbiota del pulque. México: Departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis, UNAM, instituto de Biotecnología.
11. Guerrero, A. V. (Diciembre de 2014). "Producción de biogas a partir de bagazo y vinaza del Agave angustifolia Haw generada como residuo en la elaboración de mezcal". Oaxaca, México.
12. IMPI: Estado de Oaxaca crean sinergias en materia de propiedad industrial. (2015). Obtenido de www.pymetec.gob.mx
13. Información institucional, acciones realizadas y propuesta de desincorporación. (2015). Obtenido de www.sagarpa.gob.mx, www.conacyt.mx
14. INIFAP: El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2015). Obtenido de www.inifap.gob.mx
15. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2015). Obtenido de www.inecc.gob.mx
16. Mario Cervantes Contreras, A. M. (2007). El pulque: características microbiológicas y contenido alcohólico mediante espectroscopia Raman. Publicación científica en Ciencias Biomédicas. Ticoman, México.
17. Martha Giles, M. C. (s.f.). Estudio de la diversidad bacteriana durante la fermentación del pulque, una aproximación polifásica. México.
18. Méndez Gallegos, R. A. (2011). Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey. Revista Salud Pública y Nutrición.

19. Michelle Chauvet, R. L. (2008). Biocombustibles y cultivos biofarmacéuticos: ¿oportunidades o amenazas? Red de revistas Científicas de América Latina.
20. Montero, J. A. (Agosto de 2011). Estudio de la combustión de un motor mono cilíndrico de ignición alimentado con mezclas gasolina- etanol anhidro e hidratado a distintas concentraciones. Veracruz, México.
21. OXFAM MÉXICO. (2016). Obtenido de www.oxfammexico.org
22. P.B., T. (2008). "The Agricultural ethics of Biofuels: A first look".
23. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 183-198.
24. Producción en México: El maíz, fuente de inspiración y Orgullo De México. (2015). Obtenido de www.sagarpa.gob.mx
25. RENE: Registro Nacional de Emisiones. (2016). Obtenido de http://www.semarnat.gob.mx/temas/cicc/registro-nacional-de- emisiones-rene
26. SCT: Secretaria de Comunicaciones y Transporte. (2013). Obtenido de www.sct.gob.mx
27. SENER: Secretaria de Energía. (2013). Obtenido de www.sener.gob.mx

Biodigestor Portátil

Nelson Ramírez Pascual

Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, Av. Universidad Tecnológica No.3051 Col.Lote Bravo II Cd Juárez, Chih. CP. 32695, Tel: 6-49-06-00, e-mail: nerap77@gmail.com

RESUMEN

EL proyecto es un biodigestor portátil , para la generación de biogás y cogeneración de electricidad para uso doméstico, dicho proyecto está diseñado para la pequeña producción del biogás para las regiones rurales más alejadas, de escasos recursos y de difícil acceso a dicho combustible ,en las regiones rurales, se cuenta con la biomasa, para el aprovechamiento de la misma ,lo que se tomó en cuenta para el diseño del biodigestor, fue el bajo costo y maniobrabilidad del equipo ,es una de las características principales, su diseño ergonómico e innovador en este proyecto aprovecharemos los compuestos orgánicos, Como materia prima, para producir biogás, se puede considerar la gallinaza, el estiércol de vaca y de puerco; aunque hoy en día se le puede adicionar substratos como: desechos vegetales, sub-productos de animales (Kirchmayr & Coautores, 2007) utilizando las heces del ganado bovino por medio de un proceso de descomposición anaeróbico, por el cual se lleva a cabo la generación del biogás, así como el aprovechamiento de la composta, la cual se puede usar como un biofertilizante natural rico en nutrientes para los cultivos.

El proceso se llevara en un contenedor de metal de 13 kg de capacidad aproximadamente el cual integrado con otros accesorios, previamente instalados, nos permitirá el ciclo de producción de biogás, para el uso humano.

ABSTRACT

The Project is a portable bio digester to be used in the generation of biogas, and the cogeneration of domestic electricity. The digester is designed for small biogas production in rural areas that lack economic resources, and have difficult access to such fuel. Rural areas can take advantage of the ready access to the biomass that can be used in gas production. Low cost was a key factor taken into account in the design of the bio digester, and maneuverability is one of its main characteristics. The innovative and ergonomic design gives us a chance to take advantage of organic compost. Chicken, bovine, and porcine feces can be used in the production of biogas, and today we can add vegetable waste, and sub-products of different animals (Kirchmayr & Coauthors, 2007). We used cattle feces, which through an anaerobic process produced biogas, and the remainder is to be used as a bio fertilizer, rich in nutrients for crops. Key Words (biogas, biodigester, organic, portable, production).

The process is to happen in a container with a 13Kg capacity, which along with other accessories previously installed, will allow a gas production cycle for human use.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años las poblaciones han crecido de manera considerable por lo que se tiene como consecuencia un mayor consumo de combustibles, puesto que estos forman parte fundamental para el desarrollo de los mismos.
El resultado del aumento de población trae como consecuencia el aumento en los precios de los combustibles; los costos crecientes y la disponibilidad, limitada de las fuentes de energía, adicionados a la dificultad de su distribución en los medios rurales más alejados y los altos costos hacen necesarios desarrollar métodos más eficientes y de bajo costo para reciclaje y aprovechamiento de las excretas, en este caso de ganado vacuno para la producción de combustible. Entonces el combustible es indispensable tanto para la vida como para el desarrollo de las sociedades actuales.
Los combustibles de hoy en día son derivados del petróleo, en su mayoría como la gasolina, los aceites, el gas LP, entre muchos otros. De estos combustibles el gas es uno de los más requeridos para la vida diaria de las personas.
En muchas de las zonas rurales es difícil poder satisfacer las necesidades básicas de combustible a causa de la falta de infraestructuras, la falta de mano de obra y por lo complicado que llega a ser la distribución en la zona ya sea por lejanía o por el difícil acceso, por esto el uso de un biodigestor es una forma sustentable de que las poblaciones de los lugares rurales más alejados, obtengan el gas combustible sin una gran la necesidad de hacer inversión.

MARCO TEÓRICO

Biodigestor Un biodigestor es un sistema sencillo de realizar, para solventar la problemática energética-ambiental, así como para realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales en este caso excretas de animales vacunos. En su forma sencilla es un recipiente (llamado reactor) el cual estará herméticamente cerrado y dentro del cual se depositara material orgánico como excremento y el material orgánico se pone a fermentar con cierta proporción de agua creando una pasta lodosa la cual se depositara en el biodigestor, produciendo gas metano y fertilizante orgánico rico en fósforo, potasio y nitrógeno. Para el caso de la biomasa, se pueden considerar la leña, los residuos agrícolas y animales, carbón vegetal y otros combustibles derivados de fuentes biológicas; a partir de ésta se puede producir biocombustibles como: biodiesel, bioetanol y biogás (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005).
En la siguiente tabla #1 se muestra la historia de investigación del biodigestor .fuente modificada de (abassi &colaboradores,2012)

Año	Investigador / País	Aportación
1881	Mouras	Aplicó el biodigestor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, lo denominó "Automatic Scavenger"
1895	Cameron	Construyó un tanque similar al de Mouras pero con mejor eficiencia de tratamiento. Una parte del biogás se utilizaba para calor e iluminación.
1895-1969	Varios	Se desarrollo de tecnología para la estabilización de los lodos de las aguas residuales domésticas, como calentadores y mezcladores. Diseño de biodigestores para utilizar estiércol.
1944-1945	Alemania del Oeste	Surge la idea de utilizar desechos agrícolas como materia prima, así como desarrollar diferentes tipos de biodigestores
1950's	Francia	Instala más de 1,000 biodigestores anaerobios, desde tanques cubiertos hasta sistemas complejos
1960's	Canadá, EUA y Europa del Oeste	La principal materia prima para el biodigestor es el estiércol de animales
1967	¿?	Se introduce el concepto de Filtro Anaeróbico
1970's	Varios	Se aplica sistemas de biodigestión en tratamiento de aguas industriales, propiciado por el incremento del precio del petróleo

Fuente: Adaptada de (Abbasi & Colaboradores, 2012)

El proceso de biodigestión. se produce, ya que existen diferentes tipos de microorganismos bacterianos anaeróbicos en los excrementos que al actuar en el material orgánico y las condiciones de temperatura combinado con la falta de oxígeno, se produce una mezcla de gases (con alto contenido de metano) al cuál se le llama biogás, el cual es un combustible y el resultado de este proceso genera una composta con un alto grado de contenido de nutrientes el cuál puede ser utilizado como fertilizante , ya que por el tratamiento anaeróbico, las bacterias son eliminadas reduciendo las proliferación de enfermedades y malos olores ,la utilización de biodigestores es una de las soluciones ecológicas, sustentable para dejar la dependencia del gas l.p como un combustible de uso diario ,de igual manera aprovechando la composta resultante como biofertilizante rico en nutrientes y reduciendo la emisión de co2 al medio ambiente..

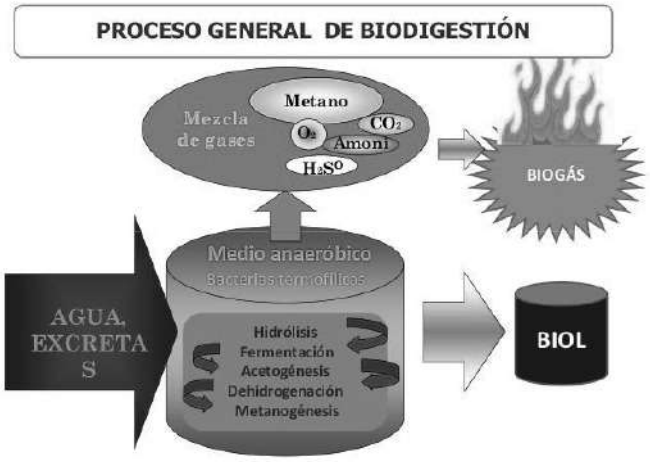


imagen #1 describe el proceso general de biodigestión fuente modificada. (Cotrina 2011).

Producción de biogás
El material (excretas) que ingresan y abonan el Biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre hacia el interior del biodigestor, por medio del calor y el proceso anaeróbico, transforma la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se produce el biogás.

Biodigestión
La fermentación realizada por bacterias anaerobias sobre la materia orgánica que posee las siguientes ventajas:
-generar el combustible (biogás) para abastecer y suplir las necesidades energéticas rurales.
-Reducir los niveles de contaminación ambiental al convertir mediante un proceso, las excretas de origen animal las cuales proliferan microorganismos patógenos, larvas e insectos, en residuos útiles que generan biogás y biofertilizante rico en nutrientes.
Digestores anaeróbicos
Para la producción de biogás se pueden emplear distintos materiales orgánicos tales como desechos vegetales, excretas, basura doméstica, algas, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, papel.
Durante la bioconversión de los materiales orgánicos a metano las distintas etapas tienen distintos tiempos: la degradación de la celulosa ocurre en semanas, la de las hemicelulosas y proteínas en días y la de las moléculas pequeñas, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, en horas, pero la lignina no es degradada en la mayoría de los sistemas de digestión anaeróbica.

Fuente. www.feriadelasciencias.**unam**.mx(2004)

DESARROLLO.

El proceso de fabricación es sencillo ya que por su diseño y maniobrabilidad es bastante practico, se utilizaron diferentes materiales en la elaboración del biodigestor el contenedor principal es un tanque de refrigerante de (13kg) reciclado ,el cual fue donado por una empresa local ,se utilizaron ,conexiones de tuberías negra , pvc en diferentes medidas ,así como 3 válvulas de cierre, apertura y una unidad de mantenimiento la cual sirve como sistema de seguridad, todos estos materiales se integraron y se compararon los precios, en las diferentes casas ferreteras , los miembros del equipo realizaron la mano de obra, por lo cual no tuvo costo alguno en la integración de los materiales.

La tabla No.1 se muestra la lista de materiales utilizados.

Lista de Materiales

	Equipo	Cantidad	Costo Unitario
1.	manómetro 2'' ¾'' 30 psi.	1pza	$305.00 pesos
2.	Bush negro 1'' ½'' x 1'' ¼''	1pza	$44.00 pesos
3.	camp pvc 4''x2'' (embudo)	1pza	$73.00 pesos
4.	niple negro 1'' 1/2''	1pza	$27.00 pesos
5.	cinta teflón 1'' x 520''	1pza	$10.00 pesos
6.	llave de paso 2''	2pza	$355.00 pesos
7.	tanque de gas refrigerante	2pza	donación
8.	manguera smc de m10	1mt	$5.00pesos
9.	unidad de mantenimiento	1pza	donación

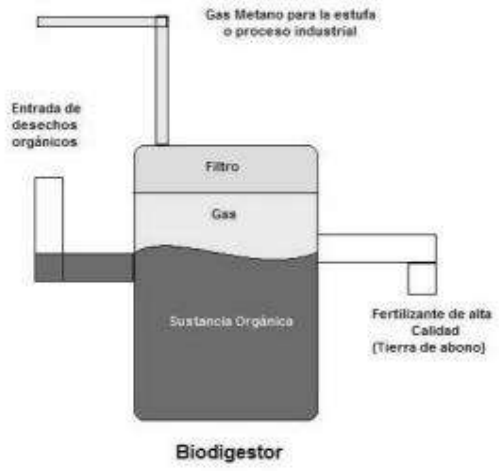


Imagen # 2 describe el biodigestor fuente modificada López (2012)

RESULTADOS

- Los objetivos planteados son cumplidos en las diferentes etapas del proyecto puesto que se realiza el prototipo de biodigestor y se puso en funcionamiento**.**

- El biodigestor se construyó y el gas se empezó a generar ya que el globo empezó a inflarse gradualmente al paso de los días.

- El gas que se acumuló en el globo fue capaz de encender por unos momentos una flama de una estufa convencional.

- El efluente que sale del el biodigestor puede usarse como biofertilizante en cultivos y plantas de ornato ya que es rico en nutrientes, y durante el proceso anaeróbico de biodigestión, los gases tóxicos fueron ocupados por lo que es un abono totalmente seguro y no toxico amigable con el ambiente y los seres vivos.

Para estimar la producción de biogás se tiene la siguiente formula fuente modificada
(De La Merced 2012)

Fórmulas para la estimación de producción de biogás

(1) $Epb = S*MS*MOS*MaxR$

Dónde:

Epb=estimación de la producción de biogás cm3

S= es la cantidad de materia prima kg

MS=materia seca en la materia prima %

MOS=materia orgánica seca en la materia prima %

MaxR=producción máxima especifica de biogás (cm3/kg de MOS)

CONCLUSIONES

El funcionamiento del prototipo del biodigestor funciono al conseguir los resultados de generación de biogás, sin embargo estos no se obtuvieron de manera sencilla ni con los resultados ,que se esperaban ya que se tuvieron algunos imprevistos en la integración de los materiales para el del biodigestor, tomando en cuenta que el proceso de biodigestión de la materia orgánica es lento ya que intervienen diferentes factores como temperatura, humedad, clima y las condiciones propias del mismo biodigestor.
Pero aún con estos factores fue posible la generación de biogás a partir de desechos orgánicos (excretas vacunas), que sirvió para demostrar que es posible poder sustituir el gas LP y darle diferentes usos en este caso para la cocción de alimentos.
Pero principalmente aplicarse a comunidades rurales en donde por diversos factores ya sea socioeconómico y de infraestructura no se tiene acceso a la distribución de gas convencional. Para los próximos años se espera un aumento en la producción de biogás aprovechando las grandes cantidades de residuos animales que se generan y que actualmente no se utilizan. Este combustible es capaz de sustituir o usarse a la par con los combustibles fósiles, en las aplicaciones diarias con sencillas modificaciones en el sistema de combustión, disminuyendo así la dependencia de combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA

Abbasi, T., & Colaboradores. (2012). *Biogás Energy* (Primera ed., Vol. 2). Springer.

Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS. (2005). *Planning and Installing Bioenergy Systems: A guide por installers, architects and engineers.* UK: James & James.

De La Merced (2012). Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continúo.

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana.

López López (2012) Diseño, Construcción y Evaluación de un filtro intermitente de arena. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería.

Cotrina Lezama (2011) Biodigestores Tubulares Unifamiliares. Aplicación de la tecnología en la región de Cajamarca.

Feria de Las Ciencias UNAM (2004) .www.feriadelasciencias.**unam**.mx

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CASCADA R502 – R717 EMPLEANDO EL SOFTWARE ASPEN HYSYS.

Emilio Hernández Martínez[1], Benjamín González Vizcarra[3], Gabriela A. Moreno Rueda[4] e Irwin Moses Macías Rodríguez[5]
Programa Educativo de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01-(664)-676-8222,
emilio.hernandez.martinez@uabc.edu.mx, bgonzalez79@uabc.edu.mx, moreno.gabriela25@uabc.edu.mx, irwin.macias@uabc.edu.mx.

María del Carmen Prieto Avalos[2]
Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44 Mexicali, Baja California, 21280, México. 01-(686)-566-4270, **a168960@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

En este estudio se presenta un análisis termodinámico de un sistema de refrigeración en cascada que utilizando R502 como refrigerante en el circuito de baja temperatura y R717 en el circuito de alta temperatura, diseñado para aplicaciones industriales que requieren temperaturas por debajo de los -30 °C y superiores a los 100 °C. Los parámetros de operación que se consideran en este documento incluyen el vapor saturado a la salida de cada evaporador y liquido saturado a la salida de cada condensador en el circuito de alta temperatura R717 y en el circuito de baja temperatura R502. Se han obtenido diagramas de parámetros de operación frente a los coeficientes de operación y consumo de potencia neta de los compresores. Además, de los valores de operación de los refrigerantes R502-R717 para el sistema de refrigeración en cascada, se comparan con los valores obtenidos para un sistema de refrigeración en cascada con otros refrigerantes. Los resultados muestran que el sistema en cascada R502-R717 es una alternativa interesante para proporcionar baja temperatura de -45 °C y alta temperatura de 150 °C con un consumo de potencia baja y COP considerablemente elevados para refrigeración y calefacción en una bomba de calor.

ABSTRACT

This case of study shows a thermodynamic analysis in a waterfall refrigeration system using R502 as refrigerant in a low temperature system and R717 in a high temperature system, designing for industry applications that requires temperatures below -30 °C and above 100 °C. The operation parameters that were considered in this document includes saturate water steam at the exit of each evaporator and saturate liquid at the exit of each condenser in the R717 high temperature circuit and in the R502 low temperature circuit. They were obtained diagrams of the operation parameters against the operation coefficients and the net power consume of the compressors. Besides, the values of operation of the refrigerants R502-R717 for the waterfall refrigeration system, compare with the values obtain for a waterfall refrigeration system with other refrigerants. The results shows that the waterfall system R502-R717 is an interesting alternative to proportionate a temperature as low as -45 °C and as high as 150 °C with a low power consume and a COP considerable high for cooling and heating in a heat pump.

Palabras claves: Refrigeración en cascada, simulación, termodinámica, HYSYS, R502, R717, COP_R, y COP_{BC}.

INTRODUCCIÓN

La refrigeración puede ser definida como el proceso por el cual la energía térmica se extrae de un espacio de temperatura más baja y se desecha a un espacio de temperatura relativamente alta mediante un sistema termodinámico. El término de refrigeración implica el mantenimiento y la producción de temperatura por debajo de los alrededores en un espacio. Esto se hace posible por la absorción de energía en una zona de baja temperatura y la liberación de la misma a una zona de alta temperatura. El proceso generalmente se lleva a cabo por evaporación de un líquido (refrigerante) que tiene una baja temperatura de saturación a la presión de evaporación y devolver el vapor a su estado líquido original para la re-evaporación para continuar el proceso.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. Se compone de cuatro procesos:

- Compresión isentrópica en un compresor.
- Rechazo de calor a presión constante en un condensador.
- Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

Ciclo ideal de refrigeración

- Estado1: Entrada al compresor como vapor saturado $x_1=1$ a una temperatura o presión establecida por el evaporador.
- Estado 2: Salida del compresor isentrópico $s_2=s_1$ a una temperatura o presión establecida por el condensador.
- Estado 3: Salida del condensador como liquido saturado $x_3=0$ a una temperatura o presión establecida por el condensador.
- Estado 4: Salida de la válvula de expansión isentálpica (tubo capilar) $h_4=h_3$ a una temperatura o presión establecida por el evaporador.

El **Ciclo real de refrigeración** por compresión de vapor difiere de la idealidad en varios aspectos:

- Irreversibilidades que se presentan en los componentes que conforma dicho ciclo. Principalmente debida a la caída de presión causada por la fricción del fluido y la trasferencia de energía (pérdida o ganancia de calor) de los alrededores.
- No es posible controlar con tanta precisión las propiedades del refrigerante a la salida del evaporador, ocasionando un ligero sobrecalentamiento de este mismo, que a su vez permite asegurar que el refrigerante se evapore en su totalidad antes de entrar al compresor, evitando que se dañe.
- El proceso de compresión real incluirá efectos de fricción, los cuales incrementan la entropía y la transferencia de calor, lo que produce cambios en la entropía.
- A la salida del condensador se complica realizar la condensación como liquido satura, en consecuencia, el refrigerante se subenfría un poco antes de entrar a la válvula de expansión.

En algunas aplicaciones a niveles industriales se requieren temperaturas moderadamente bajas o muy bajas y el intervalo de temperatura ΔT que involucran es considerablemente grande para poder ser logrado por un ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor. Los ΔT grandes representan igualmente un gran nivel de presión en el ciclo, ocasionando un pobre desempeño en el compresor. Una forma de compensar esta situación en el compresor es efectuar el proceso de refrigeración en múltiples etapas, es decir, tener dos o más ciclos de refrigeración que operan en serie. A este proceso se conoce como ciclos de refrigeración en cascada.

La figura 1 muestra un ciclo de refrigeración en cascada de dos etapas. El ciclo A y ciclo B se conectan por medio de un intercambiador de calor en medio, el cual sirve como el evaporador para el ciclo superior ciclo A y como el condensador en el ciclo inferior ciclo B. La transferencia de calor del fluido en el ciclo B debe ser igual a la transferencia de calor del fluido en el ciclo A, en condiciones ideales de operación.

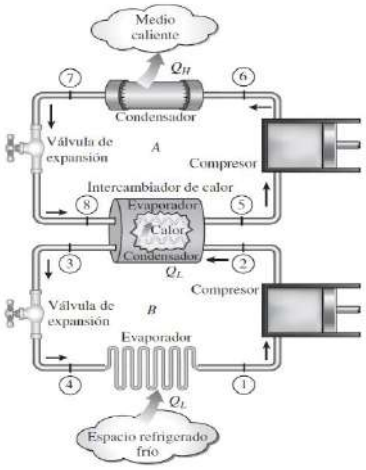


Figura 1. Ciclo de refrigeración en cascada.

En los ciclos de refrigeración en cascada los fluidos de trabajo (refrigerantes) en el ciclo A y ciclo B pueden ser diferentes ya que no existe mezcla en el intercambiador de calor. Consecuentemente, los refrigerantes seleccionados poseen las características más favorables para la aplicación deseada. Idealmente cada fluido tiene su curva de saturación, mientras que en los sistemas reales de refrigeración en cascada, las dos curvas de saturación de los ciclos se traslaparían un poco debido a que se requiere una diferencia de temperatura entre los dos fluidos para favorecer la transferencia de calor.

Para los ciclos de refrigeración en cascada el trabajo del compresor se reduce y la cantidad de calor absorbido en la zona de baja temperatura aumenta como resultado de las etapas en cascada. Por consiguiente, el sistema en cascada mejora el COP de un sistema de refrigeración.

ANTECEDENTES

El ciclo de refrigeración en cascada que consta de dos ciclos de refrigeración diferentes fue introducido en la década de 1930 para satisfacer la demanda de refrigeración de baja temperatura que se requiere en el intervalo de temperatura de -100 °C a -30 °C en los diversos procesos industriales. El sistema de cascada puede resolver diferentes problemas que se presentan por la relación de presión alta en los sistemas de

refrigeración a baja temperatura (Hansaem et al., 2013). Por cierto, esta ventaja de los ciclos de refrigeración en cascada se puede utilizar para el calentamiento de agua por medio de una bomba de calor.

En el proceso de introducción y el diseño de un sistema de cascada, una de las cuestiones más importantes es encontrar una temperatura intermedia de operación óptima, que es la temperatura de evaporación de un ciclo de alta temperatura (Ciclo A) o la temperatura de condensación de un ciclo de baja temperatura (Ciclo B), para obtener el mejor desempeño del sistema. La investigación en la optimización de una temperatura intermedia de los sistemas de cascada se ha realizado por muchos investigadores con diversos sistemas de cascada. (Bhattacharyya et al., 2005) llevaron a cabo el análisis numérico de un sistema de cascada CO_2-C_3H_8 para la eficiencia de los componentes, tales como compresores e intercambiadores de calor.

Basándose en el modelado matemático, calcularon el rendimiento del sistema de acuerdo con diversos parámetros y establecieron algunas correlaciones para encontrar la temperatura intermedia óptima y máxima COP. (Lee et al., 2006) estudiaron la optimización de un sistema de cascada CO_2-NH_3 con un proceso similar. Emplearon algunas ecuaciones sobre la frecuencia del compresor y el concepto de exergía en su análisis. También se proponen las correlaciones polinomiales para la estimación de la temperatura y la COP óptimo.

Getu, Bansal y Dopazo también investigaron un sistema de refrigeración CO_2-NH_3 con un análisis numérico para encontrar las condiciones óptimas. Sus resultados finales fueron algunas correlaciones para las condiciones óptimas también. Proporcionó el método simple para la predicción de la temperatura y el COP óptimo, existían algunas dudas sobre si esas correlaciones se aplicaron también a una situación real y otros sistemas (Hansaem et al., 2013).

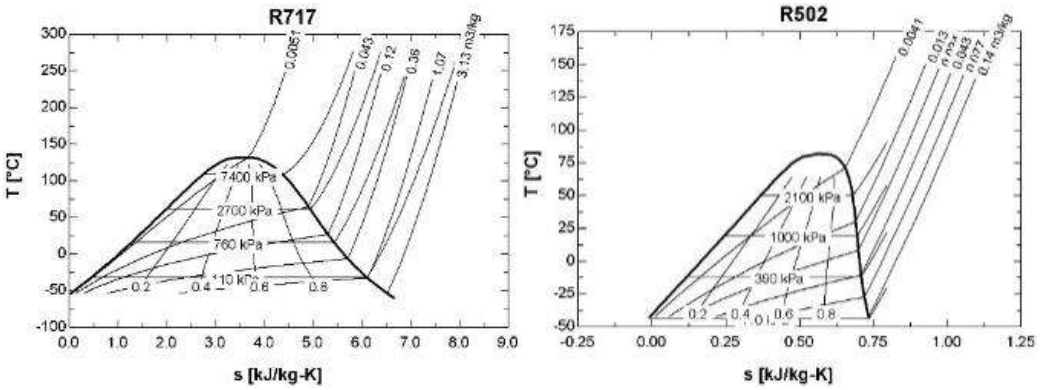
Recientemente, Dopazo y Fernández-Seara llevaron a cabo la evaluación experimental de un sistema de cascada CO_2-NH_3 mediante la construcción de un prototipo. Compararon su resultado, que era la temperatura intermedia óptima, con los datos calculados a partir de las correlaciones existentes que fueron propuestas por algunos autores antes mencionados. Como resultado, encontraron que había diferencias entre 1 y 3 por ciento (Hansaem et al., 2013).

Por lo tanto, la presente investigación, consiste en la utilización del Software Aspen HYSYS para la obtención de las condiciones óptimas de operación de un ciclo de refrigeración en cascada que emplea como fluido de trabajo R502-R717 que dé como resultado los coeficientes de operación COP máximo, con un consumo de potencia $\dot{\omega}_{neta}$ mínima. Además, la investigación sentará las bases para el desarrollo del prototipo experimental que se realizará a mediano plazo para validar los resultados de la simulación.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de cascada que se analizará es una bomba de calor reversible para satisfacer las necesidades de refrigeración y calefacción en procesos industriales, favoreciendo la obtención de agua caliente de servicio superiores a los 100 C y una capacidad de enfriamiento por debajo de los -30 C. Por lo tanto, R717 se emplea como refrigerante del circuito de alta temperatura ciclo A, ya que este refrigerante es clasificado como un refrigerante de alta temperatura. Mientras, que el R502 se emplea como refrigerante del circuito de baja temperatura ciclo B, por su clasificación como refrigerante de baja temperatura.

Los diagramas T-s del refrigerante R717 y R502 se presentan en la figura 2 a) y figura 2 b) respectivamente.



a) b)

Figura 2. Diagrama T-s R717

La figura 3 representa el sistema de refrigeración en cascada R502-R717. En el intercambiador de calor, el R717 se evapora y se condensa R502 al transferir su calor entre sí.

ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Dado que el sistema de cascada original es demasiado complejo, algunas suposiciones son necesarias para simplificar el análisis termodinámico. Por lo tanto, el análisis se lleva a cabo sobre la base de las siguientes suposiciones que se utilizan a menudo en el análisis termodinámico de los ciclos en cascada:

- Todos los componentes se supone en estado estacionario. $\sum_{entradas} \dot{m}_e = \sum_{salidas} \dot{m}_s$
- Los cambios de energía cinética y energía potencial en todos los componentes se consideran insignificantes. $\left[\frac{\vartheta_s^2-\vartheta_s^2}{2}\right]=0$, $g(z_s-z_e)=0$
- Los compresores de circulación de alta y baja temperatura se consideran no isentrópica, con una eficiencia isoentrópica de 93 %.
- La pérdida de calor y caídas de presión en las tuberías que conectan los componentes son insignificantes.
- Los dispositivos de estrangulamiento son isoentálpica.
- Los estados de salida del condensador y el condensador en la cascada se consideran líquido saturado.
- Los estados de salida del evaporador y el evaporador en la cascada se consideran vapor saturado.

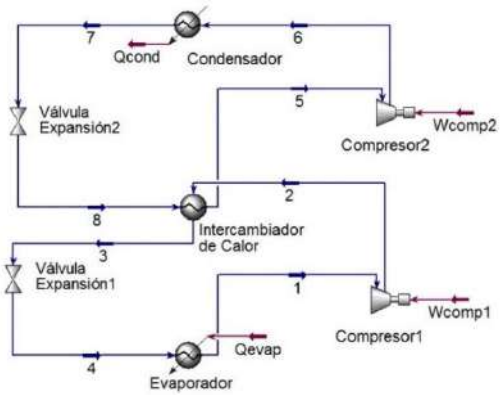


Figura 3. Sistema de refrigeración en cascada

Originalmente, la variable de objeto de este análisis es la optimización del COP del sistema en cascada. Sin embargo, para el cálculo de coeficiente de operación en modo refrigeración COP_R se realiza con la ecuación 1 y 2, la cual depende directamente del calor extraído $\dot{q}_L$ en la zona de baja temperatura y la potencia requerida en el compresor $\dot{w}_{neta}$. Mientras, que en el modo de calefacción el cálculo del coeficiente de operación COP_{BC} se expresa en la ecuación 3 y 4, la cual depende directamente del calor desechado $\dot{q}_H$ en la zona de alta temperatura y la potencia requerida por el compresor $\dot{w}_{neta}$. Así mismo, la potencia del compresor puede determinarse por la ecuación 5, que consiste en la resta del calor desechado menos el calor extraído, como se puede apreciar al final del análisis la investigación se centra en la determinación de $\dot{q}_L$ y $\dot{q}_H$ (Hansaem et al., 2013) y (Messineo, 2012).

$$COP_R=\frac{\dot{q}_L}{\dot{w}_{neta}}=\frac{\dot{q}_L}{(\dot{w}_{ciclo A}+\dot{w}_{ciclo B})} \quad (1)$$

$$COP_R=\frac{\dot{q}_L}{(\dot{q}_H-\dot{q}_{cas})+(\dot{q}_{cas}-\dot{q}_L)}=\frac{1}{\left(\frac{\dot{q}_H}{\dot{q}_L}\right)-1} \quad (2)$$

$$COP_{BC}=\frac{\dot{q}_H}{\dot{w}_{neta}}=\frac{\dot{q}_H}{(\dot{w}_{ciclo A}+\dot{w}_{ciclo B})} \quad (3)$$

$$COP_{BC}=\frac{\dot{q}_H}{(\dot{q}_H-\dot{q}_{cas})+(\dot{q}_{cas}-\dot{q}_L)}=\frac{1}{1-\left(\frac{\dot{q}_L}{\dot{q}_H}\right)} \quad (4)$$

$$\dot{w}_{neta}=(\dot{q}_H-\dot{q}_{cas})-(\dot{q}_{cas}-\dot{q}_L)=\dot{q}_H-\dot{q}_L \quad (5)$$

Dada las simplificaciones al sistemas en cascada antes mencionadas las tasas de transferencia de calor en el condensador $\dot{q}_H$, evaporador $\dot{q}_L$ e intercambiador de calor $\dot{q}_{cas}$ se pueden obtener con un simple cálculo, que se expresan en la ecuación 6, ecuación 7 y ecuación 8 respectivamente (Lee et al., 2006) y (Bhattacharyya et al., 2005)

$$\dot{q}_H=\dot{q}_{evap}=m_{R717}(h_6-h_7) \quad (6)$$

$$\dot{q}_L=\dot{q}_{cond}=m_{R502}(h_1-h_4) \quad (7)$$

$$\dot{q}_{cas}=m_{R502}(h_2-h_3)=m_{R717}(h_5-h_8) \quad (8)$$

Por otra parte, usando el hecho de que toda la energía se conserva en un intercambiador de calor en cascada, donde los refrigerantes intercambian su calor uno al otro (R502 sede la energía al R717), la ecuación 8 se utiliza para la determinación de la masa en el sistema en cascada.

SIMULACIÓN TERMODINÁMICA

La simulación termodinámica es el estudio de un sistema o de sus partes mediante el análisis de sus propiedades termodinámicas, representación matemática y/o su modelo físico. El diseño y operación de un ciclo de refrigeración en cascada se facilita cuando se emplea un modelo termodinámico que simule adecuadamente el proceso en condiciones normales o fuera de éstas de operación. Inclusive, se pueden encontrar las condiciones de operación prohibidas para el sistema.

La simulación del ciclo de refrigeración en cascada se realizó utilizando el simulador de procesos HYSYS de Aspen Technology, Inc. (Aspen Technology, Inc., 2015). Dicha simulación opera en ambiente Windows con la intención de generar una interfaz amigable al usuario así como disponer de diversas herramientas de optimización, así mismo, una amplia gama de fluidos de trabajo, ecuaciones de estado, propiedades termodinámicas y la secuencia de simulación se basa en la metodología de cálculos termodinámicos para ciclos de refrigeración; Aspen HYSYS cuenta con ventana individual de captura de las diferentes variables de estado, dispositivos termodinámicos y tablas de resultados (Sittler, & Ajikutira, 2015). Sus predicciones se han comparado con diversos proyectos de investigación de casos reales, generando resultados muy similares a la realidad (Vélez, Chejne, & Quijano, 2014).

En la figura 3 se muestra la simulación del sistema en cascada, que cumple con las especificaciones del análisis termodinámico mencionado en la sección anterior.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 1. La tabla muestra el $\dot{m}_1$, $\dot{\omega}_{neta}$, $\dot{q}_{evap}$, $\dot{q}_{cond}$, COP_R y COP_{BC} de las doce combinaciones de fluidos de trabajo para el sistema de refrigeración bajo las mismas condiciones de operación $T_1=T_4$=-45 C, T_7=40 C, $\Delta T=(T_3-T_8)$=5 C y $\dot{m}_1$=0.15 $\frac{kg}{s}$. También se muestra la figura 7 donde se aprecia el comportamiento de $\dot{\omega}_{neta}$, COP_R y COP_{BC}.

Tabla 1. Cargas de refrigeración y calefacción por unidad de área

Sistema de Refrigeración en Cascada						
Refrigerantes	$\dot{m}_5$	$\dot{\omega}_{neta}$	$\dot{q}_{cond}$	$\dot{q}_{evap}$	COP_R	COP_{BC}
R502-R134a	0.191	12.226	33.680	21.450	1.754	2.755
R600-R134a	0.482	30.706	85.04	54.33	1.769	2.769
R600a-R134a	0.593	38.200	104.600	66.370	1.737	2.738
R1150-R134a	0.370	24.989	62.250	40.260	1.611	2.491
R170-R134a	0.449	29.293	79.230	49.930	1.705	2.705
R744-R134a	0.344	23.268	60.650	37.390	1.607	2.607
R744-R717	0.042	22.098	59.480	37.390	1.692	2.692
R502-R717	0.023	11.578	33.030	21.450	1.853	2.853
R600-R717	0.059	29.076	83.400	54.330	1.869	2.868
R600a-R717	0.073	36.190	102.600	66.370	1.834	2.835
R1150-R717	0.045	23.739	64.000	40.260	1.696	2.696
R170-R717	0.055	27.773	77.700	49.930	1.798	2.798

Para dichas simulaciones el sistema en cascada con R502-R717 generan un consumo de potencia por compresión más bajo, el cual corresponde a $\dot{\omega}_{comp1}$=3.404 kW y $\dot{\omega}_{comp2}$=8.174 kW. Así mismo, mientras que para el COP estos refrigerantes representan la segunda opción más favorable con un COP_R=1.853 y COP_{BC}=2.853 (figura 4), ligeramente por debajo del sistema de refrigeración en cascada con R600-R717 con un COP_R=1.868 y COP_{BC}=2.868, pero estos refrigerantes requieren un consumo de potencia de $\dot{\omega}_{comp1}$=7.378 kW y $\dot{\omega}_{comp2}$=14.720 kW que representa hasta un 50 % más en el consumo de compresión con respecto al R502-R717.

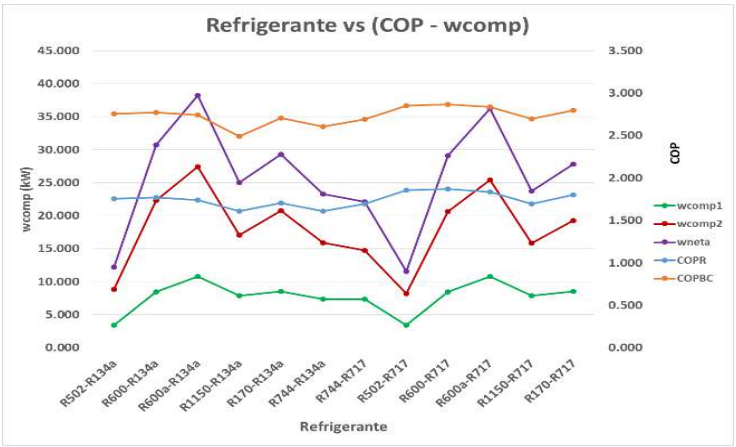


Figura 4. Aspen HYSYS

CONCLUSIONES

En esta investigación, se llevó a cabo el análisis termodinámico de un sistema de refrigeración en cascada, como aplicación de bomba de calor reversible utilizando el Software Aspen HYSYS para la obtención de las condiciones óptimas de operación de un ciclo de refrigeración en cascada que emplea como fluido de trabajo R502-R717, obteniéndose como resultado los coeficientes de operación COP máximo, con un consumo de potencia $\dot{\omega}_{neta}$ mínima. Las siguientes conclusiones se han derivado de los resultados analizados en disco sistema:

Bajo las mismas condiciones de operación $T_1=T_4=-45$ C, $T_7=40$ C, $\Delta T=(T_3-T_8)=5$ C y $\dot{m}_1=0.15\ \frac{kg}{s}$, se analizaron una serie de refrigerantes para ser comparado con la combinación de R502-R717, sin embargo la combinación antes mencionada es la única que cumple con los objetivos de la investigación de maximizar el COP ($COP_R=1.853$ y $COP_{BC}=2.853$) y minimizando la potencia de compresión $\dot{\omega}_{neta}$ ($\dot{\omega}_{comp1}=3.404$ kW y $\dot{\omega}_{comp2}=8.174$ kW), produciendo una temperatura de enfriamiento y de calentamiento de -45 °C y 150 °C respectivamente. El siguiente paso de esta investigación es el estudio experimental, que consistes en el diseño y construcción de un sistema en cascada en el taller de maquinado de Ingeniería Mecánica de ECITEC para realizar la validación del análisis termodinámico.

REFERENCIAS

P. Hansaem, K. Dong Ho, K. Min Soo, “Thermodynamic analysis of optimal intermediate temperatures in R134a-R410A cascade refrigeration systems and its experimental verification”. Applied Thermal Engineering 54. 2013. Pag 319-327.

S. Bhattacharyya, S. Mukhopadhyay, A. Kumar, R.K. Khurana, J. Sarkar, “Optimization of a CO2-C3H8 cascade system for refrigeration and heating”. International Journal of Refrigeration 28. 2005. Pag 1284-1292.

T. Lee, C. Liu, T. Chen, “Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO2/NH3 cascade refrigeration systems”. International Journal of Refrigeration 34. 2006. Pag 1100-1108.

S. Bhattacharyya, S. Mukhopadhyay, A. Kumar, R.K. Khurana, J. Sarkar, “Optimization of a CO2–C3H8 cascade system for refrigeration and heating”. International Journal of Refrigeration 28. 2005. Pag 1284-1292.

A. Messineo, “R744-R717 Cascade Refrigeration System: Performance Evaluation compared with a HFC Two-Stage System”. Energy Procedia 14. 2012. Pag 56-65.

F. Vélez, F. Chejne, A. Quijano, “Análisis termodinámico del R134a en un Ciclo Rankine Orgánico para la generación de energía a partir de fuentes de baja temperatura”. DYNA 81. 2014. Pag 153-159.

L. Sittler, D. Ajikutira, “Jump Start: Aspen HYSYS V8.0”. Aspen Technology, Inc., 2015.

http://www.aspentech.com/products/aspen-hysys/. EnergyPlus Energy Simulation Software, 2015.

TRANSFORMADOR DE CALOR POR ABSORCIÓN MAXIMIZANDO SU AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Karla Varela-Martínez
Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C. P. 62209, Cuernavaca, Morelos, México.
Tel./Fax (777) 3297084. **karla.varelamar@uaem.edu.mx**

Armando Huicochea Rodríguez, José Alfredo Hernández Pérez, David Juárez Romero
CIICAp, UAEM. **huico_chea@uaem.mx**

Javier Siqueiros Alatorre
Secretaria de Innovación, Ciencia y Tecnología, Morelos, Av. Atlacomulco No. 13, Col. Acapantzingo, 62440 Cuernavaca, Morelos, México.

Gabriela Socorro Álvarez García
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET-DGEST-SEP), Prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP 62490, México.

RESUMEN

La revalorización del calor de desecho o fuentes renovables (solar o geotérmica) se puede llevar a cabo con un Transformador de Calor por Absorción (TCA), el cual desarrolla un ciclo termodinámico mediante cuatro intercambiadores de calor (IC´s) y una solución de trabajo. La investigación sobre los IC´s son relevantes para mejorar el desempeño del TCA, tales como: maximizar su eficiencia, prolongación de vida útil, así como la disminución de costos de inversión y operación.

El grupo de térmica del CIICAp-UAEM tiene como un objetivo el estudio teórico y experimental de un TCA de 2 kW compacto. En la primera etapa, se han diseño dos IC´s con serpentines helicoidales anidados, para operar por película descendente en un solo nivel de presión, a fin de maximizar el área de transferencia de calor y disminuir el área de instalación.

El diseño del condensador y generador fue considerando parámetros de operación de un simulador termodinámico, usando agua y bromuro de litio-agua. Para el primero, se calculó una U de 1246 W/m^2 °C para una potencia térmica de 2 kW. Su área de transferencia de calor fue de 0.582 m^2 y un volumen de 0.013 m^3. Mientras que para el Generador se calculó una U de 420 W/m^2 °C considerando la misma potencia térmica y una solución de trabajo. Su área de instalación es de 0.640 m^2 con un volumen de 0.016 m^3. La segunda etapa del proyecto consistirá en la construcción total del TCA, para después obtener los primeros resultados experimentales

ABSTRACT

An attractive alternative to upgrade the waste heat from industrial processes and renewable energy (solar or geothermal) is to use an Absorption Heat Transformer (AHT), which develops a thermodynamic cycle through four heat exchangers. An absorbent and a refrigerant are used as a working solution in whole system. Research on HEX's (maximizing efficiency, longer life and reduce the investment and operating costs) are relevant to improve the performance about an AHT.

The applied thermal engineering group from the CIICAp-UAEM studies the theoretical and experimental performance about a compact AHT of 2 kW. As a first stage, two HE's with nested helical coils have been designed to operate by falling film, considering one level of pressure in order to maximize the heat transfer area and to decrease its installation area.

The data from a thermodynamic simulator were used to design the condenser and the generator, using water and lithium bromide-water. For the former, a U of 1246 W/m^2 °C with 2 kW is calculated. Its area of heat transfer is equal to 0.582 m^2 and a volume of 0.013 m^3. For the generator, the U was of 420 W/m^2 °C, taking account the same thermal power and LiBr-water as working solution. Its heat transfer area is of 0.016 m^3. The following stage will cover the whole building of the AHT, for later to obtain the first experimental results.

INTRODUCCIÓN

Debido a la gran demanda de energía primaria (combustibles fósiles) para satisfacer las necesidades energéticas, se está llegando a su agotamiento y limitación de reservas. Además de su agotamiento, el principal problema es el impacto ambiental que trae su uso como fuente más importante de conversión de energía, que conlleva al deterioro de la capa de ozono, el agotamiento del ozono estratosférico, y la lluvia ácida (Kalogirou, 2004).

Dependiendo de la eficiencia de conversión de energía de los procesos, una cantidad de la aportación inicial de la energía primaria se libera al medio ambiente en forma de calor. La razón principal de que esta energía sea descargada es debido a su baja temperatura, ya que las planta industriales no pueden utilizarla en algún otro proceso de calentamiento. La recuperación de estas energías no utilizadas (calor de desecho o energías renovables) y la posibilidad de volver a utilizarla para diferentes fines permite aumentar la eficiencia global de estos sistemas de energía, se utilizan por lo tanto, menos recursos de energía primaria. (Massimiliano, et al., 2013)

Hoy en día, muchos países están invirtiendo grandes cantidades de dinero en el desarrollo de equipos que facilitan la recuperación y el uso eficiente de la energía. Algunos de los dispositivos más interesantes para el ahorro de energía, que consumen cantidad insignificante de energía primaria, son los TCA, elevando los niveles de temperatura que van a reciclarse en aplicaciones industriales (Donnellan, 2014)

Descripción del Transformador de Calor por Absorción

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático de un transformador de calor por absorción considerando la presión contra la temperatura. Este equipo térmico consiste en cuatro intercambiadores de calor: generador, evaporador, condensador y el absorbedor. Un absorbente y un refrigerante se utilizan como par de trabajo en todo el sistema. El absorbente pasa por el generador y el absorbedor como fase líquida, mientras que el refrigerante pasa a través de todos los componentes como fases líquidas o de vapor. El TCA se activa al suministrarle calor externo a una temperatura media en el generador y evaporador (Q_{GEN}, T_{EVA}). En el generador, ocurre la separación parcial del refrigerante de la solución de trabajo cuando se alcanzan las condiciones de saturación. En el condensador, se extrae calor al refrigerante externamente a una temperatura inferior (T_{CON}), con lo cual cambia a fase líquida y es bombeado hacia el evaporador (con una presión absoluta mayor que el generador y el condensador). El refrigerante es evaporado y alimentado al absorbedor, donde se mezcla con la solución concentrada que proviene del generador. En este proceso de absorción, se produce una liberación de calor (Q_{ABS}) a una temperatura alta (T_{ABS}) y se diluye la solución $LiBr/H_2O$. Esta solución diluida es alimentada al generador, mientras que la solución concentrada es alimentada al absorbedor con el fin de repetir el ciclo termodinámico (Horuz y Kurt, 2010).

.

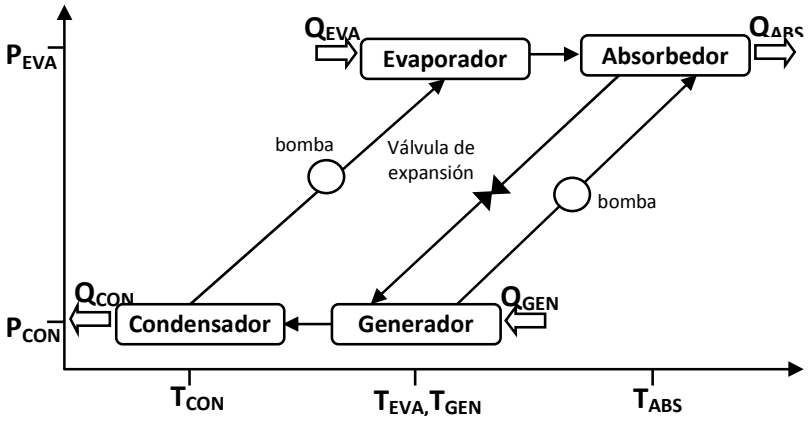


Figura. 1. Diagrama esquemático de un TCA básico considerando dos niveles de presión y tres de temperatura.

Intercambiadores de calor helicoidales anidados

La geometría de tubo helicoidal ha sido propuesta como alternativa en la búsqueda de mejorar la velocidad de transferencia de calor y la uniformidad de calentamiento en los IC´s usados para los TCA. En comparación con tubos rectos, el flujo en tubos enrollados es más complicado y por lo tanto el diseño de los mismos IC´s (Coronel, 2003). Se ha comprobado que los coeficientes de trasferencia de calor son más altos que los tubos rectos, como consecuencia de la curvatura del helicoide el cual induce fuerzas centrífugas sobre el fluido, resultando un flujo secundario (vórtices) que mejora la trasferencia de calor y el mezclado (Prabhanjan et. al, 2002).

Existen diversas configuraciones de IC´s helicoidales, pero el diseño básico y más común consiste en un haz de tubos enrollados helicoidalmente y apilados (colocados en una coraza), interconectados para multiplicar el área de transferencia de calor. Sin embargo, la información es limitada sobre las consideraciones para diseño de IC´s de múltiples serpentines anidados.

Basado en lo anterior, el presente trabajo muestra el diseño de dos componentes principales del TCA (condensador y generador) con esta geometría.

DISEÑO DEL GENERADOR

Los datos termodinámicos se obtuvieron a través de un simulador para un TCA básico (Rivera et. al, 1994), desarrollado en lenguaje de programación de Matlab versión R2010a, considerando una T_{GEN} = 70 ° C. Los parámetros de funcionamiento para el diseño se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de operación para el Generador

	Agua de calentamiento	**LiBr/H_2O**	**Refrigerante**
Q (kW)	2.85	2	
T_E (°C)	80	53.98	-
T_S (°C)	73.2	70	70 (vapor)
X_E (%)	-	53.19	-
X_S (%)	-	61.12	-
P (kPa)	81.85	3.73	

Con base al simulador termodinámico anteriormente descrito, se conoce el desempeño de los componentes en forma individual e integral, conociendo las temperaturas de salida de cada componente principal y una potencia térmica. Para el diseño del componente, se obtuvieron las condiciones de entrada y salida de las variables de temperatura, presión, flujo másico y concentración de cada componente.

Sección interna del tubing

Para el fluido interno del tubing que cede calor a la solución, y lograr el proceso de desorción, se calculó el número de Reynolds utilizando la siguiente ecuación:

$$Re=\frac{4\dot{m}}{\pi Di\mu} \tag{1}$$

Para el cálculo del número de Nusselt se utilizó la ecuación de Petukhov (1970) para un flujo interno de calentamiento:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{2}\right)Re\,Pr}{1.07+12.7\left(\frac{f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \qquad 10^4 \le Re \le 5x10^6\,, 0.5 \le Pr \le 2000 \tag{2}$$

Considerando un factor de fricción de Filonenko (Incropera y De Witt, 2011):

$$f = (1.58\ln Re - 3.28)^{-2} \qquad 10^4 \le Re \le 10^7\,, 0.5 \le Pr \le 2000 \tag{3}$$

El Nusselt se ajusta para serpentines helicoidales con Re por encima de 10000 (flujo turbulento) mediante la siguiente ecuación (Perry et. al, 1992):

$$Nu_{helicoidal} = Nu\,(1 + 3.5\left(\frac{Di}{D_{hel}}\right)) \tag{4}$$

Donde D_i es el diámetro interno del tubing y D_{hel} es el diámetro de enrollamiento del serpentín. Esta correlación involucra los efectos geométricos en el transporte convectivo adicional sobre la sección transversal del tubo incrementando la transferencia de calor.

El coeficiente convectivo local interno se calcula mediante:

$$h_{int} = Nu_{helicoidal}\frac{k}{Di} \tag{5}$$

Sección externa del tubing

En la sección externa del serpentín fluye solución del absorbedor a flujo cruzado con respecto al agua de calentamiento. Se calculó el número de Reynolds con la ecuación descrita anteriormente (1), y posteriormente para el cálculo del número de Nusselt se utilizó la ecuación de Hilpert (Incropera y De Witt, 2011).

$$Nu=0.683Re^{0.4466}Pr^{1/3} \qquad 10^4 \le Re \le 5x10^6\,, 0.5 \le Pr \le 2000 \tag{6}$$

El coeficiente convectivo externo se expresa en términos del número de Nusselt promedio:

$$h_{ext} = Nu\frac{k}{Dex} \tag{7}$$

Dimensionamiento

Debido a que la distribución de temperatura entre los fluidos frio y caliente no es constante a lo largo del intercambiador de calor, se utilizó el método de la diferencia de temperatura media logarítmica (DTML), donde el calor transferido se determina:

$$Q = UA * DTML \tag{8}$$

Los fluidos transfieren calor a contracorriente y se calcula DTML mediante:

$$DTML_{GEN} = \frac{(\Delta T1 - \Delta T2)}{\ln\left(\frac{(\Delta T1)}{(\Delta T2)}\right)} \tag{9}$$

A partir de los coeficientes convectivos locales de transferencia de calor, se calcula el coeficiente global de transferencia de calor para el dimensionamiento. No se consideró la resistencia conductiva debido a que se trata de una pared relativamente delgada, por lo que se desprecia, quedando de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}}} \tag{10}$$

Resultados

Para su construcción, se consideró tubing de acero inoxidable 316L de 1/2" O.D porque prolonga la vida útil en presencia de agentes corrosivos. Para el análisis se consideró un factor se seguridad del 21 % en el área de transferencia requerida en el generador.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para cada serpentín. Obteniéndose una U de 420.19 W/m2°C y un área de transferencia de 0.64 m^2. El generador consiste en 4 serpentines con el mismo número de vueltas (N-vueltas) y diferentes diámetros de enrollamiento ($D_{ENRROLLAMIENTO}$) interconectados en serie, sin dejar separación entre ellas (una vuelta encima de otra) para maximizar el área de transferencia por volumen de la coraza que los contiene.

Tabla 2. Resultados del dimensionamiento del generador.

	SERPENTINES				TOTAL
	1	2	3	4	
$D_{ENRROLLAMIENTO}$ (m)	0.20	0.16	0.12	0.08	-
A_{VUELTA} (m)	0.027	0.019	0.017	0.012	0.074
$100*A_{VUELTA}/A_{TOTAL}$ (%)	0.360	0.258	0.225	0.157	1.00
U ($W/m^2°C$)	419.693	419.554	420.647	421.731	420.192
L_{TOTAL} (m)	4.77	3.43	2.98	2.08	13.257
A_{TOTAL} (m^2)					0.640
N-Vuelta					9
V_{CORAZA} (m^3)					0.016

Estos se humectan de solución diluida de $LiBr/H_2O$, mediante un distribuidor ubicado en la parte superior y se suministra calor por la parte interna (proveniente de una fuente de calor), logrando la separación de agua en fase vapor y concentrando la solución para ser enviada de nuevo al absorbedor y continuar con el ciclo termodinámico. En la Figura 2 se muestra el dibujo técnico del generador a detalle con base a los resultados obtenidos.

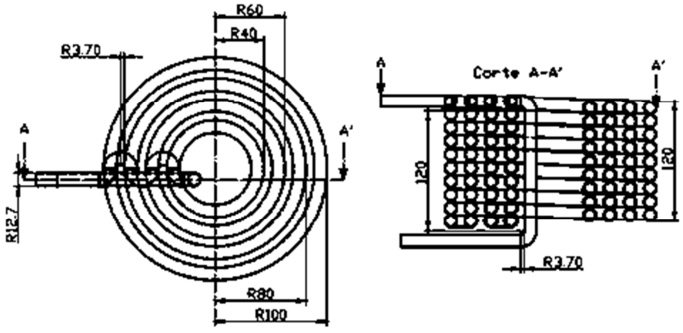


Figura 2. Detalle de diseño del generador

La información sobre trabajos previos de generadores de un TCA con geometría similares a esta propuesta es limitada. En la Tabla 3 se realiza una comparación con otro generador diseñado y construido en el laboratorio de térmica del CIICAp – UAEM con la misma geometría que el propuesto, a fin de tomar como parámetro de referencia y comparar el diseño de equipos cada vez más compactos y que tengan un desempeño más eficiente.

El IC propuesto en este trabajo tiene una mayor relación de Área de transferencia de calor (A)/Volumen (V), ya que posee dos serpentines más ocasionando un menor el volumen que ocupa el componente. Bajo las condiciones de operación usadas en este trabajo, no se encontró referencia para una comparación más completa con otros trabajos externos.

Tabla 3. Tabla comparativa de relaciones de rendimiento con otros generadores helicoidales.

	Presente trabajo	**Demesa, 2012**
Par de trabajo	**$LiBr/H_2O$**	**$LiBr/H_2O$**
P (kPa)	3.73	3.74
U ($W/m^2°C$)	420.192	317
# Serpentines	4	2
V (#)	9	15.5
D_{HEL}/D_{EXT} (adim)	15.7, 12.5, 9.4 y 6.2	10.1 y 16.4
A/V (m^2/m^3)	40	17.39

DISEÑO DEL CONDENSADOR

Los datos termodinámicos se obtuvieron utilizando el mismo simulador anteriormente descrito. La T_{CON} fue de 25 °C y los parámetros de funcionamiento para el diseño se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de operación para el condensador

	Agua de Enfriamiento	**Vapor Condensado**
Q (kW)	1.4	2.0
T_E (°C)	20	70
T_S (°C)	24	25
P (kPa)	81.85	3.58

Usando el simulador termodinámico anteriormente descrito, se conoce el desempeño de los componentes en forma individual e integral (temperaturas, presiones flujo másico de entrada - salida para cada componente principal y su potencia térmica.

Sección interna del tubing

Para el fluido interno del tubing que retira el calor latente, se calculó el número de Reynolds mediante la Ec. (1). El cálculo del número de Nusselt se realizó mediante la ecuación de Gnielinski (1976). El flujo interno del refrigerante retira el calor latente del vapor para lograr su cambio de fase a líquido saturado.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}(Pr^{2/3})-1} \quad 3000 \leq Re \leq 5x10^6\,, 0.5 \leq Pr \leq 2000 \tag{11}$$

Considerando un factor de fricción de Petukhov (Incropera y De Witt, 2007):

$$f = \left(0.790\, lnRe - 1.64\right)^{-2} \quad 3000 \leq Re \leq 5x10^6\,, 0.5 \leq Pr \leq 2000 \tag{12}$$

El Nusselt se ajusta para serpentines helicoidales con Re por encima de 10000 (flujo turbulento) mediante la Ec. (4) y el coeficiente convectivo local interno se calcula mediante la Ec. (5).

Sección externa del tubing

Debido al ángulo de inclinación de las vueltas, y a la relación entre el diámetro del serpentín y el diámetro exterior del tubo, los serpentines pueden ser considerarse como un arreglo de tubos horizontales para la sección externa (Nikkitin et. al, 2008). Por lo tanto, la

transferencia de calor en un condensador de tubo helicoidal de N-vueltas puede considerarse como un banco de tubos horizontales de N-tubos.

Para el cálculo del coeficiente convectivo local se utilizó la ecuación para condensación de película laminar considerando el número de Reynolds, el cual es calculado sobre la superficie externa de un tubo horizontal, por la cual el coeficiente de convección promedio se expresa como:

$$h = 0.729\left[\frac{g*\rho Liq*(\rho Liq-\rho Vap)*k^3 Liq*H_{FG}^{'}}{\mu Liq*(T_{PARED}-T_{SAT})*D_{EXT}}\right]^{1/4} \quad (13)$$

$$H_{FG}^{'} = H + 0.80Cp_{VAP}(T_{PARED} - T_{SAT}) \quad (14)$$

Donde el calor latente corregido $H_{FG}^{'}$ es una modificación en la energía de vaporización recomendada por (Rohsenow, 1956), y explica la energía sensible que se requiere para mantener temperaturas dentro del manto del vapor por arriba de la temperatura de saturación. Las propiedades del vapor se evalúan a la temperatura de película:

$$T_{PARED} = \frac{(T_{PARED}+T_{SAT})}{2} \quad (15)$$

Para el caso del dimensionamiento se utilizaron las mismas ecuaciones anteriormente descritas para el condensador.

Resultados

Para su construcción, se consideró tubing de 1/2" de acero inoxidable 316L porque prolonga la vida útil en presencia de agentes corrosivos. Para el análisis se consideró un factor se seguridad del 17 % en el área de transferencia requerida en el condensador.

El condensador consiste en 4 serpentines con el mismo número de vueltas (N-vueltas) y diferente diámetro de enrollamiento interconectados en serie, sin dejar separación entre ellas para maximizar el área de transferencia por volumen de la coraza que los contiene. El diseño consiste en inundar de vapor por la parte externa del tubing, mientras que por la parte interna del serpentín, fluye el agua refrigerante que retira el calor latente para lograr la transferencia de calor a flujo cruzado y con esto, el condensado después se envía al evaporador. En la Figura 3 se muestra el diseño a detalle del condensador.

Figura 3. Detalle de diseño del condensador.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para cada serpentín. Dando como resultado una U de 1246.74 W/m^2°C y un área de transferencia de 0.582 m^2.

Tabla 5. Resultados del dimensionamiento del condensador.

	SERPENTINES				TOTAL
	1	2	3	4	
$D_{ENRROLLAMIENTO}$ (m)	0.20	0.16	0.12	0.08	-
A_{VUELTA} (m)	0.027	0.022	0.017	0.012	0.074
100*A_{VUELTA}/A_{TOTAL} (%)	0.348	0.283	0.217	0.152	1.000
U (W/m^2°C)	1227.22	1243.79	1259.14	1279.27	1246.74
L_{TOTAL} (m)	4.35	3.53	2.71	1.90	12.493
A_{TOTAL} (m^2)					0.582
N-Vuelta					8
V_{CORAZA} (m^3)					0.013

En la Tabla 6, de la misma manera que para el generador se revisó en la literatura condensadores con la misma geometría para comparar la relación A/V y en el presente trabajo nuevamente dicha relación es mayor debido a que a diferencia de los otros trabajos el

presente trabajo consiste en 4 serpentines anidados, lo que hace que el volumen que requiera sea menor y por lo tanto la relación sea mayor, lo que indica un mejor aprovechamiento del área de transferencia de calor. Para el caso de los valores del U, se observa que en el presente trabajo y en el reportado en el trabajo de Demesa, 2012 existen similitudes debido a que las condiciones son las más apegadas a las condiciones en el presente trabajo, a diferencia de lo reportado en Nikitin, 2008 ya que depende de más factores, como el par de trabajo, relación de diámetros, condiciones de operación como la presión y temperaturas.

Tabla 6. Tabla comparativa de relaciones de rendimiento con otros condensadores helicoidales.

	Presente trabajo	**Demesa, 2012**	**Nikitin, 2008**
Par de trabajo	H_2O/H_2O	H_2O/H_2O	CO_2/H_2O
P (kPa)	3.58	3.73	3.2-5.0
U ($W/m^2°C$)	1246	1160	4400
V (#)	8	11.5	14
# Serpentines	4	2	1
DHEL/DEXT (adim)	15.7, 12.5, 9.4 y 6.2	16.7 y 12.8	23.7
A/VOLSHE (m-1)	44.76	38.54	18.71

CONCLUSIONES

El desempeño del TCA depende principalmente del buen funcionamiento de cada componente. Por lo tanto, los diseños del generador y condensador juegan un papel determinante para maximizar el desempeño del TCA.

Cuando se realiza el cambio de fase de vapor a líquido a una presión de saturación menor, usando el área de transferencia de calor al máximo, provoca que el generador alcance las condiciones de saturación a menor nivel de presión y temperatura. Para el generador el volumen compacto 0.016 m^3 para una potencia de 2 kW es más atractivo que los convencionales, porque requiere menor área para su instalación y representa menos pérdidas de calor. La geometría del Generador diseñado es de 13.257 m de longitud de tubing de ½" (9 vueltas por espiral con 12 cm de altura y un diámetro máximo de 20 cm), donde su área de transferencia de calor es de 0.640 m^2.

Para el condensador, se calculó un U de 1246 W/m^2 °C, obteniendo una longitud de transferencia de calor 12.5 m de tubing de ½ "(equivalente a 8 vueltas por serpentín con 10 cm y un diámetro máximo de 20 cm), con una área de transferencia de 0.582 m^2, con un volumen de 0.013m^3.

Los resultados mostrados corresponden al diseño de un TCA, el cual se encuentra en la etapa final de diseño. La segunda etapa consistirá en la construcción del TCA en forma integral. Los resultados del U teórico mostraron que la metodología de cálculo es adecuada, a pesar de que se dio un factor de seguridad de diseño, ya que se obtuvieron valores cercanos reportados en la literatura.

REFERENCIAS

1. Coronel P. and Sandeep K. (2003) Flow Dynamics and Heat Transfer in Helical Heat Exchangers, Transport Phenomena in Food Processing by CRC Press LLC.
2. Demesa-Lopez N. (2012) Diseño y Construcción de un intercambiador de calor Dúplex para un Transformador Térmico por Absorcion. Tesis de Maestria. CIICAp-UAEM. México.
3. Donnellan, P. (2014). Development of a triple stage heat transformer for the recycling of low temperature heat energy. PhD Thesis, University College Cork.
4. Gnielinski, V., (1976) "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," International Chemical Engineering, vol.16, pp 359-368,
5. Horuz I. and Kurt B. (2010) Absorption Heat Transformers and an Industrial Application. Renewable Energy. 35 2175-2181.
6. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L. and Lavine A. S. (2011) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Seven Edition. Wiley.
7. Kalogirou S. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress Energy Combust Sci; 30:231-95.
8. Massimiliano Zamengo, Junichi Ryu, Yukitaka Kato. (2013). Magnesium hydroxide - expanded graphite composite pellets for a packed bed reactor chemical heat pump. Applied Thermal Engineering 61 (2013) 853-858.
9. Nikitin K., Kato Y. and Ishizuka T. (2008) Steam Condensing-Liquid CO2 Boiling Heat Transfer in a Steam Condenser for a New Heat Recovery System. International Journal of Heat and Mass Transfer. 51, 4544-4550.
10. Perry R. H., Green D. W. and Maloney J. O. (1992) Chemical Engineer´s Handbook (Tomo lll). Tercera edición en español. McGraw-Hill.
11. Petukov, B. S. (1970) Advances in heat transfer, vol. 6.
12. Prabhanjan D. G., Ragbavan G. S. V. and Kennic T. J. (2002) Comparison of Heat Transfer Rates Between a Straight Tube Heat Exchanger and a Helically Coiled Heat Exchanger. lnt. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 29. No. 2. pp. 185-191.
13. Rohsenow W. M. (1994) Trans. ASME, 78, 1645.
14. Rivera W, Best R, Hernandez J, Heard CL and Holland FA. (1994) Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers. Part I: single and two stage configuration with heat exchangers. Heat Recovery Syst,14(2):173-83.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

PROYECTO ATLAS EÓLICO MEXICANO

[1]Ricardo Saldaña, [2]A. N. Hahmman, [2]J. C. Hansen, [3]L. Sansón, [1]U. Miranda, [3]L. Carmona, [3]J. Santiago

[1]Gerencia de Energías Renovables, Instituto de Investigaciones Eléctrica, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, 62490, México, +52 (777) 3623811 ext. 7254, **rsf@iie.org.mx.**

[2]Technical University of Denmark (DTU), Department of Wind Energy, DTU Risø Campus, Frederiksborgvej 399, DK-4000 Roskilde, Denmark, +45 46775085, **ahah@dtu.dk**.

[3]Gerencia de Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra, Comisión Federal de Electricidad, Cuauhtémoc 536, Col. Narvarte, Cd. de México, 03020, México, +52 (55) 52294400 ext. 65088, **leodegario.sanson@cfe.gob.mx**.

RESUMEN

Recientemente, los gobiernos de Dinamarca y México firmaron un acuerdo de colaboración para el desarrollo del Atlas Eólico Mexicano (AEM). El AEM proporcionará datos, mapas y guías de forma gratuita en el dominio público, que estarán disponibles para la planificación nacional y regional, así como para el desarrollo de proyectos de energía eólica en pequeña, mediana y gran escala. Este proyecto se llevará a cabo en estrecha colaboración entre la Gerencia de Energías Renovables del Instituto de Investigaciones Eléctricas (GER-IIE), la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU), la Gerencia de Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra de la Comisión Federal de Electricidad (GEIC-CFE) y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM). Este proyecto inició en octubre de 2015 y tendrá una duración de 3 años. Los alcances principales del proyecto son: elaborar un inventario de las mediciones del viento históricas, realizar una modelación a mesoescala en todo el país preliminar utilizando el modelo WRF, hacer recomendaciones en cuanto a la medición del viento para la validación del atlas eólico, llevar a cabo estudios de alta resolución del recurso eólico, preparar un atlas de viento observacional verificado a través de los datos medidos, realizar un atlas eólico basado en el modelo de mesoescala a nivel nacional por un período de 10 años y elaborar la base de datos correspondiente la cual se pondrá a disposición de forma gratuita en el dominio público a través de Internet. En este documento se describe el proyecto y los resultados preliminares alcanzados hasta junio de 2016.

ABSTRACT

Recently the governments of Denmark and Mexico signed a collaboration agreement for the development of the Wind Atlas for Mexico (AEM). The AEM will provide data, maps and guidelines free of charge in the public domain that will be available for national and regional planning as well as for development of wind power projects in small, medium and large scale. This project will be carried out in a close collaboration between the Renewable Energy Department of the Electrical Research Institute (GER-IIE), the Technical University of Denmark (DTU), the Civil Engineering and Earth Sciences Department of the Federal Commission of Electricity (GEIC-CFE) and the Institute of Geography of the National Autonomous University of Mexico (IG-UNAM). This project began in October 2015 and will last 3 years. The main scopes of the project are: to develop an inventory of historical wind measurements, to perform a preliminary nationwide mesoscale modeling by using the WRF model, to make recommendations for a wind measurements for validation of the wind atlas, to carry out high resolution wind resource studies, to prepare local observational wind atlases using the measured data, to perform a wind atlas based on mesoscale modeling at national level for a period of 10 years and to develop the corresponding database that will be made available free of charge in the public domain through the Internet. In this paper the project and preliminary results reached up to June 2016 are described.

Palabras claves: Energía Eólica, Evaluación de Recursos Renovables, Evaluación del Recurso Eólico, Potencial Eoloenergético, Mapeo del recurso eólico.

ANTECEDENTES

En julio de 2015, la GER-IIE, la GEIC-CFE y el IG-UNAM, con apoyo de la DTU, elaboraron una propuesta para el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE) con objeto de desarrollar el proyecto AEM. El objetivo general de este proyecto es elaborar un atlas eólico nacional y desarrollar la capacidad para hacer posible la planeación de la explotación del recurso eólico para la generación eléctrica en gran, media y pequeña escala.

Los objetivos particulares de este proyecto son:

- Generar bases de datos de viento con modelos numéricos y bases de datos medidas, así como mapas eólicos de alta resolución.
- Poner al alcance de la sociedad en general, desarrolladores de proyectos eólicos e inversionistas en una plataforma accesible y sin costo para el usuario, información confiable y validada bajo los estándares aceptados por la industria eólica internacional sobre el recurso eólico disponible en México.
- Reducir las barreras de acceso a información lo que permitirá acelerar inversiones en el desarrollo de parques eólicos en México.

El proyecto tendrá una duración de 36 meses y dio inicio en octubre de 2015.

INTRODUCCIÓN

El proyecto AEM se desarrollará en un período de tres años y contempla las siguientes actividades:

A0. Coordinación y diseminación del proyecto.
A1. Inventario de datos de observaciones y modelaciones.
A2. Análisis de datos y verificación de modelación preliminar del modelo WRF.
A3. Campañas de medición.
A4. Estudios de resolución a mesoescala.
A5. Atlas de viento numérico.
A6. Atlas de viento observacional.
A7. Atlas de viento extremo (alcance de los trabajos).
A8. Entrenamiento y educación.

En la figura 1 se muestra el cronograma de actividades del proyecto.

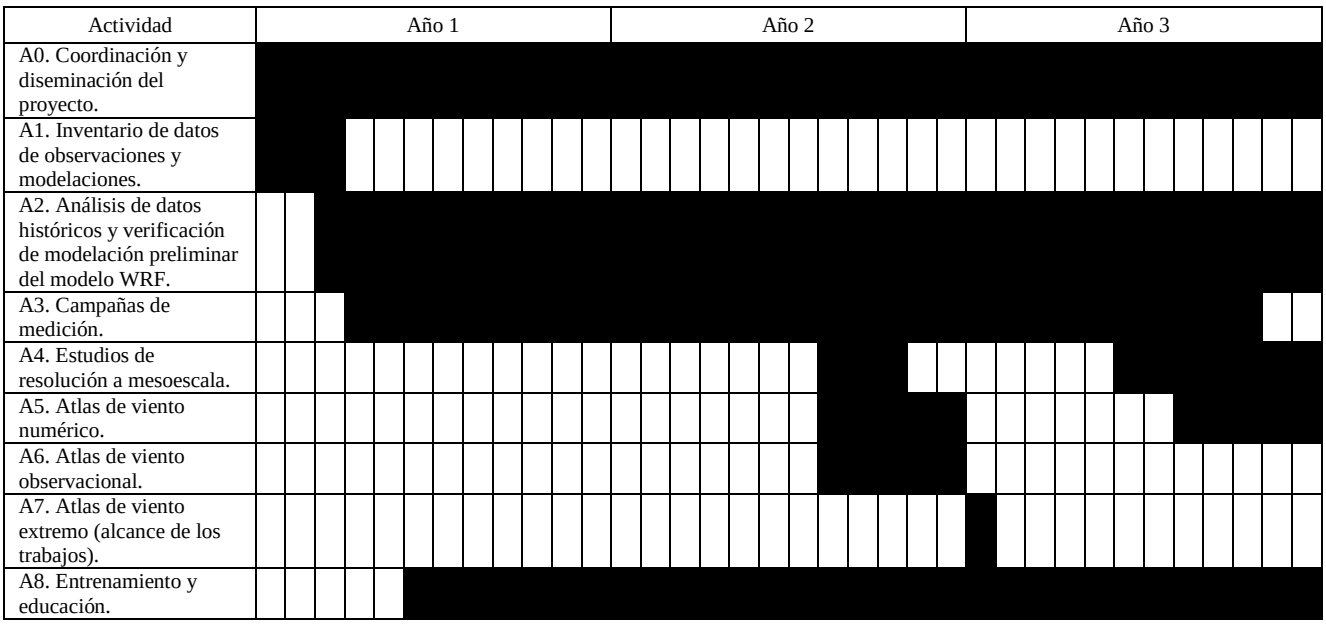


Figura 1. Cronograma de actividades del proyecto AEM

A continuación se describen los aspectos metodológicos involucrados en la ejecución de las actividades y los resultados obtenidos a junio de 2016.

METODOLOGÍA

La metodología general para desarrollar el proyecto AEM consiste en lo siguiente:

- Recolección y elaboración de bases de datos existentes y metadatos de mediciones de viento históricas.
- Análisis de datos.
- Modelación preliminar a nivel nacional empleando el modelo WRF.
- Definición de áreas objetivo para la medición anemométrica.
- Diseño del sistema de medición y adquisición de datos.
- Localización de los sitios de monitoreo y realización de trámites necesarios para la instalación de las estaciones de monitoreo.
- Instalación y operación de los equipos de monitoreo.
- Estudio fenomenológico de la climatología del viento.

• Elaboración del atlas de viento y su verificación contra 12 y 24 meses de medición.

A continuación se presentan los principales resultados de las actividades realizadas a junio de 2016.

RESULTADOS

Como parte de las acciones del proyecto AEM, a junio de 2016, se ha completado la actividad A1 y parte de las actividades A2 y A3. En este sentido La GER-IIE puso a disposición del proyecto AEM información anemométrica proveniente de 34 estaciones la cual fue analizada y considerada para el ajuste de los resultados de la modelación a mesoescala a nivel nacional realizada por la DTU para un período de 10 años (octubre de 2005 a septiembre de 2015) empleando el modelo WRF (Hahmann, 2016). A partir de esta información se elaboraron mapas anuales de velocidad media generalizada y densidad de potencia del viento a 100 m de altura con una resolución de 5 km x 5 km. Considerando el mapa de densidad de potencia se delimitaron 11 áreas con buen potencial eoloenergético distribuidas a lo largo del territorio nacional en las cuales se identificarán sitios para el monitoreo del viento que servirá para verificar futuras modelaciones numéricas del recurso. Estas áreas de enlistan a continuación:

• Región 1. Región 1A: Baja Norte, Región 1B: Baja Sur
• Región 2. Regiones 2A y 2B: Chihuahua
• Región 3. Región 3A: Coahuila, Región 3B: Nuevo León
• Región 4. Región 4A: Tamaulipas, Región 4B: Tamaulipas Sur
• Región 5. Guanajuato
• Región 6: Guerrero
• Región 7: Oaxaca Este
• Región 8: Costa Veracruz
• Región 9. Región 9A: Oaxaca Istmo, Región 9B: Oaxaca Sur
• Región 10: Costa Norte Yucatán
• Región 11: Puebla

En la figura 2 se muestra la ubicación de dichas áreas.

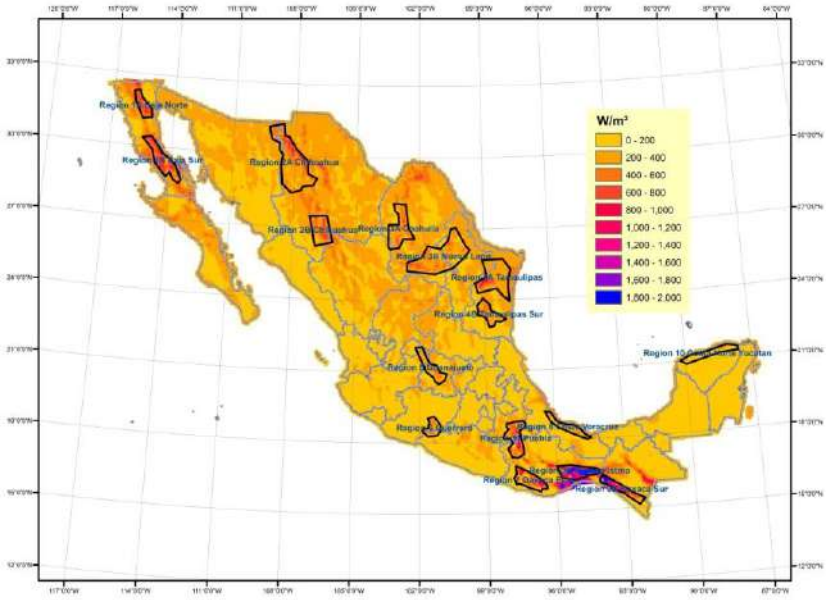


Figura 2. Regiones de interés con altos niveles de densidad de potencia de viento en la República Mexicana (modelada)

Para cada una de las áreas anteriores se elaboraron los histogramas de frecuencias de densidades de potencia y velocidades medias anuales y de altitudes. A manera de ejemplo en las figuras 3 a 8 se presentan los mapas de densidad potencia y velocidad media anual de topografía y los histogramas de distribución de frecuencias de densidad de potencia, velocidad media anual y altitud para la región 9A Oaxaca Istmo, la cual es considerada la región con más alto potencial energético en el país.

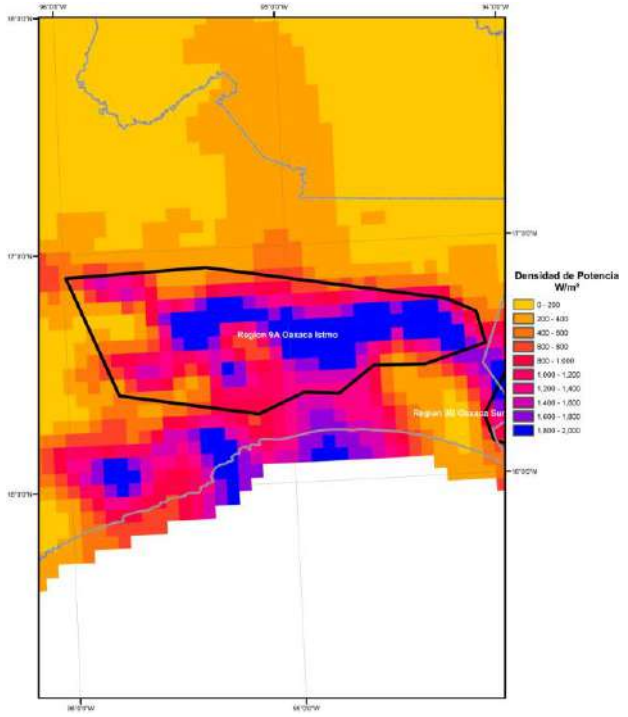


Figura 3. Densidad de potencia (región 9A Oaxaca Istmo)

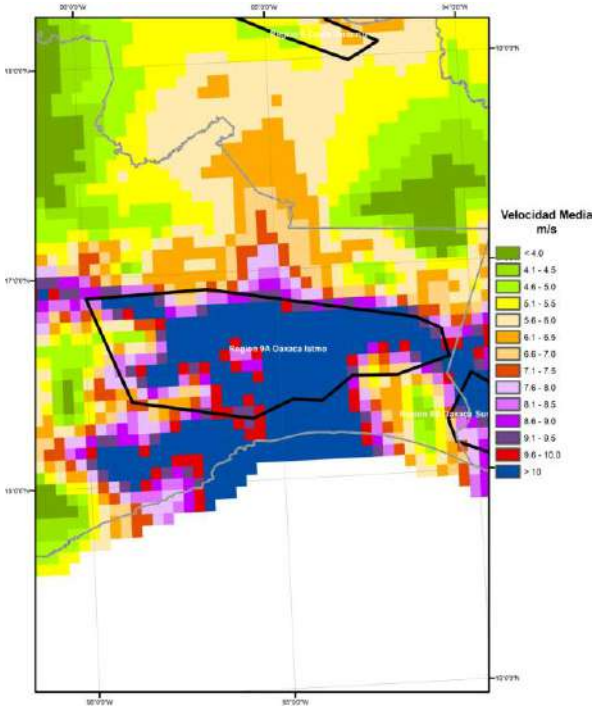


Figura 4. Velocidad media anual (región 9A Oaxaca Istmo)

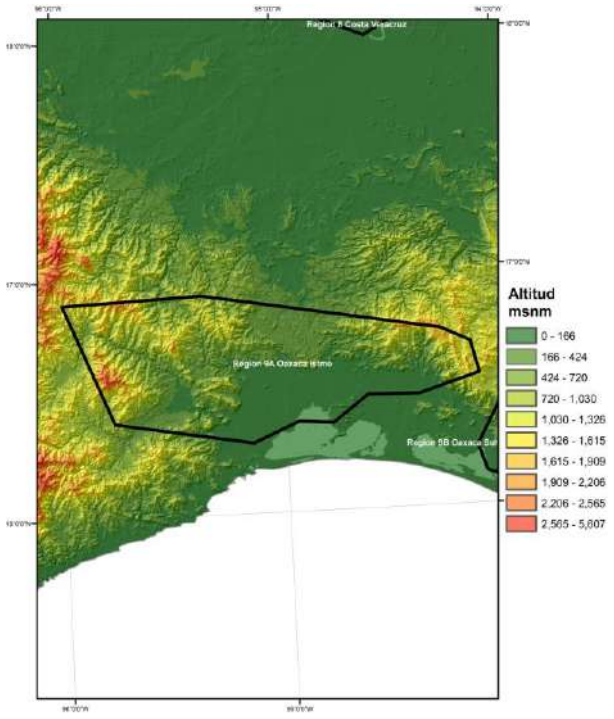


Figura 5. Topografía (región 9A Oaxaca Istmo)

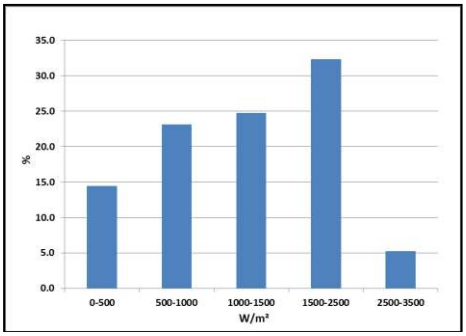


Figura 6. Histograma de distribución de frecuencias de densidades de potencia anuales (región 9A Oaxaca Istmo)

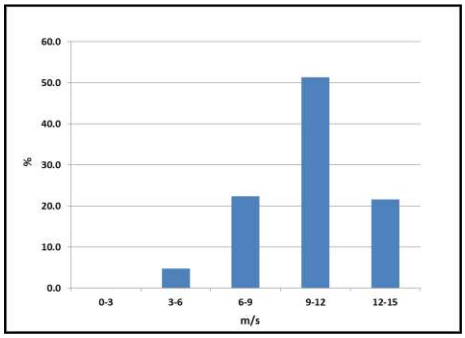


Figura 7. Histograma de distribución de frecuencias de densidades de velocidades medias anuales (región 9A Oaxaca Istmo)

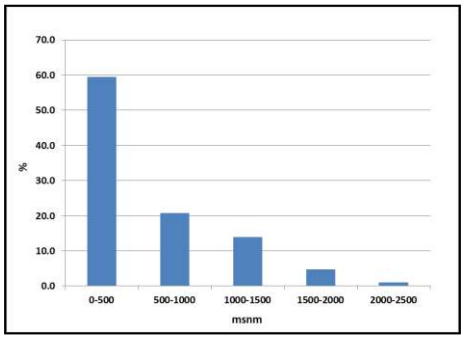


Figura 8. Histograma de distribución de frecuencias de altitudes del terreno (región 9A Oaxaca Istmo)

OBSERVACIONES

Los resultados presentados en este trabajo corresponden a actividades realizadas entre octubre de 2015 a junio de 2016. Durante los meses subsecuentes se llevará a cabo la selección de sitios para el monitoreo del viento por medio de torres de 80 m de altura con mediciones a 20, 40, 60 y 80 m. A través de estas estaciones se contempla llevar a cabo una campaña de mediciones durante dos años. Estos sitios estarán ubicados dentro de las regiones de interés y servirán para seleccionar la configuración más apropiada (que incluye el mejoramiento de la resolución horizontal) del modelo de mesoescala WRF y para verificar las modelaciones finales. Se tiene programado llevar a cabo una modelación a los 12 primeros meses de mediciones y otra al concluir el período de mediciones. Asimismo, se llevará a cabo la modelación del recurso eólico en alta resolución en las regiones en las cuales se realicen las campañas de medición.

REFERENCIAS

Hahmann A. N., Peña A. and Hansen J. C. (2016). DTU Wind Energy Report E-0126. WRF Mesoscale Pre-run for the Wind Atlas of Mexico. DTU Wind Energy, Risø Campus, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark.
http://orbit.dtu.dk/en/persons/andrea-n-hahmann(c8315d00-83a0-43f3-85c8-cf51258cdc00)/publications.html

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO DE UN SIMULADOR TERMODINÁMICO DE CENTRALES GEOTÉRMICAS EN ASPEN HYSYS PARA EL DESARROLLO DE LAS COMPETENCIAS DE LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA.

Emilio Hernández Martínez[1], Benjamín González Vizcarra[2], Gabriela A. Moreno Rueda[4] e Irwin Moses Macías Rodríguez[5]
Programa Educativo de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01-(664)-676-8222,
emilio.hernandez.martinez@uabc.edu.mx, bgonzalez79@uabc.edu.mx, moreno.gabriela25@uabc.edu.mx, irwin.macias@uabc.edu.mx.

María del C. Prieto Avalos[3]
Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44 Mexicali, Baja California, 21280, México. 01-(686)-566-4270, **a168960@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

Actualmente existen diferentes factores y escenarios los cuales aumentan la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, una alternativa muy interesante y confiable para satisfacer dicho incremento de demanda y sustituir los combustibles fósiles de carácter finito es la energía geotérmica la cual es la energía contenida en forma de calor en el interior de la tierra, sin embargo los escenarios de investigación y aplicación del conocimiento no siempre están a disposición de las Instituciones de Educación Superior desarrolladoras de proyectos y soluciones en el área de la generación de energía eléctrica, por lo anterior el presente trabajo se basa en el diseño, desarrollo y evaluación de un Simulador Termodinámico de Centrales Geotérmicas de Vapor Seco, Simple Flash, Doble Flash y Binario en el software de desarrollo en Aspen HYSYS.

ABSTRACT

Nowadays there are different factors and stages that increase the worldwide electricity demand, a very interesting and reliable alternative to satisfy this increased demand and replace fossil fuels is geothermal energy which is the energy contained in form of heat inside the earth, however the research scenarios and knowledge application are not always available to the Institutions of Higher Education projects and solutions development in the area of power generation, for that reason this work is based on the design, development and review of a Thermodynamic Simulator of Dry Steam Geothermal Power Plants, Simple Flash, Double Flash and Binary in the software of development Aspen HYSYS.

Palabras claves: Simulación Termodinámica, Aspen HYSYS, Centrales Geotérmicas, Objetos Aprendizaje y Competencias Profesionales

INTRODUCCIÓN

Con el incremento en el costo de los combustibles fósiles en la década de los setenta se le dio una importancia relevante a la energía geotérmica, no fue sino hasta principios del siglo XX que empezó a utilizarse de forma comercial. Se le considera un recurso explotable económica y técnicamente, limpio, flexible, confiable y abundante, con una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran: generar electricidad, enfriar o calentar espacios habitables, producir diversas materias primas, procesos industriales y de manufactura (Melchor, 1997). La geotérmica es la energía alternativa de mayor madurez, tanto tecnológica como económicamente. Baste recordar que desde 1913 se ha estado generando electricidad comercialmente, en escala industrial, a partir de ésta (I.B. Friedleifsson, 2008).

En la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC) de la Universidad Autónoma de Baja California(UABC) consientes de la importancia de la energía geotérmica para la producción de energía eléctrica, se ofertan diversos programas educativos de ingeniería, donde se realizan ejercicios, casos prácticos y proyectos de investigación en el área de la geotérmica, sin embargo los escenarios de investigación y aplicación del conocimiento no siempre están a disposición de las Instituciones Educativas, por lo anterior se hace evidente la necesidad de utilizar la simulación termodinámica. El proceso de Simulación se utiliza desde épocas prehispánicas como práctica para cazar o sobrevivir a batallas, realizando entornos ficticios que les permitiera proyectar su comportamiento previo a situaciones de riesgo. Actualmente la Simulación en algunas disciplinas es obligatoria en etapas iniciales de enseñanza, algunas de ellas: Medicina, aplicado en las facultades o ejercicios clínicos de pasantes de medicina para realizar pruebas en consultorio o laboratorios virtuales, con maniquís o pacientes estandarizados (Salas et al., 2004); Aviación, con la implementación de simuladores de vuelos, entre otras.

Debido al vertiginoso desarrollo en los tópicos de inteligencia artificial, procesadores innovadores, realidad virtual, sistemas inteligentes y lenguajes de programación los procesos de simulación se han implementado en múltiples procesos, uno de ellos es el de enseñanza – aprendizaje, lo cual es tema del presente trabajo en donde se describe el diseño, desarrollo y evaluación del Simulador Termodinámico de Centrales Geotérmicas de Vapor Seco, Simple Flash, Doble Flash y Binario en el software Aspen HYSYS, donde se examinan sus

contribuciones en los programas educativos de la ECITEC, además se pretende dejar en claro el significado e importancia de la energía geotérmica.

ANTECEDENTES

La demanda de energía a nivel mundial está aumentando debido al crecimiento demográfico, la industrialización y por el aumento de la necesidad de calidad de vida en diversos sectores de la sociedad (Dincer, Hussain, & Al-Zaharnah, 2006), (Ahmadi, Rosen, & Dicer, 2011). Para satisfacer dicha demanda se utilizan fuentes de energías que en la gran mayoría provienen de los combustibles fósiles utilizados en la operación de las centrales termoeléctricas de ciclo combinado, turbina de vapor y turbina de gas debido a la limitación de reservas, su futuro agotamiento y los impactos ambientales que esto genera en la tierra se enfrentará a una crisis energéticas y ambiental en un futuro próximo. Una de las alternativas más promisoria es el reemplazo de los combustibles fósiles por energía geotérmica ya que ha demostrado ser fiable, limpia y segura (Ganjehsarabi, Gungor, & Dincer, 2012).

La geotermia es referida como la energía que se deriva del calor natural existente en el interior de la Tierra, la mayor parte de este calor se genera a partir de material fundido llamado magma. La mayoría del magma producido en la Tierra no llega a la superficie, sino que tiende acumularse a profundidades entre 5 y 10 km, en donde suele calentar grandes regiones de roca o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos (Armstead, 1983). Desde un punto de vista práctico, se denomina energía geotérmica o simplemente geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma. Esta energía produce en la superficie terrestre impresionantes manifestaciones tales como fumarolas, manantiales termales, géiseres, así como la manifestación más extraordinaria de todas, los volcanes.

La energía geotérmica se puede aplicar para diferentes propósitos de acuerdo al rango de temperatura o lo que es lo mismo, su entalpia (Sánchez, 2011).

- Recursos geotérmicos de alta entalpía (T > 150 ºC). También conocida como liquido dominante se encuentran principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (son frecuentes entre 1.5 y 3.0 km). Están constituidos por vapor seco (muy pocos casos) o por una mezcla de agua y vapor, y se aprovechan fundamentalmente para la producción de electricidad. Son más abundantes que los anteriores, por ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).
- Recursos geotérmicos de media entalpía (T: 100-150 ºC). Pueden localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.0 km, y en cuencas sedimentarias a profundidades entre los 3.0 y 4.0 km. Su temperatura permite el uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios. También pueden aprovecharse para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales.
- Recursos geotérmicos de baja entalpía (T: 30-100 ºC). Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.5 y 2.5 km, o a profundidades inferiores a los 1.0 km en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Su utilización se centra en los usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización y ACS urbanos, y en diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos raras veces se utilizan directamente, lo más frecuente es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores y/o bombas de calor. Son más abundantes que los de líquido dominante en una proporción de 50 a 1, se encuentran en casi todos los países del mundo, por ejemplo: Heber (Estados Unidos), Yangbajin (China).
- Recursos geotérmicos de muy baja entalpía (T < 30 ºC). Las temperaturas de estos recursos suelen acercarse a la media anual del lugar donde se captan. Corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y drenajes de obras civiles, siempre para uso exclusivamente energético y no consuntivo del agua, y en el subsuelo poco profundo (normalmente, a menos de 0.2 km, incluyendo las captaciones de calor asociadas a elementos constructivos de la edificación). Su aplicación son los usos directos del calor: aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración de locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor.

Las centrales geotérmicas instaladas en el mundo han sido clasificadas de acuerdo a la siguiente categoría: Planta de vapor seco, planta de simple flash, planta de doble flash, planta binaria/combinada/híbrida y planta de presión de retorno. Las mayores proporciones son las de las unidades de vapor seco y simple flash, que representan aproximadamente dos tercios de la capacidad total instalada. Las plantas binarias, a pesar de su baja posición en esta clasificación mundial debido a su característica de capacidad limitada, se están volviendo cada vez más común y aceptada. (Jalilinasrabady, Itoi, Valdimarsson, Saevarsdottir, & Fujii, 2012).

CENTRALES GEOTÉRMICAS DE VAPOR SECO

Las plantas de vapor seco fueron el primer tipo de planta de energía geotérmica en alcanzar la escala comercial. Su historia se remonta a más de 100 años, cuando en 1904 el Príncipe Piero Ginori Conti construido y operado una pequeña máquina de vapor usando los chorros de vapor naturales que salían de la tierra en Larderello en la región de la Toscana de Italia. El geofluido consistía únicamente en vapor, al cual era bastante fácil conectar un dispositivo mecánico para aprovechar la energía disponible en dicho vapor seco. A pesar de que el motor del príncipe sólo generaba suficiente energía eléctrica para iluminar cinco bombillas en su fábrica, fue el punto de partida para el desarrollo de plantas de vapor seco de mayor generación de energía eléctrica.

La tecnología de las plantas de vapor seco tienden a ser más simples y de menor costo que las plantas de simple y doble flash, además no existe una salmuera geotérmica que lidiar. Como veremos, esto es un arma de doble filo cuando se trata de mantener el desempeño del yacimiento. Aunque sólo hay dos grandes campos de vapor seco en el mundo, en Larderello y The Geysers en el norte de California, EE.UU. Cuentan con 61 unidades de este tipo (la unidad promedio de vapor seco tiene una calificación de poco más de 40 MW) en funcionamiento en mayo de 2007, aproximadamente el 12% de todas las plantas geotérmicas. Estas plantas representan 2,471 MW instalados o casi el 26% de la capacidad mundial total instalada de energía geotérmica (DiPippo, 2013).

CENTRALES GEOTÉRMICAS DE SIMPLE FLASH

La tecnología de las plantas de simple flash se utiliza cuando los recursos hidrotermales son de tipo líquido dominante. Los fluidos producidos a partir de pozos geotérmicos de producción entran a una cámara de vaporización instantánea y posteriormente pasan a un separador que separa el vapor de una mezcla de vapor de agua de dos fases (figura 2).

El vapor se hace pasar a continuación a través de una turbina acoplada a un generador, sale de la turbina para dirigirse a un condensador donde se convierte nuevamente a líquido saturado y se une con el líquido proveniente del separador para ser reinyectado al yacimiento geotérmico. Las centrales geotérmicas de simple flash varían en su potencia instalada de 10 a 55 MW, un tamaño estándar de 20MW son utilizados en países como Filipinas y México (Jalilinasrabady, 2012).

Una central geotérmica de simple flash de 30 MW típica necesita de 5 a 6 pozos de producción y de 2 a 3 pozos de inyección. Estos pueden ser perforados en sitios distribuidos por el campo o varios pueden ser perforados desde una única plataforma de perforación direccional utilizando, para interceptar, una amplia zona del embalse. En cualquier caso, se necesita un sistema de tuberías para reunir los geofluido de los pozos de producción y transportarlos a la casa de máquinas y para los puntos de disposición. A menudo, el sistema de tuberías inicial se modifica si nuevas unidades de potencia se añaden posteriormente (DiPippo, 2013).

CENTRALES GEOTÉRMICAS DE DOBLE FLASH

La tecnología de las plantas de doble flash es muy similar a las plantas de simple flash con la diferencia que el líquido que sale del separador se dirige nuevamente a una segunda cámara de vaporización instantánea y posteriormente es conducido a otro separador donde se separa el vapor de la mezcla liquido-vapor saturada, el vapor entra a la segunda turbina para su expansión. El vapor proveniente de la primera y segunda turbina se unen para entrar al condensador, el líquido que sale del condensador es dirigido al reinyección junto con el líquido del segundo separador (figura 3).

La implementación de un sistema de doble flash como oposición a un simple flash puede resultar en un aumento de 15-25% en la producción de energía (DiPippo, 2013). El uso del agua es una preocupación en climas áridos de los sistemas de doble flash de occidentales de Estados Unidos puede perder hasta un 85% del fluido geotérmico. Por lo tanto, los sistemas binarios pueden ser más comunes que los sistemas de doble flash para bienes y servicios ambientales.

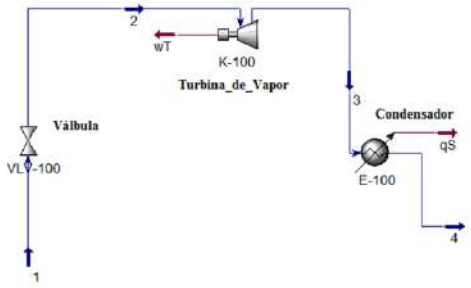


Figura 1: Central Geotérmica de Vapor Seco.

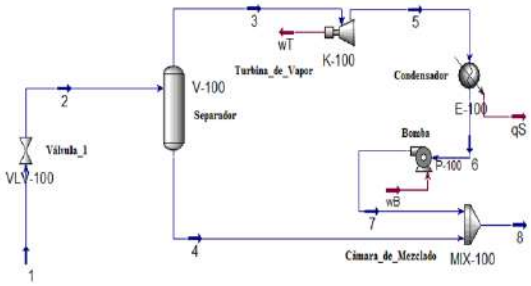


Figura 2: Central Geotérmica de Simple Flash.

CENTRALES DE CICLO BINARIO

Las centrales geotérmicas de ciclo binario son más similares a una planta de energía tradicional que las otras opciones de utilización de la energía geotérmica (simple flash y doble flash) que se describieron en la sección anterior. En una planta de energía geotérmica de ciclo binario, los fluidos geotérmicos, transfieren energía térmica al fluido de trabajo en un sistema de ciclo cerrado. Estas plantas de energía se implementan cuando un recurso de baja temperatura está disponible a menos de los 175°C. Una planta de energía de vapor de flash es menos eficiente y más costosa en rangos de temperatura más baja.

Para una central geotérmica de ciclo binario, existen dos líquidos primarios, el fluido geotérmico y el fluido de trabajo. El fluido geotérmico se extrae de los pozos geotérmicos de producción, y se dirige a través de un intercambiador de calor donde se transfiere el calor al fluido de trabajo el cual tiene un punto de ebullición mucho más bajo que el fluido geotérmico con la finalidad de vaporizar (vapor saturado y vapor sobrecalentado) el fluido de trabajo al pasar por el intercambiador de calor. El vapor saturado o vapor sobrecalentado es enviado a una turbina acoplada a un generador, lo que resulta en la producción de electricidad. Un condensador con un circuito de agua de refrigeración se utiliza para devolver el fluido de trabajo a su estado original y continuar con el ciclo cerrado. El fluido geotérmico que sale del intercambiador de calor es reinyectado al yacimiento geotérmico (figura 4).

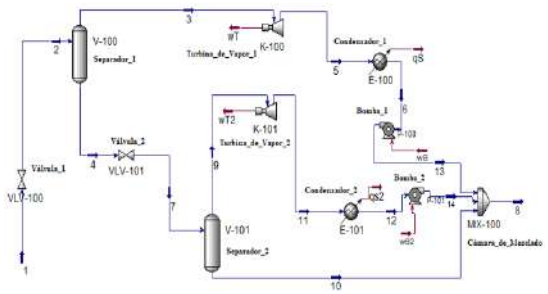


Figura 3: Central Geotérmica de Doble Flash.

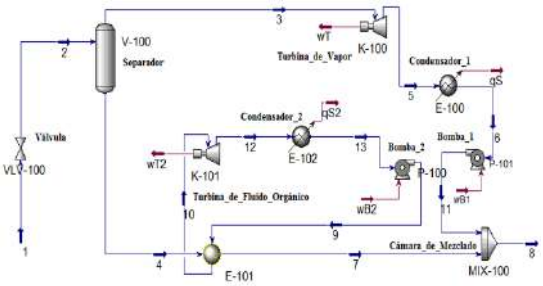


Figura 4: Central Geotérmica Binaria.

USO DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS EN INGENIERÍA

El utilizar la simulación con Software como complemento para el aprendizaje en la ingeniería permite crear un entorno donde los estudiantes podrán desarrollar más sus conocimientos al poder visualizar el comportamiento de una planta de manera más real y eficiente ya que el uso de esta herramienta posibilita realizar ejercicios de manera más rápida por lo que se podrá resolver problemas más complejos. En cuanto a procesos administrativos y de planeación de los cursos, el uso del simulador de centrales geotérmicas ha permitido realizar prácticas claras de temas en donde hubiera sido imposible, esto por diversos factores como: Falta de infraestructura, falta de acceso a los datos, el tiempo estimado para la captura de datos en campo sobrepasa el límite de los semestre de clase, entre otras.

La simulación termodinámica es el estudio de un sistema o de sus partes mediante el análisis de sus propiedades termodinámicas, representación matemática y su modelo físico. El diseño y operación de una central geotérmica se facilita cuando se emplea un modelo termodinámico que simule adecuadamente el proceso en condiciones normales o fuera de éstas de operación. Inclusive, se pueden encontrar las condiciones de operación prohibidas para el sistema, que ayudara a los estudiantes a desarrollar sus competencias profesionales. En los programas educativos de ingeniería de la ECITEC es fundamental emplear estas herramientas para sus estudiantes ya que en la actualidad un ingeniero debe tener la capacidad de producir y diseñar un sistema por lo que se decide realizar un simulador de centrales geotérmicas donde el estudiante pueda realizar ejercicios prácticos en el cual resuelva problemáticas apegadas a los procesos cotidianos de una central geotérmica, entendiendo las implicaciones en las variaciones de las diferentes propiedades termodinámicas del sistema.

Entre las principales ventajas que nos brinda la simulación termodinámica, se puede encontrar:

- Nos ayuda a examinar varias configuraciones de una planta.
- Disminuye y mejora el tiempo de diseño de una planta
- Determina las condiciones óptimas del proceso

DESARROLLO DEL SIMULADOR EN CENTRALES GEOTERMICAS

La Simulación como término educativo es definido con el objetivo de: *"Situar a la persona educando en un contexto que permite algún aspecto de la realidad y en establecer en ese ambiente situaciones, problémicas o reproductivas, similares a las que ella deberá enfrentar"* (Salas & Ardanza, 2004); Para el desarrollo de prácticas de aprendizaje se hace uso de herramientas y aplicaciones computacionales que proporcionen los recursos idóneos para generar el escenario requerido en la simulación, nombrado: Simulador.

Predecir el rendimiento de los sistemas de energía en cualquier condición de funcionamiento es uno de los temas más importantes para la reducción de los costos de inversión y optimizar la eficiencia de los sistemas. Este aspecto, a menudo descuidado en la utilización de fuentes de energía renovables, es cada vez más importante debido a la variabilidad de las fuentes y porque la industria de la energía está en continua expansión a nuevos mercados que se caracterizan por diferentes niveles de energía. Entre las fuentes de energía renovables, la energía geotérmica ofrece un buen potencial para la producción de energía eléctrica con un alto nivel de energía en el corto y mediano plazo (Desideri & Di Maria, 2000).

La simulación de los ciclos termodinámicos se realizó utilizando el simulador de procesos HYSYS de Aspen Technology, Inc. Este simulador es útil para el análisis termodinámico, especialmente en procesos con condición en estado estable, y otras de sus ventajas es que cuenta con una gran variedad de fluidos de trabajo y una serie de herramientas de optimización. Sus predicciones se han comparado con diversos proyectos de investigación de casos reales, generando resultados son muy similares (Vélez, Chejne, & Quijano, 2014).

Se desarrolló un Simulador Termodinámico de Centrales Geotérmicas que opera en ambiente Windows y el software Aspen HYSYS, con la intención de generar una interfaz amigable al usuario así como disponer de diversas herramientas como una amplia gama de fluidos de trabajo, ecuaciones de estado, propiedades termodinámicas y la secuencia de simulación se base en la metodología de cálculos termodinámicos para ciclos de potencia geotérmicos; Aspen HYSYS cuenta con ventana individual de captura de las diferentes variables de estado, dispositivos termodinámicos y tablas de resultados (Sittler, & Ajikutira, 2015).

Aspen HYSYS es un software para el cálculos de ingeniería y simulaciones es la base para el diseño de nuevos procesos o la modernización de los procesos de producción existentes con el fin de mejorar su rendimiento. El Software Aspen HYSYS es usado colectivamente para construir modelos y la aprobación de negocios, así mismo proporcionando:

- La consistencia de datos Aspen HYSYS software para cálculos de ingeniería y simulación ayuda a reducir el tiempo para el proyecto y hacer que el proceso de diseño más conveniente debido a la integración y la posibilidad de intercambio de datos y conocimientos entre expertos y gestores de herramientas de simulación fiables proporcionan una mayor confianza en la corrección de las decisiones.
- Aumento de la productividad y mejorar la calidad de los cálculos de ingeniería. Con el medio más completo, potente y moderna de la modelización y optimización, amplias bases de datos, bibliotecas de operaciones modulares, las oportunidades de análisis económico, el software Aspen HYSYS para cálculos de ingeniería y simulación pueden reducir significativamente el tiempo necesario para resolver problemas de ingeniería.

Todos los modelos de productos de software Aspen HYSYS se basan en el conocimiento de los procesos tecnológicos y combina todas las innovaciones de ingeniería anteriores y los avances en la tecnología de la información, y proporcionar resultados fiables, probados en plantas industriales reales (Calle, 2012).

METODOLOGÍA

Los esquemas de los ciclos termodinámicos para las diferentes centrales geotérmicas se basan en los principios fundamentales de la termodinámica; A) El principio de conservación de la energía (Primera Ley de la Termodinámica) y B) El principio de conservación de la masa. Reportados en la bibliografía especializada de termodinámica estándar como son el caso de Cengel y Boles (Termodinámica, 2012), Moran y Shapiro (Fundamentos de Ingeniería Termodinámica, 2011) y la bibliografía especializada de energía geotérmica DiPippo (Geothermal Power Plants Principles Applications Case Studies And Environmental Impact, 2013)

Cámara de Vaporización Instantánea

El ciclo termodinámico comienza con geofluido a la salida del pozo bajo presión, cerca de la curva de saturación, que entra a una cámara de vaporización instantánea que se modela como un proceso isoentálpico (entalpía constante), en estado estacionario, esencialmente adiabático (sin pérdidas o ganancias de calor), y sin intervención de trabajo. Además se considera despreciable los cambios de energía cinética y energía potencial a medida que experimenta la vaporización (Cengel & Boles, 2012) y (DiPippo, 2013).

Separador: El proceso de separación se realiza al terminar el proceso de vaporización, modelándose como un proceso isobárico (presión constante) y adiabático, donde la calidad (fracción de vapor) de la mezcla liquido vapor que se forma después de vaporización es dirigida a la turbina para su expansión. Mientras el líquido es dirigido a reinyección o a otro separador dependiendo del esquema de la central geotérmica (Hanyak, 2013) y (DiPippo, 2013).

Turbina: La turbina se modela como un proceso isoentrópico (entropía constante), adiabático y despreciando los cambios de energía cinética y energía potencial. Al final se realiza un ajuste con la eficiencia isoentrópico de la turbina para el cálculo de las propiedades reales (Cengel & Boles, 2012).

Condensador: El condensador es modelado como un proceso isobárico, adiabático, despreciando los cambios de energía cinética y energía potencial. Considerando una calidad final de líquido saturado el cual se reinyecta al yacimiento (Hanyak, 2013) y (DiPippo, 2013).

Bomba: La bomba se modela como un proceso isoentrópico, adiabático y despreciando los cambios de energía cinética y energía potencial. Al final se realiza un ajuste con la eficiencia isoentrópico de la bomba para el cálculo de las propiedades reales (Hanyak, 2013).

Intercambiador de Calor: El proceso de intercambio de calor se realiza como un proceso isobárico, adiabático y despreciando los cambios de energía cinética y energía potencial (Hanyak, 2013) y (DiPippo, 2013).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La validación del simulador se lleva a cabo comprobando sus resultados contra los ejercicios propuestos por la bibliografía de sistemas geotérmicos y termodinámicos, que se realizan durante el periodo escolar en los diferentes programas educativos de ingeniería de la ECITEC. Esta validación tiene como principales objetivos: Comprobar que todos los modelos termodinámicos son reproducibles en el simulador adecuadamente, verificación de cada uno de los estados que componen el sistema y comprobar que tenga un comportamiento correcto en el despliegue de resultados (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la Simulación de Centrales Geotérmicas

	Centrales Geotérmicas de Vapor Seco	***Centrales Geotérmicas de Simple Flash***	***Centrales Geotérmicas de Doble Flash***	***Centrales de Ciclo Binario***
Potencia Turbina de Vapor 1 (MW)	84.62	19.56	19.56	15.37
Potencia Turbina de Vapor 2 (MW)	-	-	4.90	-
Potencia Turbina de Fluido Orgánico (MW)	-	-	-	6.46
Eficiencia Térmica de la Central (%)	13.64	8.65	10.83	11.30

En la Tabla 1 se puede observar que los resultados de las simulaciones para las diferentes centrales geotérmicas, prestando atención con mayor detenimiento y comparando entre si cada central geotérmica se hace evidente que las centrales geotérmicas de vapor seco presentan la mejor eficiencia térmica de planta, por tal motivo dichas centrales son unas de las tecnologías geotérmica más instaladas a nivel mundial (Jalilinasrabady, Itoi, Valdimarsson, Saevarsdottir, & Fujii, 2012).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El simulador termodinámico Aspen HYSYS contiene una gran variedad de propiedades que ayuda a facilitar la representación de una central geotérmica ya que puede simular adecuadamente el proceso en condiciones normales o fuera de operación.

Por lo tanto el uso de este simulador en los programas educativos de ingeniería de la ECITEC, brinda beneficios tanto al estudiante como al docente ya que es posible la resolución de problemas de mayor complejidad en un menor tiempo, la realización de proyectos de investigación, prácticas profesionales y servicio social en centrales eléctricas, además favorece la comprensión de temas puesto que lleva al estudiante a visualizar de manera más clara el funcionamiento de una central geotérmica real lo que en un curso normal no es posible ya sea por falta de infraestructura, falta de acceso a los datos, el tiempo estimado para la captura de datos en campo sobrepasa el límite de los semestre de clase, entre otras.

El siguiente paso es formalizar una vinculación con empresas del ramo de la generación de energía eléctrica basada en recursos geotérmicos como es el caso de le Comisión Federal de Energía (CFE) y todas aquellas empresas que lleguen a México con el esquema de la reforma energética 2014, esto ayudara en gran medida a las futuras mejoras del simulador de centrales geotérmicas apegándose a un proceso productivo real y medible cuantitativamente. Además, se podrá colocar estudiantes en la realización en proyectos de vinculación, prácticas profesionales e investigación (Docentes- Estudiantes) en el análisis, optimización y mejora de las diferentes plantas geotérmicas.

REFERENCIAS

Armstead H. and Christopher H. *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. Spon Press. 1983.

Cengel Y. & Boles, M. *Termodinámica*. Mc Graw Hill. 2012.

DiPippo, R. *Geothermal Power Plants Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Elsevier Ltd. 2013.

Hanyak, M. E. *Chemical Process Simulation and the Aspen HYSYS v8.3 Software*. Bucknell University. 2013.

Fridleifsson I.B., R. Bertani, E. Huenges, J. W. Lund, A. Ragnarsson, and L. Rybach. *The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change*. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources. 2008.

Jalilinasrabady, S., Itoi, R., Valdimarsson, P., Saevarsdottir, G., and Fujii, H. (2012). *Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept*. Geothermics(43), 75-82.

E.J. Pastrana Melchor, *Aprovechamiento del calor geotérmico para el secado de madera, experiencia en Los Azufres, Mich., México*, Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía, vol 13, No. 1, pp. 53-55, 1997.

Sánchez, J., Sanz, L., and Ocaña, L. *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid: IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2011.

Salas, P.R y Ardanza, Z.P; *La simulación como método de enseñanza-aprendizaje. Revista Educación Médica Superior*. Editorial Ciencias Médicas. La Habana, Cuba. 2004.

Dincer, I., Hussain, M., & Al-Zaharnah, I. (2006). "Analysis of sectoral energy and exergy use of Saudi Arabia". International Journal of Energy Research(28), 205-43.

Ahmadi, P., Rosen, M., & Dicer, I. (2011). "Greenhouse gas emission and exergoenvironmental analyses of a trigeneration energy system". International Journal of Energy Research(5), 1540-9.

Ganjehsarabi, H., Gungor, A., & Dincer, I. (2012). "Exergetic performance analysis of Dora II geothermal power plant in Turkey". Energy(46), 101-108.

Vélez, F., Chejne, F., & Quijano A. (2014). "Thermodynamic analysis of R134a in an Organic Rankine Cycle for power generation from low temperature sources". DYNA 81 (185), 153-159.

Sittler, L., Ajikutira, D. *Jump Start: Aspen HYSYS® V8.0*. Aspen Technology, Inc. 2015.

http://www.aspentech.com/products/aspen-hysys/. Aspen Technology, Inc. (2015). Optimize Hydrocarbon Processes with Aspen HYSYS.

http://simulacionprocesosindustriales.blogspot.mx/p/aspenone-software-para-calculos-de.html. Calle, S. (2012). Aspen Technology Aspen One V8.8.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE JATROPHA CURCAS COMO BIOCOMBUSTIBLE: CASO DE ESTUDIO MORELOS.

Oscar Sánchez Santillán, Claudia Tomasini Montenegro y Manuel Martínez Fernández

Instituto de Energías Renovables – UNAM, Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, México, (52) 777 362 0090, **oss@ier.unam.mx**

RESUMEN

El mundo atraviesa una crisis social y ambiental bastante grave: mientras una porción considerable de la población enfrenta dificultades para acceder a energía, educación, servicios de salud e incluso a una alimentación adecuada, los hábitos de consumo y utilización de energía del resto de las personas han conducido a dañar severamente el planeta y a todos los seres que en él habitan. El transporte es una de las actividades humanas que mayor repercusión tiene sobre el entorno, y prueba de ello es que en 2012 el sector transporte aportó el 23% de las emisiones totales de CO_2 a nivel mundial, de las cuales casi tres cuartas partes vinieron del transporte carretero. Ante ésta problemática, la inserción de los biocombustibles en el mercado de los energéticos surge como una posible respuesta. Sin embargo los biocombustibles pueden generar impactos ambientales, económicos y sociales negativos, mientras es incorrecto pensar que un recurso es sustentable únicamente por el hecho de ser renovable: evaluar la sustentabilidad de su transformación y uso es necesario. Una herramienta adecuada para evaluar el desempeño ambiental es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la cual aborda y evalúa los aspectos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio. Se realizó un ACV evaluando el consumo energético y la emisión de GEI por la producción de 1 tonelada de biodiesel de jatropha y se comparó con estudios conducidos en otros países. Los datos utilizados fueron obtenidos directamente de una planta productora de biodiesel en el estado de Morelos, México. Los resultados indican que se necesitan 15000 MJ de energía y se generan 2500 kg de CO_2 equivalente para producir 1 tonelada de biodiesel, y muestran que éste biocombustible posee un potencial enorme para ayudar en la transición energética hacia un sistema energético bajo en carbono.

ABSTRACT

The world is going through a serious social and environmental crisis: a major population portion is facing lack of energy access, education, health services and even of an appropriate nutrition, while the consumption and energy use habits of the rest of people have conducted to harmful the planet and all the beings living within it. Transport is one of the principal human activities that has negative impact in environment: in 2012 transport sector provided 23% of CO_2 world total emissions, and almost three quarters came from road transport. Inclusion of biofuels into energy market appears like a possible answer to solve this issue. However biofuels can produce negative environmental, economic, and social impacts, besides, it is wrong thinking that any resource is sustainable only because it is renewable: evaluate its production and use sustainability is necessary. Life Cycle Assessment (LCA) is a proper tool to evaluate environmental performance. It considers and evaluates environmental features along the life cycle of a product or service. The present study completed a LCA assessing energy consumption and GHG emissions for the production of 1 tonne of jatropha biodiesel and it was compared with studies conducted in other countries. Unlike other studies, data were obtained directly from a biodiesel factory in the state of Morelos, México. Results show that 15000 MJ of energy are required to produce 1 tonne of biodiesel, while 2500 kg of CO_2 equivalent are emitted to atmosphere. Results also display the potential that this biofuel has to help in the transition towards a low carbon energy system.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, ACV, biodiesel, jatropha, transporte, sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

En 2013 el consumo de energía en el sector transporte mexicano fue de 2.26 EJ, el cual ha estado aumentando desde 1990, aunque de 2008 a 2013 permaneció más o menos constante [1]. Las emisiones de GEI (CO_2, CH_4 y N_2O) generadas para el mismo año debido al transporte contribuyen con 26.2% de las emisiones totales por sector del país, siendo el auto transporte el que mayor aportación tuvo contribuyendo con 23% del total. El resto de las emisiones se generó por la maquinaria de construcción (0.1%), la maquinaria agrícola (1.4%), el transporte marítimo (0.3%), la aviación (1.1%) y el transporte ferroviario (0.4%) [2]. El sector transporte emitió alrededor de 169 863 Gg, 273 Gg y 1 334 Gg de CO_2, CH_4 y N_2O respectivamente, además de 2685 Gg de HFC-134a. El 88% de las emisiones de CO_2 se generaron por la utilización de vehículos carreteros a gasolina y diésel, de la misma forma que el 86% y el 74% de las emisiones de CH_4 y N_2O respectivamente [3]. El índice de independencia energética es una forma de medir a grandes rasgos la capacidad que tiene un país para cubrir su consumo de energía por medio de su producción. Este índice se utiliza internacionalmente y es el cociente entre la producción y el consumo nacional de energía. En México, el índice de independencia energética fue por primera vez equivalente a 1.0 en 2013, lo cual quiere decir que el consumo nacional de energía alcanzó a la producción energética. La razón de esto, es el efecto

combinado de la disminución promedio anual de 0.4% en la producción desde 2005 y el incremento de 2.3% en el consumo de energía para el mismo periodo. En 2003, el índice de independencia energética fue mayor a 1.4 [4].

Es claro que la independencia y la seguridad energética del país se encuentran en riesgo, y de continuar con estas tendencias, para el 2020 México se convertiría en un país con déficit energético [1]. En respuesta a esta situación, el gobierno mexicano se ha enfocado más en la perspectiva de extracción de gas y petróleo: en los últimos años se han realizado grandes inversiones en exploración, reconfiguración de refinerías y en la expansión del sistema de transporte de gas natural, y aunque existe el mandato legal de generar el 35% de la electricidad a partir de energías no fósiles para 2024 y la necesidad de diversificar y optimizar el parque de generación energético, se ha prestado mucho menos atención a las energías renovables, a las cuales se debe apoyar para conocer la capacidad que tienen para brindar seguridad energética y mitigar la emisión de gases de efecto invernadero [5]. El agotamiento de los recursos fósiles, principal materia prima en la producción de combustibles utilizados en el sector transporte a nivel mundial, y la incertidumbre que existe respecto a sus precios, han hecho que la investigación y el desarrollo de temas relacionados con biocombustibles hayan crecido considerablemente en los últimos años. Existe también un gran potencial para que los países en desarrollo, que en su mayoría cuentan con condiciones naturales favorables para el cultivo de la materia prima necesaria en la producción de biocombustibles, así como con disponibilidad de tierra y agua puedan incursionar en nuevos mercados y brinden oportunidades de desarrollo económico en el sector rural ofreciendo empleos con salarios justos y condiciones de trabajo adecuadas, y generar así un impulso en la economía nacional al reducirse el consumo de combustibles fósiles y con la posibilidad de exportar los biocombustibles que se generen.

Sin embargo los biocombustibles pueden generar impactos ambientales, económicos y sociales negativos. Monocultivo, extinción de la biodiversidad, degradación del suelo, agotamiento de agua, competencia con la producción de alimentos, precios mayores para los usuarios respecto al de los combustibles fósiles, trabajo infantil, salarios bajos, relegación de las mujeres y condiciones de trabajo inadecuadas son claros ejemplos de esto. Es necesario analizar toda la cadena de producción y utilización de los biocombustibles para poder tomar decisiones acertadas en cuanto a su implementación. Una herramienta adecuada para evaluar los impactos ambientales ineherentes a la generación y uso de los biocombustibles que es utilizada a nivel mundial y que además está estandarizada por la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Mediante esta herramienta, se van a analizar las emisiones de GEI y el consumo de energía generados por la producción de biodiesel a partir de jatropha.

METODOLOGÍA

La generación y uso de biocombustibles puede traer beneficios significativos a la matriz energética nacional puesto que permite la descentralización de la producción de combustibles para transporte y pueden propiciar el desarrollo económico rural. La materia prima principal para la producción de los biocombustibles se obtiene a partir fuentes renovables de energía, por lo que son un factor importante en la formación de un sistema energético más independiente al posibilitar la producción interna de energéticos que son constantemente importados. Además, los biocombustibles se presentan como un elemento clave en la transición hacia un sistema energético bajo en carbono con la capacidad de suministrar la energía necesaria para las actividades diarias de las personas, generando menos emisiones de GEI que las que se emiten actualmente a la atmósfera. Sin embargo, para validar los beneficios que pueden conseguirse por medio de los biocombutibles es necesario realizar evaluaciones de sustentabilidad. Las evaluaciones deben conducir a conocer el potencial real que los biocombustibles poseen, a localizar oportunidades de mejoramiento durante el proceso y a servir como herramienta de consulta en la toma de decisiones respecto a su implementación. De lo contrario, la producción de biocombustibles puede ocasionar condiciones de alimentación, trabajo y vivienda inadecuadas; crear costos de combustibles superiores; y aumentar las emisiones de GEI y otros impactos ambientales en relación a sus equivalentes fósiles. En este estudio, va evaluarse el desempeño ambiental de la producción de biodiesel de jatropha relativo a las emisiones de GEI que genera.

El ACV realizado, evalúa un sistema de producción de biodiesel de jatropha específico para el Estado de Morelos en México. La plantación de jatropha obedece a un sistema de producción de baja intensidad, mientras que la generación de biocombustible se realiza mediante un procedimeinto tradicional descrito ampliamente en la literatura [6], [7]. Los impactos ambientales totales del sistema de producción del biocombustible fueron evaluados utilizando el ACV de acuerdo a la metodología descrita por la Organización Internacional de Estandarización en su norma ISO 14040/14044:2006 [8]. Para este estudio, el software elegido como herramienta de análisis es GREET (Gases de efecto invernadero, Emisiones Reguladas, y uso de Energía en el Transporte, por sus siglas en in inglés) en la versión GREET.net 2015 [9], debido a que fue desarrollado específicamente para el sector transporte, a que cuenta con una amplia trayectoria de ACV alrededor del mundo y a que posee gran cantidad de información referente a biocombustibles dentro de su base de datos. La evaluación de impacto en GREET se realiza mediante el uso de los conceptos *recursos*, *tecnologías*, *procesos*, *rutas* y *combinaciones de rutas.* Las emisiones y el consumo energético se calculan por medio de la selección de insumos necesarios para el proceso y el impacto ambiental que estos tienen previo a su uso, a la par del uso de factores de emisión de las tecnologías necesarias para la transformación de los materiales y la producción de los combustibles. El valor del consumo energético total para el inventario se obtuvo al sumar el contenido energético de todas las materias primas y los productos utilizados en él y la energía consumida durante la producción del biocombustible. Para las emisiones de GEI, se consideraron las emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O y se agregaron como emisiones de CO_2 equivalente de acuerdo a los a factores de emisión 1, 30, y 265 respectivamente, establecidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Los impactos ambientales evaluados en el presente ACV son consumo energético y emisiones de GEI. La descripción de los impactos evaluados, así como los límites del sistema y su alcance se explican a detalle en la sección siguiente.

Meta y alcance

El objetivo principal del ACV es evaluar las emisiones de GEI caracterizadas en kg de CO_2 equivalente y calcular el consumo

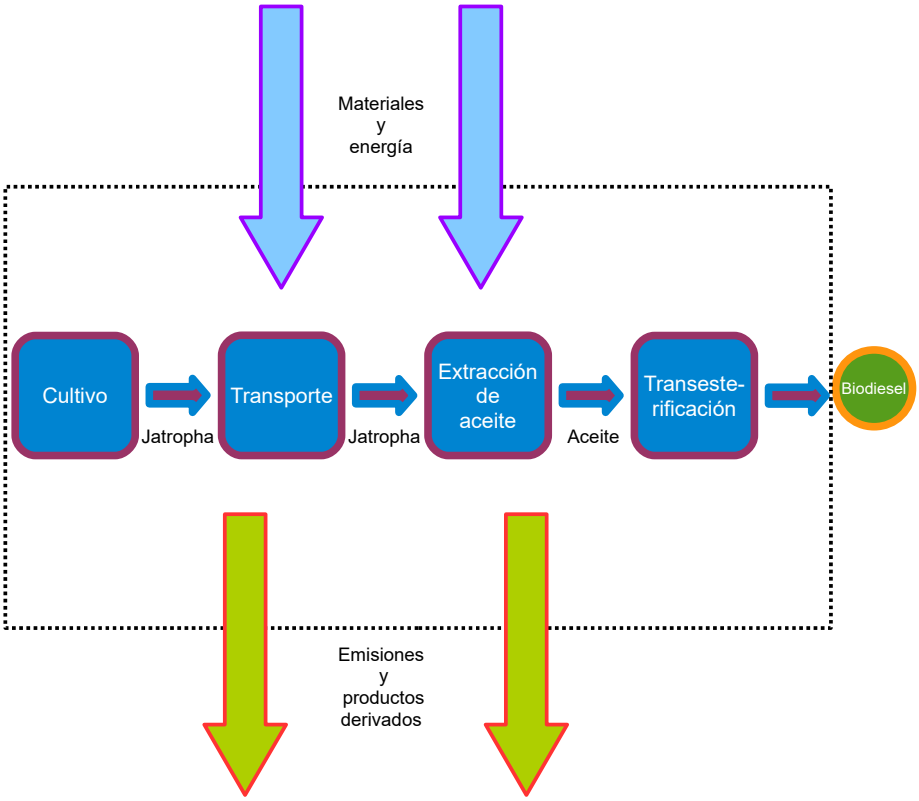


Figura 1: límites del sistema de producción de biodiesel a partir de jatropha.

energético en MJ, asociados a la producción de biodiesel obtenido a partir de jatropha. El sistema analizado (figura 1) incluye las etapas de cultivo de jatropha, extracción de aceite y producción de biodiesel (transesterificación), así como el transporte intermedio entre cada etapa. La unidad funcional que se eligió para el estudio es 1 tonelada de biodiesel producido, es decir que las emisiones de GEI y el consumo energético se calculan respecto a la producción de 1 tonelada de biodiesel. La elección de 1 tonelada de biodiesel producido como unidad funcional se debe al propósito de comparar de manera más homogénea los resultados con otros estudios publicados. Además del impacto ambiental directo ocasionado por las actividades de plantación y procesado, el análisis incluye también el impacto indirecto referente al sistema secundario (actividades previas como la fabricación de químicos y materias primas, producción de diesel y gas licuado de petróleo y generación de electricidad). Por falta de información los datos referentes al impacto del sistema secundario se toman de la base de datos de GREET, los cuales corresponden a condiciones específicas para Estados Unidos.

Análisis de inventario

En este análisis, todos los datos referentes a las prácticas agrícolas y a la producción del combustible fueron obtenidos directamente con la empresa dedicada a la fabricación de biodiesel de jatropha. Respecto a los flujos por el sistema secundario, es decir uso químicos, electricidad y gas licuado de petróleo, los datos se obtuvieron de la base de datos de GREET. Las emisiones de GEI por el uso de composta orgánica fueron obtenidas de la literatura [10] y se utilizaron dentro de GREET para que los resultados fueran obtenidos con base en una metodología única.

RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este estudio es cuantificar e identificar las principales fuentes de las emisiones de GEI y de requerimiento de energía para la producción de biodiesel a lo largo de su ciclo de vida. Los resultados obtenidos para estos dos indicadores se describen a continuación.

Consumo de energía

Los resultados del ACV indican que la fabricación de una tonelada de biodiesel con las condiciones del sistema analizado requiere 14969 MJ de energía para completarse. De éstos, el 97% provienen de combustibles fósiles, 1% de la utilización de biomasa como recurso y 2% por el uso de fuentes alternas de energía. Como se observa en la figura 2 el mayor gasto de energía se lleva a cabo durante la transesterificación, contribuyendo con el 78% del total del consumo energético para todo el proceso. La transesterificación es una fase de consumo energético altamente intensivo debido principalmente a la utilización de metanol durante la reacción, puesto que se requiere una gran cantidad de gas natural para su fabricación. El consumo energético en la etapa de cultivo corresponde al 13% del gasto

energético total, de los cuales el 12% se debe al diesel empleado durante esta fase. El consumo energético durante esta fase es particularmente bajo debido a que el sistema analizado es de baja intensidad y todas las operaciones agrícolas, como siembra, cosecha, fertilización, riego (cuando ocurre) y obtención del grano se llevan a cabo de forma manual y esta energía no es tomada en cuenta dentro del sistema. La etapa de extracción de aceite utiliza únicamente energía eléctrica para comprimir los granos, generándose así un consumo que aporta el 8% del consumo energético total para la producción de una tonelada de biodiesel. El gasto de energía en la fase de extracción de aceite es también relativamente bajo puesto que al grano no se le aplica ninguna clase de tratamiento previo y no se utilizan químicos como elementos para hacer más eficiente el proceso de extracción. El consumo energético durante la etapa de transporte entre las tierras de cultivo y las instalaciones de extracción y transesterificación puede considerarse como despreciable ya que contribuye con menos del 1% del consumo energético total durante el proceso.

Emisiones de GEI

Las emisiones de GEI totales estimadas durante el estudio equivalen a 2481 kg de CO2 equivalente por la producción de una tonelada de biodiesel. El 85% de este valor (figura 2) se generó durante la etapa de cultivo, por lo que ésta etapa es identificada como la principal responsable de las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida del sistema considerado en este estudio. La razón por la cual la etapa de cultivo tiene la mayor contribución a este impacto es el empleo de composta orgánica. La composta orgánica promueve la formación de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) y su posterior liberación hacia la atmósfera. Por hectárea cultivada, la utilización de composta orgánica como fertilizante tiene un impacto menor en la emisión de GEI que los fertilizantes minerales, sin embargo por la pobre producción de semillas que se obtienen en la tierra, el impacto generado por el cultivo mediante estas prácticas en relación a la unidad funcional es mayor. La transesterificación es la segunda etapa que mayor contribución tiene al total de emisiones de GEI dentro del estudio, contribuyendo con 12% de las emisiones de todo el proceso. Esto se debe principalmente al proceso para fabricar metanol, el cual requiere grandes cantidades de gas natural, y a la electricidad necesaria para llevar a cabo la reacción, que se genera en su mayoría mediante el uso de combustibles fósiles. En la etapa de extracción de aceite, la única entrada que existe es la electricidad que se utiliza para pulverizar los granos de jatropha y extraer el aceite, así, ésta etapa contribuye con el 3% de las emisiones de todo el proceso. Las emisiones de GEI generadas durante la etapa de transporte pueden considerarse despreciables puesto que éstas contribuyen con menos de 1% del total de emisiones dentro del proceso.

VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del consumo energético y de las emisiones de GEI por la producción de una tonelada de biodiesel de jatropha obtenidos durante este estudio, se compararon con cinco estudios tomados de la literatura. Los estudios revisados, analizan la producción de biodiesel obtenido a partir de jatropha abarcando sistemas de baja y alta intensidad; con características de cultivo, extracción de aceite y transesterificación distintas; y realizando la asignación de productos de diferentes maneras. Los estudios que pueden compararse directamente son los de Kumar (2012) [7] y Portugal (2016) [11] puesto que son los únicos que no contemplan los productos derivados en uno de los escenarios que conducen. Debido a la falta de uniformidad de los resultados presentados en los análisis, y a la escasez de

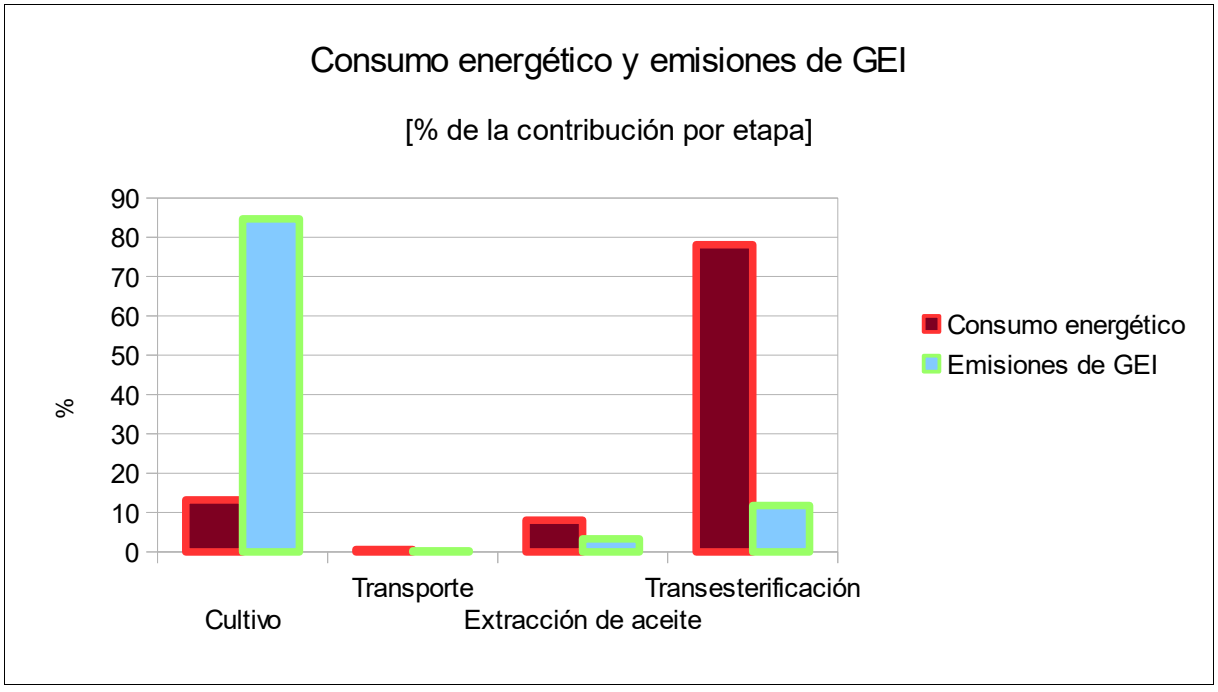


Figura 2: contribución porcentual por etapa al consumo energético y las emisiones de GEI para el sistema de producción de biodiesel de jatropha analizado.

información para hacerlos consistentes, la comparación va a realizarse con los resultados tal como se presentan. La figura 3 muestra la comparación del presente análisis con estudios seleccionados de la literatura.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

Los biocombustibles presentan la oportunidad de introducirse en el mercado de los energéticos para transporte de manera más o menos sencilla pues los automóviles pueden utilizar porcentajes importantes de biodiesel o bioetanol mezclado con combustible convencional con pocas o ninguna modificación al motor con el que trabajan, e incluso ser utilizados como aditivos para el vehículo. Los biocombutibles tienen el potencial para convertirse en una herramienta de gran utilidad en la mitigación del cambio climático, y en la transición hacia una matriz energética cada vez más sustentable. La diversificación es clave en la independencia energética de un país. Ésta debe conducirse de forma sustentable, evaluando aspectos económicos, sociales y ambientales de las tecnologías que van a utilizarse; monitorizando su desempeño; y con el sustento científico y de políticas públicas que garanticen el éxito de su implementación, por lo que se deben realizar estudios completos de sustentabilidad.

Conclusiones específicas

Al realizar el ACV y la consecutiva comparación con otras evaluaciones, se identifica la etapa de cultivo como la que mayor cantidad de emisiones de GEI genera. Esto se debe principalmente al uso de fertilizantes y, en este estudio en particular, el bajo rendimiento de fruta de jatropha que se obtiene por hectárea cultivada es también una razón importante. El bajo rendimiento es a causa de las prácticas agrícolas orgánicas y manuales. La etapa de cultivo debe mejorarse para hacer que el potencial de mitigación en el impacto ambiental que tienen los biocombustibles se vuelva más significativo. Utilizar el pastel de semillas que se recupera durante la extracción de aceite es una medida adecuada para disminuir el impacto ambiental ocasionado por la fertilización. El constante monitoreo de los cultivos energéticos también será de ayuda en la mejora de su desempeño ambiental puesto que se tendrá más control sobre ellos si la información con la que se cuenta aumenta. De acuerdo a Blanco et al. [12], el impacto ambiental por no utilizar la materia orgánica podría ser igual e incluso superior al que se tiene cuando se usa como fertilizante. El tomar en cuenta ésta consideración llevaría a un resultado más prometedor en el desempeño ambiental del sistema analizado, y en la mitigación de las emisiones de GEI generadas por el transporte. La etapa de transesterificación muestra otra ventana de oportunidad. El completar el proceso de conversión de aceite de jatropha en biodiesel de manera más eficiente va a traducirse en menos consumo de energía y en emisiones de GEI inferiores respecto a las prácticas actuales. Como se mencionó antes, la obtención de productos derivados durante el proceso de producción del biodiesel de jatropha debe ser parte de la distribución de cargas ambientales siempre y cuando los productos que se obtengan sean utilizados en un proceso de fabricación o generación de servicios, y se evite así la producción y uso de un insumo de características similares. El contemplar los productos derivados de manera adecuada va a conducir a un análisis cuyo sistema refleje la realidad del ciclo de vida de un producto o servicio y evalúe el impacto ambiental que verdaderamente tienen. Para poder tomar decisiones adecuadas sobre la producción y utilización de los

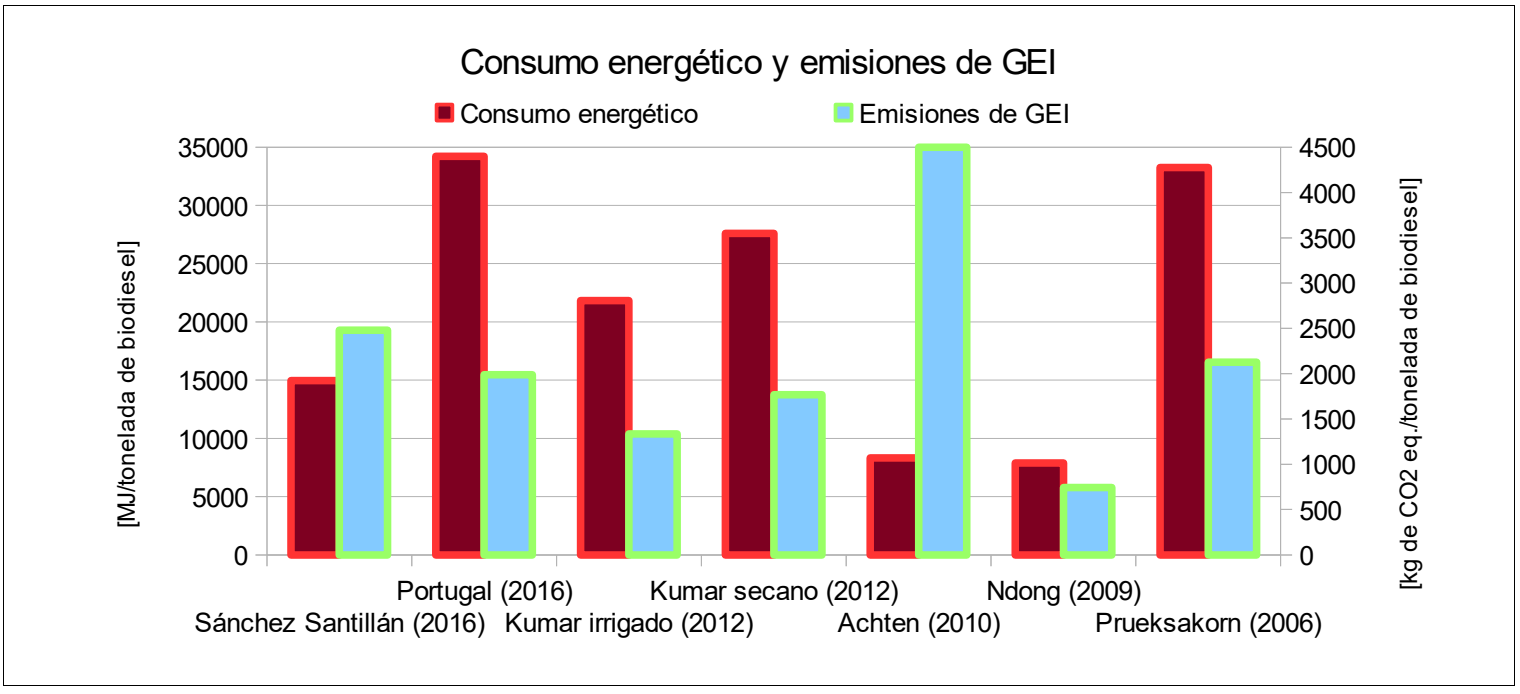


Figura 3: comparación del consumo energético y de las emisiones de GEI entre el presente análisis y estudios seleccionados de la literatura [7], [11], [13]–[15].

biocombustibles es necesario completar a fondo estudios de sustentabilidad.

AGRADECIMIENTOS

La investigación pudo realizarse gracias a la beca otorgada a Oscar Sánchez Santillán por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la información proporcionada por la empresa productora de biodiesel GAFISA. Los autores agradecen sinceramente a ambos.

REFERENCIAS

[1] SENER, "Sistema de información energética," 2015. Disponible: http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C05, último acceso marzo 2016.

[2] INECC, "Inventario de Gases de Efecto Invernadero Resultados," 2014. Disponible: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf, último acceso junio 2016.

[3] INECC, "Inventario Nacional de Emisiones de GEI," 2014. Disponible: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei.pdf, último acceso junio 2016.

[4] SENER, "Balance nacional de energía 2013," p. 138, 2013. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41975/Balance_2013.pdf, último acceso junio 2016.

[5] SENER, "Estrategia Nacional de Energía 2013-2027," p. 73, 2013.

[6] W. M. J. Achten, L. Verchot, Y. J. Franken, E. Mathijs, V. P. Singh, R. Aerts, and B. Muys, "Jatropha bio-diesel production and use," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 12, pp. 1063–1084, 2008.

[7] S. Kumar, J. Singh, S. M. Nanoti, and M. O. Garg, "A comprehensive life cycle assessment (LCA) of Jatropha biodiesel production in India," *Bioresour. Technol.*, vol. 110, pp. 723–729, 2012.

[8] ISO, *Environ. Manage.*, Life cycle assessment, 2006. Disponible: https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:38498:en, último acceso junio 2016.

[9] A. N. Laboratory, *Greet Model*, 2015. Disponible: https://greet.es.anl.gov/, último acceso abril 2016.

[10] A. Boldrin, K. R. Hartling, M. Laugen, and T. H. Christensen, "Resources , Conservation and Recycling Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation," *"Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 12, pp. 1250–1260, 2010.

[11] J. Portugal-Pereira, J. Nakatani, K. Kurisu, and K. Hanaki, "Life cycle assessment of conventional and optimised Jatropha biodiesel fuels," *Renew. Energy*, vol. 86, no. x, pp. 585–593, 2016.

[12] P. Muñoz, A. Antón, and J. Rieradevall, "LCA of the application of compost from organic municipal solid waste in horticulture fertilization," 2008.

[13] W. M. J. Achten, J. Almeida, V. Fobelets, E. Bolle, E. Mathijs, V. P. Singh, D. N. Tewari, L. V. Verchot, and B. Muys, "Life cycle assessment of Jatropha biodiesel as transportation fuel in rural India," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3652–3660, 2010.

[14] R. Ndong, M. Montrejaud-Vignoles, O. Saint Girons, B. Gabrielle, R. Pirot, M. Domergue, and C. Sablayrolles, "Life cycle assessment of biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: a field study," *GCB Bioenergy*, vol. 1, no. 3, pp. 197–210, 2009.

[15] K. Prueksakorn and S. H. Gheewala, "Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from Jatropha curcas L .," *2nd Jt. Conf. "Sustainable Energy Environ. (SEE 2006)", 21-23 Novemb. 2006, Bangkok, Thail.*, vol. 053, no. November, p. E–053 (0), 2006.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ADECUACIÓN DE BIODIGESTOR COMERCIAL PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

David Franco Martínez y Daniel García Solache
Centro Tecnológico, UNAM FES Aragón, Calle Rancho Seco s/n, Ciudad Nezahualcóyotl,
Estado de México, Código Postal 57130, México,
Teléfono 55 562309 65, Fax 55 56230864, **davd_francom@hotmail.com.**

RESUMEN

Uno de los Biodigestores más difundidos dentro del medio urbano, es el biodigestor autolimpiable de una marca comercial, creado para la sustitución de fosas sépticas. Este permite la reincorporación de las aguas residuales domesticas al medio ambiente sin contaminar los mantos freáticos.

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de este tipo de biodigestores son aerobias, por lo cual, hacer las debidas adecuaciones es de suma importancia, para una producción de biogás mediante reacciones anaerobias, aquí se presenta el desarrollo de esas adecuaciones y su evaluación de generación de biogás.

Nosotros al trabajar de forma semi-continua, proponemos que nuestro biodigestor se encuentre lleno a un poco más de tres cuartas partes de su volumen total, de tal manera que para evitar fugas futuras, todas las tuberías que se encuentren en el, salvo la del gas, deberán encontrarse sumergidas en la mezcla, con esto logramos un sello de agua en cada una de ellas y como se dijo antes, evitando las pérdidas de gas o de un mal funcionamiento por la entrada de oxígeno en el biodigestor.

Según la ficha técnica del biodigestor, su capacidad es de 600 litros, por lo que se precedió a corroborar esta información, así como también obtener el volumen que se le dedicara a la digestión.

El volumen destinado a la digestión del reactor, se calculó mediante la adición de volúmenes de figuras geométricas básicas y con datos que nos ofrece la ficha técnica de nuestro equipo. La idea principal del artículo es mostrar una forma didáctica el análisis de un biodigestor para la asignatura de Sistemas de Ahorro de Energía de la carrera de Ingeniería Mecánica en el tema de Fuentes renovables de energía.

ABSTRACT

One of the Biodigestores most widespread in urban areas is the self-cleaning commercial biodigestor, created to replace septic tanks. This allows the return of domestic wastewater into the environment without polluting the groundwater.

The reactions that take place within this type of digesters are aerobic, therefore, make the necessary adjustments is of utmost importance for biogas production by anaerobic reactions, here the development of these adjustments is presented and its assessment biogas generation.

Us to work semi-continuously, we propose that our digester to a little more than three quarters be full of its total volume, so as to avoid future leaks, all lines are in except the gas, must be submerged in the mix, with this we a watermark on each and as stated above, avoiding gas leaks or malfunction by the entry of oxygen into the digester.

According to the technical specifications of the digester, its capacity is 600 liters, which was preceded corroborate this information, as well as obtain the volume is devoted to digestion.

The volume destined for digestion reactor was calculated by adding volumes of basic geometric figures and data that gives us the data sheet of our team. The main idea of the article is to show a didactic analysis of a digester for the subject Systems Energy Saving career of Mechanical Engineering on the subject of renewable energy sources.

Palabras claves: biodigestor, biogás, energía, renovables.

1. ANTECEDENTES

Debido a que en los últimos años las concentraciones de contaminantes, derivados de la quema de combustibles tradicionales (leña), se han elevado alarmantemente, y que, por otra parte, millones de toneladas de desechos orgánicos son generados y dispuestos en rellenos sanitarios, la tendencia actual es plantear soluciones amigables con el medio ambiente, y por ello es de suma importancia, analizar la viabilidad que tienen los biodigestores domésticos o de pequeña escala, como es el caso del biodigestor comercial, al ser estos acondicionados para que trabajen de manera anaerobia, para la generación de biogás, mediante la utilización de desechos orgánicos provenientes de los hogares. De tal manera que se pueda dar una solución efectiva a los problemas sanitarios y de contaminación del aire,

así como una mayor calidad de vida. Para la realización de este proyecto se abordó una metodología de cálculo, diseño y construcción de un biodigestor que emplee los residuos ya mencionados.

En 2011 en México, se generaron alrededor de 41 millones de toneladas, lo que equivale a cerca de 112.5 mil toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) diariamente. Donde la generación diaria de RSU por habitante es de 990 gramos aproximadamente, de los cuales el 52.4% pertenece a residuos sólidos orgánicos.

Ya que el propósito de este trabajo es la presentación de los resultados en la generación de biogás mediante las adaptaciones realizadas al digestor comercial, se debe de plantear alguna forma de uso u operación de esta tecnología una vez realizada dichas adecuaciones; es por ello que se describirá el proceso mediante el cual se debe poner en marcha el biodigestor, así como las pruebas necesarias para su óptimo desarrollo. Se presenta la información técnica del biodigestor comercial, así como su adecuación para generar biogás, tomando en cuenta las adaptaciones físicas a este reactor, así como la memoria de cálculo referente al proceso anaerobio.

Se exponen los resultados obtenidos a partir del seguimiento diario que se le dio al biodigestor, haciendo una comparación de los valores teóricos con los valores obtenidos experimentalmente, esto con el objetivo de dar un panorama general de la viabilidad que representa el uso de esta tecnología. Y por otro lado dejar un ejemplo práctico de como evaluar y mantener en funcionamiento un sistema de generación de biogás para los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecánica, aplicando los conocimientos desarrollados en las diferentes asignaturas de la carrera. Finalmente, se presentan las conclusiones en términos de la viabilidad que el biodigestor comercial tiene al ser modificado de cómo se creó un manual de usuario para el manejo del reactor.

2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO COMERCIAL.

Uno de los Biodigestores más difundidos dentro del medio urbano, es el biodigestor comercial autolimpiable, creado para la sustitución de fosas sépticas. Este permite la reincorporación de las aguas residuales domesticas al medio ambiente sin contaminar los mantos freáticos, CON UNA CAPACIDAD DE .

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de este tipo de biodigestores son aerobias, por lo cual, hacer las debidas adecuaciones es de suma importancia, para una producción de biogás mediante reacciones anaerobias.

El tanque comercial ó IMHOFF es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos. El proveedor lo define como “un sistema para el tratamiento primario de las aguas residuales domésticas, mediante un proceso de retención y degradación séptica aerobia de la materia orgánica. El agua tratada es infiltrada hacia el terreno aledaño mediante una zanja de infiltración, pozo de absorción humedal artificial según el tipo de terreno y zona.”.

Componentes.

Los principales componentes del biodigestor o IMHOFF para su correcto uso son:

1. Tubería PVC de 4” para entrada de agua.
2. Filtro biológico con aros de plástico (pets).
3. Tubería PVC de 2” para salida de agua tratada al campo infiltración o pozo de absorción.
4. Válvula esférica para extracción de lodos.
5. Tubería PVC de 2” de acceso para limpieza y/o desobstrucción.
6. Tapa click de 18” para cierre hermético.
7. Base cónica para acumulación de lodos.

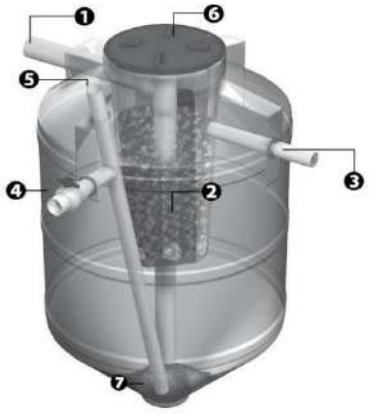


Figura 1: Componentes de biodigestor.
Fuente: “ficha técnica. Biodigestor autolimpiable”.
http://www.rcnegociossac.com/pdf/Ficha%20tecnica%20del%20Biodigestor%20Rotoplas.pdf. [11 de junio 2015.]

3. ADECUACIÓN DE TANQUE PARA APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS.

Para la correcta intervención en el biodigestor, debemos recordar que la descomposición anaerobia de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta porción en metano (CH4) al cual se le designa como biogás. A partir de esta premisa se puede

observar que una acertada adecuación, nos brindara la oportunidad de explotar este combustible a base de desperdicios, que comúnmente carece de algún valor para la sociedad.

El funcionamiento del biodigestor comercial es llevado a cabo de la misma forma que los Biodigestores semi-continuos, es claro, que este no logra aprovechar el biogás, por lo que los cambios a realizar, se hicieron encaminados para el aprovechamiento del mismo.

Se está trabajando de forma semi-continua, y se encuentra lleno a un poco más de tres cuartas partes de su volumen total, de tal manera que para evitar fugas futuras, todas las tuberías que se encuentren en él, salvo la del gas, deberán encontrarse sumergidas en la mezcla, con esto logramos un sello de agua en cada una de ellas y como se dijo antes, evitando las pérdidas de gas o de un mal funcionamiento por la entrada de oxígeno en el biodigestor.

Entrada del afluente.

La tubería del afluente que en un principio pasaba por el centro del biodigestor, nos limitaba la posibilidad de adaptar un mecanismo de mezclado, por lo que fue redirigida hacia una de las paredes del tanque, con ello logramos obtener un mayor espacio para dicho mecanismo, así como un mejor mezclado al no existir tanta obstrucción.

En la restructuración de la tubería del afluente, debemos tener en cuenta que esta forme un sello de agua con la mezcla, por lo que cerciorarnos que se encuentre a una adecuada distancia es indispensable. Ver figura 2.

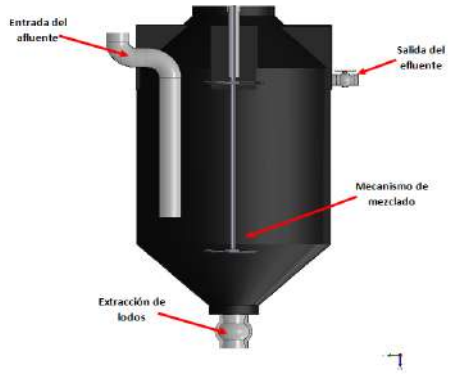


Figura 2: Partes principales en el rediseño del biodigestor. Elaboración propia.

Salida del efluente.

La tubería del efluente que se muestra en el diagrama original del biodigestor fue reubicada en donde anteriormente era la extracción de lodos, con ello el espacio libre para la generación del biogás aumenta puesto que esta se encuentra ligeramente más abajo del tanque, de tal manera que el volumen destinado al biogás será mayor. Con esto tratamos de evitar fugas futuras en consecuencia de altas presiones dentro del tanque.

En tal caso podemos observar en la imagen 1 que, lo que para ellos era la salida de agua asignada como el número tres, ahora para nosotros será la tubería a la que le asignan el número cuatro, eliminando la tubería que se dirigía hacia la parte baja del biodigestor, dejando solo la parte horizontal, clausurando la conexión para el desazolve, a la que le asignan el número cinco, así como la salida de aguas que ellos ofrecían. Ver figura 2.

Extracción de lodos.

La tubería de extracción de lodos (acceso de limpieza y/o obstrucción) con que el biodigestor comercial contaba, fue reconstruida para la salida de efluente como ya se menciono, de esta manera el ahorro de espacio es mayor. En vez de ella, se adecuo otra en la base del biodigestor utilizando una válvula de 4", con ello obtenemos una salida directa de los lodos ya digeridos, evitando los riesgos de obstrucciones o mal funcionamiento de la tubería pasada.

Mecanismo de mezclado.

Una vez liberado espacio dentro del tanque, se adecuó a una barra de acero inoxidable, aspas del mismo material, todo ello concéntrico al biodigestor, la cual es accionada de manera manual y con un sello de agua con un tubo de PVC de 2" así evitando la fuga del gas.

Sistema de gas.

En el caso de nuestro biodigestor, este no contaba con ninguna salida de biogás por lo que se decidió crear una, de tal manera que esta se encontrara lo más próxima posible a la tapa del mismo, por lo que fue instalada en la parte que se destina a la rosca de la tapa, para ello, se utilizó una válvula de 3/4" de PVC, para así facilitar la salida del biogás. Ver imagen 3.

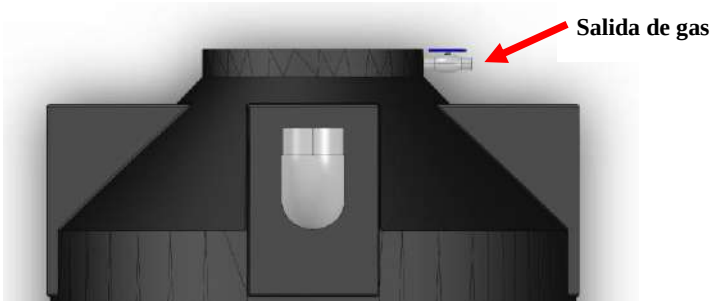


Figura3. Salida de gas en el biodigestor. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, para el sistema de almacenamiento del biogás, se utilizó un gasómetro llamado de campana flotante, el cual utiliza dos recipientes de diámetro distinto, de forma tal que uno pueda ser colocado dentro del otro. El biogás ingresa en el tanque invertido y a medida que continúe la producción este asciende.

Además de almacenar el biogás, el gasómetro permite regular la presión del sistema, que queda definida por la fuerza que ejerce su peso y el área donde este se apoya. Es por ello que al usar materiales livianos en el gasómetro, es necesario aumentar su carga para que la presión obtenida sea la adecuada para una buena combustión. Ver figura 4.

Figura 1. Gasómetro.

RESULTADOS

En el rediseño del biodigestor se puede aseverar que este ahora trabaja de manera anaerobia. El cual fue monitoreado desde la etapa de arranque, durante el proceso de llenado diario y los días posteriores a su final de la producción de biogás, mostrando resultados satisfactorios en cada etapa de la biodigestión.

Por otra parte, durante la primera puesta en marcha, se percibió una ligera fuga de gas proveniente del tubo que servía como sello de agua en el mezclador, por lo que también se tomó la decisión de eliminar en la segunda puesta en marcha este aditamento, considerando que sin él, el biodigestor disminuiría su eficiencia.

Para dar fin a las fugas que se presentaron en la unión de la tapa, se optó por adquirir una nueva y volver a ser sellada con un empaque de neopreno en conjunto de un sellador de poliuretano, el cual debiera de soportar las condiciones de trabajo sin ningún problema. Se dejo que el sellador curara por un lapso de 5 días, que posteriormente a los trabajos de hermeticidad, el biodigestor fue llenado con agua hasta su nivel de trabajo y se le hicieron las pruebas hidráulica y neumática.

El biodigestor al encontrarse nuevamente en condiciones adecuadas, se procedió a la puesta en marcha del proceso biológico, pero esta vez agregando un aproximado de 60 kilogramos de estiércol fresco de vaca y se repitieron los pasos ya mencionados en la primer puesta en marcha.

Una vez más, se procedió a monitorear el pH y la temperatura interna desde el primer día de su puesta en marcha mostrando los valores siguientes:

Tabla 1. Días posteriores a la carga inicial del biodigestor.

Día	pH promedio	Temperatura °C, promedio
5 de febrero al 16 de marzo 2016	5.5-7	17-27°c

Evaluación de las temperaturas durante la biodigestión.

La temperatura ambiental fue monitoreada por una pequeña estación climatológica, la cual se encontraba en el techo del mismo centro tecnológico; dicha estación nos entregó las temperaturas máximas: entre las 14-16hr., mínimas: entre las 5-7hr., y la promedio durante todo el experimento.

En el caso de la temperatura dentro del biodigestor, esta fue medida mediante un termopar tipo K y un sistema de adquisición de datos de la marca Agilent Technologies, dicha temperatura fue tomada a desde la puesta en marcha hasta el fin en la producción de biogás y siempre en una misma hora, por lo que se cree que la temperatura durante el transcurso del día y de la noche debió de variar pero no de manera considerable, puesto que al comparar la temperatura interna con la externa se pudo observar que la interna siempre era mayor.

Las temperaturas son de vital importancia en el proceso de la biodigestión, puesto que, a mayor temperatura la reproducción de bacterias es más rápida y por ende la producción de biogás seria mayor. Si bien, la temperatura osciló entre los 17-29°C, no fue suficiente

para lograr su mayor eficiencia; recordemos que a temperaturas mesofílicas, las cuales fueron las propuestas para el trabajo de digestión del reactor, el fluido se encuentra entre los 12°C y 35°C, optimizándose el proceso entre los 29°C y los 33°C.

A pesar de que el reactor trabajó en la zona mesofílica, esté no logró alcanzar los rangos óptimos para una mayor producción de biogás, y la caída en las temperaturas a pesar de no ser drásticas si fueron bastante notables con respecto al clima al que era sometido.

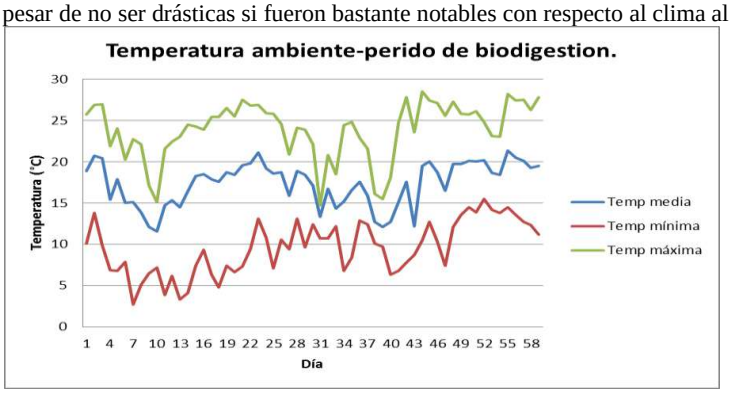


Figura 5. Temperatura ambiente durante el periodo de análisis de la biodigestión. Periodo de evaluación del

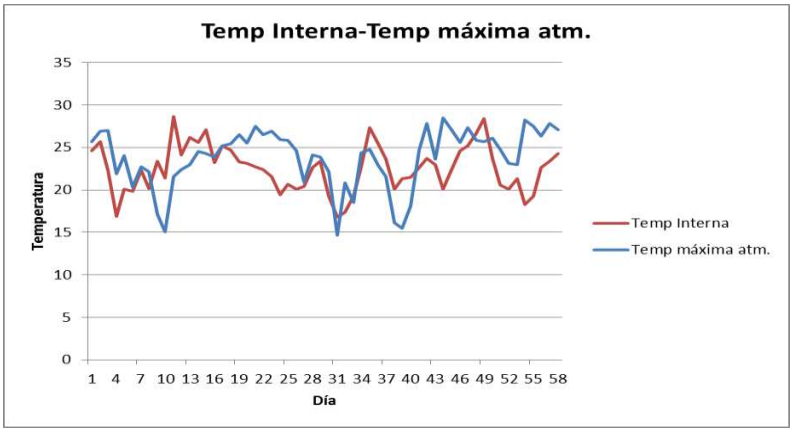


Figura 6. Temperaturas interna y externa del biodigestor.

Evaluación del pH.

El monitoreo del pH en el biodigestor se llevó a cabo desde la puesta en marcha hasta el final de la producción de biogás, este monitoreo fue realizado con papel indicador con un rango de 4.5-9 que marcaba de cinco en cinco unidades. Con ello logramos tener una medición del pH más acertada.

La producción de biogás se dio pasando 40 días de espera donde el pH osciló 5.5-6.5 y a partir de la generación de esté el pH osciló de 6.5-7.5. Estando este potencial de hidrogeno en los rangos aceptables para la metanogénesis. También hay que destacar que, antes de la producción de biogás el pH era demasiado ácido con valores iniciales de 5 que conforme al transcurso de los días fue alcalinizándose hasta llegar a condiciones aceptables.

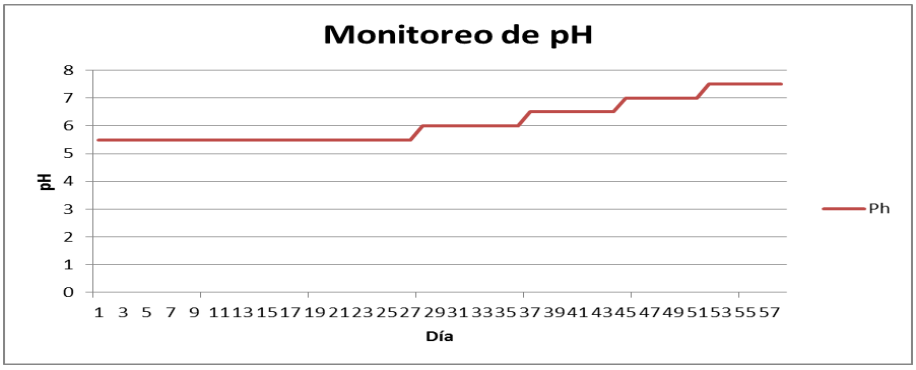


Figura 7. Monitoreo de pH.

Cabe señalar que, al no contar con un equipo electrónico el cual nos arrojara mediciones más exactas del pH dentro del reactor, la gráfica tiene un aspecto diferente, puesto que el papel indicador a pesar de estar en rangos pequeños no fue lo suficiente para generar datos más exactos. Por otro lado, podemos observar en la gráfica que, durante los casi 40 días en que el biodigestor no generaba biogás, era debido a las reacciones químicas previas a la metanogénesis (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis), en las que se necesitan rangos de

pH menores a 7 para la producción de las bacterias correspondientes a cada proceso, posteriormente a los procesos previos en la generación del biogás se puede observar que el pH aumentó y con ello la metanogénesis comenzó la producción del biogás.

CONCLUSIONES.

A pesar de que el biodigestor no contaba con algún aislante térmico, la temperatura interna oscilo dentro de los parámetros aceptables para permitir una correcta biodigestión.

Si bien, las temperaturas óptimas en el sustrato son de29-33°C, la temperatura experimental oscilo 17-29°C, esto habla de un buen funcionamiento, considerando las bajas temperaturas atmosféricas a las que fue sometido el biodigestor.

Los rangos obtenidos en el muestreo del pH fueron idóneos para cada una de las etapas en el proceso de la biodigestión, considerando que las bacterias metánicas trabajan con un pH de 6.8 y 7.4, admitiendo valores funcionales entre 6.8 y 7.8.

Las adaptaciones en el biodigestor comerical para que este produjese biogás, es decir, hacerlo anaerobio, fueron engorrosas, puesto que esté al no estar destinado para la generación de biogás, presento demasiadas fugas las cuales tuvieron que ser remediadas antes de su puesta en operación.

Si bien, el biodigestor logró trabajar de forma correcta con las modificaciones que se le implementaron, la tapa de este no era adecuada para obtener un cierre hermético, por lo que, se recomienda utilizar contenedores con tapas de menor tamaño o en su defecto con un cierre hermético.

El mezclador que en un principio fue diseñado con un sello de agua fue fallido, debido a que por la tubería de este se fugaba gran parte del biogás.

Se recomienda tener una alimentación de materia prima cada tercer día como mínimo, con el fin de tener un generación de biogás constante, a fin de tenerlo disponible en cualquier momento.

Por otra parte, la generación teórica de biogás es de 0.36m3 más o menos, en un estado óptimo, de los cuales el biodigestor sólo generó 0.848m3 , es decir sólo una cuarta parte de lo teórico, por lo que se considera un éxito, al encontrarse este sin mezclador y sin aislantes térmicos.

A partir del análisis y rediseño del equipo comercial en la generación de biogás, se logró la creación de un manual el cual contribuirá al manejo acertado del biodigestoras, para con ello en futuras pruebas este sea perfeccionado en cada sesión de prácticas de la asignatura de Sistemas de Ahorro de Energía, en el tema de energías renovables, demostrando que la utilización de Biodigestores anaerobios para el tratamiento de los residuos orgánicos permite procesos sostenibles y sustentables, tomando en cuenta que el uso de Biodigestores es una opción palpable para el suministro de energía en hogares de bajos recursos, de manera que se mejoren las condiciones de vida.

REFERENCIAS

DE LA MERCED, J. 2012. Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continúo. Tesis de maestría. México: Universidad Veracruzana. Recuperado el 5 de junio del 2015, de http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31560/1/delamercedjimenezdiego.pdf

HUERGA, I.R.; BUTTI, M.; VENTURELLI, L. 2014. Biodigestores de pequeña escala: un análisis práctico sobre su factibilidad. (1ª ed.). Santa Fe: INTA

La FAO.2011. Manual de biogás. Chile. Recuperado el 7 de febrero del 2015, de http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf.

LINK INDUSTRIAL. 2011. Agitadores. España. Recuperado el 10 de abril del 2015, de https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/7932/agitadores_2.pdf.

LOPEZ, C y LOPEZ, S. 2009. Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias de la universidad Veracruzana. Tesis de licenciatura. México: Universidad Veracruzana. Recuperado el 18 de febrero del 2015, de http://cdigital.uv.mx/bitstream/12345678/932/1/LopEZ%20MENDOZA%20CLAUDIA.pdf.

MERLIN, R. 2010. Producción de abono orgánico y biogás Mediante biodigestión anaeróbica de lodos Activos. Tesis de licenciatura. Chile: universidad de la serena. Recuperado el 22 de abril del 2015, de http://documents.mx/documents/tesis-merlin-rivera.html.

MONCAYO, G. 2005. Manejo ecológicamente compatible de las cuencas de Tungurahua; Digestión anaeróbica y diseño de biodigestores. Ecuador. Recuperado el 26 de marzo del 2015, de http://www.aqualimpia.com/ descargas.htm.

MOSCOSO, B. 2010. Potencial de la digestión anaerobia en la unidad de ganado lechero de Zamorano. Tesis de licenciatura. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana el Zamorano. Recuperado el 3 de mayo del 2015, de http://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/545.

RODRIGUEZ, G. Tanque IMHOFF, Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas Comunidades (pp.17-30). Recuperado el 28 de junio del 2015, de http://www.academia.edu/9474104/Tratamiento_de_Aguas_residuales_en_Peque%C3%B1as_Comunidades.

SECRETARIA DE ECONOMIA. 2001. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperado el 24 de mayo del 2015, de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-034-SCFI-2001.pdf.

TORRES, D y ORTEGAS, L. 2009. Desarrollo de un sistema de biodigestores y energías limpias. Perú. Recuperado el 8 de marzo del 2015, de http://compinformatidf.files.wordpress.com/2009/09/trabajofinal080909.pdf.

USO DE SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA EL ANÁLISIS DE LA MAGNITUD Y DIRECCIÓN DE VIENTO

Francisco de Jesús Zavaleta Velázquez[1], Paola Israde Burrola[1]

[1]Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. C.U. Toluca, Estado de México, México. C.P.50110. Teléfono: +52 (722) 2154512. **zavassss@gmail.com**

RESUMEN

El ser humano a través de la historia ha tenido curiosidad sobre los fenómenos meteorológicos y gracias a esto ha creado equipos que, en base a una diferencia de voltajes, son capaces de darnos un valor numérico el cual expresa una medición que se requiera. En el caso de los equipos que son utilizados para obtener datos del viento (anemómetros), los cuales están configurados para tomar mediciones cada 10 minutos para intervalos cortos de tiempo, no implica el manejo de muchos datos; el problema empieza cuando dichos datos son utilizados para estudiar la factibilidad de instalación de un aerogenerador en cierto lugar. Para estos casos, el intervalo de toma de datos es el mismo, pero se obtienen cuatro valores de cada uno que son: velocidad de viento, velocidad de ráfaga, dirección de viento y dirección de ráfaga. Cuando se hacen cálculos de cuantos datos hay que manejar en la estadística para un solo día se obtienen 576 datos para manejar, y cuando los estudios de viento requieren datos de un lugar de al menos cinco años, este número se convierte en 1´051,200 de datos. Este valor al ser tan grande nos pone a pensar que para manejar dichos datos en Excel sería muy incómodo y tardado, además de que se necesitan hacer demasiadas graficas que nos expliquen visualmente como está el valor del potencial eólico en el lugar. Por eso se programó en Matlab una serie de comandos harán posible hacer los cálculos necesarios en un solo paso.

Palabras clave: *velocidad de viento, velocidad de ráfaga, dirección de viento y dirección de ráfaga, potencial eólico.*

ABSTRACT

Humans through history have been curious about natural phenomena, and therefore has created devices that, based on a voltage difference, are able to give us a numerical value which expresses a measurement that is required. In the case of equipment that are used to obtain wind data (anemometers), which are configured to take measurements every 10 minutes for short intervals of time, it does not involve handling a lot of data; the problem begins when such data is used to study the feasibility of installing a wind turbine in a certain place. For these cases, the data collection interval is the same, but four values are obtained: wind speed, burst speed, wind direction and direction of the burst. When calculations of how much data is needed to handle in the statistics for a single day, 576 data handling are obtained, and when the wind studies require data from a place of at least five years, this number becomes 1´051,200 data. This huge value makes us think that, in order to handle such data in Excel, it would be very inconvenient and time consuming, besides, it is needed to do many graphs to show visually how the wind potential is in a place. Hence, it was programmed in Matlab a series of commands that will make possible the necessary calculations in a single step.

Keywords: *wind speed, burst speed, wind direction and direction of the burst, wind potential.*

INTRODUCCIÓN

El viento es un importante recurso energético, ya que la energía eólica es aquella que se obtiene por medio de la conversión de la energía cinética generada por las corrientes de aire, la cual es convertida gracias a aerogeneradores que aprovechan el movimiento de las masas de aire a través de aspas que hacen girar un motor eléctrico [3]. No obstante, para que haya un funcionamiento correcto del aerogenerador, se requiere que haya un estudio previo de la zona donde se pretenden instalar. Para ello hay estaciones meteorológicas que nos proporcionan los datos necesarios para hacer un análisis del potencial eólico de un lugar, para ver si es económicamente viable instalar un equipo [4].

JUSTIFICACIÓN

La razón de la programación de este código a través del software de MATLAB es la cantidad de datos que las estaciones meteorológicas proporcionan, ya que obtienen diversos parámetros del viento que son tomados en lapsos de 10 minutos y colocados en una tabla [5]. El principal inconveniente no es la captura de datos, sino es el manejo de ellos, ya que para un correcto análisis de potencial eólico de un lugar se requieren mínimo cinco años de información. La cantidad de datos puede llegar a ser realmente impresionante, además de tediosos de manejar. Aunque existen softwares que permiten hacer éste tipo de análisis, muchos requieren formatos de archivo difíciles de manejar y esta es otra razón por la cual se eligió el software MATLAB, pues puede trabajar con tablas de EXCEL que se encuentren en un orden establecido para el cálculo [5].

ANTECEDENTES

Hoy en día uno de los principales problemas que afronta la humanidad es la generación de energía eléctrica con un mínimo de impactos negativos hacia el medio ambiente. En 2009, más del 95% de la producción nacional de hidrocarburos provenía de campos que a la fecha se encuentran en decline [6]. Es por ello que se deben buscar fuentes alternativas que sustituyan a las actuales. Una de las formas de energía más antigua usada desde la antigüedad es la energía eólica, que fue una variante de usar las masas de aire para mover los molinos de viento que se ocupaban para moler las cosechas del campo o para el bombeo de agua. Estas primeras máquinas (figura 1) datan del siglo VI D.C. y existen indicios de que estas máquinas de eje vertical datan de 200 y 500 años antes de nuestra era. [2]

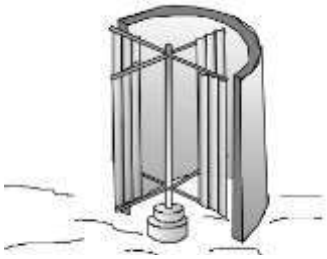


Figura 1. Primera máquina de eje vertical [2]

En los años 70s, con las primeras crisis petroleras, se retomó el interés por la energía eólica, pero en un sentido de uso energético al usar el flujo del aire para la generación de electricidad. Estos primeros aerogeneradores que se construyeron para generar energía eléctrica tenían la problemática principal de que su diámetro del rotor llegaba a ser muy grande y no generaba la energía suficiente para alimentar varios equipos, pues sencillamente llegaba a recargar una batería. Para los años 90s, la energía eólica había tenido un importante avance tal que se perfilaba como una de las fuentes de energía más importante entre las renovables. Con el paso del tiempo el costo de generación fue bajando, así como la tecnología fue avanzando a tal punto de que el diámetro del rotor de los equipos fue aumentando ocasionando que se pudiera aprovechar mejor el flujo de las masas de aire además de generar más energía (figura 2).

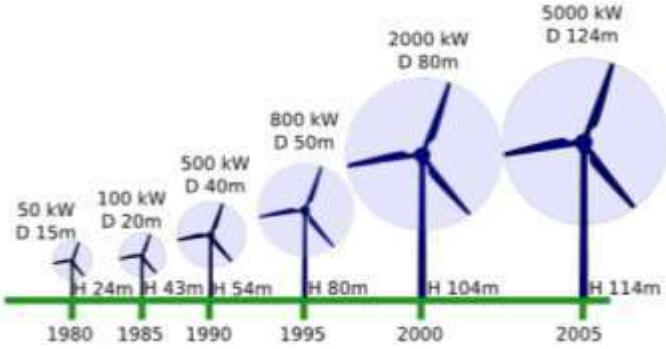


Figura 2. Evolución de los aerogeneradores a través de los años. [2]

No obstante, aunque la tecnología vaya avanzando de manera impresionante cada vez con equipos más eficientes y de bajos costos, estos no pueden llegar a alcanzar el punto máximo de eficiencia para el que fueron diseñados si no son colocados y orientados correctamente. Para lograrlo se requiere de estudios previos del potencial eólico del lugar, de preferencia deben tener 5 años de datos del flujo del aire en dicha zona, y esta información es obtenida a través de equipos llamados anemómetros, los cuales son colocados a una altura similar a la de un aerogenerador. Los datos son obtenidos en intervalos de 10 minutos y comúnmente proporcionan la velocidad y dirección de viento y la velocidad y dirección de ráfaga. Las definiciones anteriores se refieren en el caso de viento a la toma del valor en el minuto 10 de la velocidad y dirección de las masas de aire, y el término de velocidad y dirección de ráfaga se definen como el valor más alto tomado en el intervalo de los 10 minutos que pasaron.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

El siguiente trabajo muestra los datos obtenidos por la estación meteorológica automatizada de Huamantla (Estado de Tlaxcala). Se obtuvieron los datos meteorológicos proporcionados por la CONAGUA, los cuales indican datos tomados por tres años, y de ahí se procedió a sacar la información correspondiente para así obtener los datos sobre la rosa de vientos, variación diurna, velocidad de ráfaga, velocidad de viento, porcentaje de vientos y factor de planta.

Figura 3. Curva de potencia del aerogenerador LIAM F1-Mini [1]

Posterior al análisis de los datos obtenidos se observó que la velocidad de viento promedio para la localización de Huamantla fue de 1.96 m/s. Al observar un valor tan bajo se procedió a buscar en internet micro aerogeneradores que fueran capaces de darnos una generación de energía decente con una velocidad promedio tan baja.

El micro aerogenerador utilizado en esta estación corresponde al modelo LIAM F1-Mini cuya curva de eficiencia (figura 3) responde a los coeficientes del polinomio de grado 5 debido a que era la que mejor se ajustaba, estos coeficientes fueron obtenidos con la ayuda del EXCEL al hacer una gráfica que correspondiera aproximadamente con los puntos mostrados en la gráfica del aerogenerador.

[-0.0055 0.1461 -0.9335 -0.442 19.498 -22.153]

El código sugerido se hizo en el programa de Matlab versión 2014.a, la computadora utilizada fue una Lenovo Y700 con un procesador Core i7 de 8 núcleos a 2.6 GHz y 8 GB de RAM. El programa se realizó en base al diagrama de flujo siguiente:

1. Instrucciones de Funcionamiento

Para el inicio programa se pide el nombre del archivo de Excel del cual se obtendrán los datos con los que se trabajarán, y está diseñado para trabajar con 12 diferentes hojas de Excel, una por cada mes del año. El formato del nombre del archivo debe de ser: Nombre (No).xls, el nombre puede ser cualquiera, y en nuestro caso se ocupó como nombre la estación de donde provenían los datos; en total nuestra carpeta contenía 12 archivos: "Huamantla (1).xls a Huamantla (12).xls". El orden dentro de la hoja de Excel también es importante ya que como se ve en la imagen los datos deben de ir en las columnas C, D, E, F; primero las velocidades de viento y ráfaga y después las direcciones de viento y ráfaga.

```
clc
close all
clear all
disp('Progama de Velocidad Diurna de Viento, Direccion y Rafaga(MENSUAL)')
disp('-------------------------------------------')
disp('Instrucciones para el uso del progama')
disp('-------------------------------------------')
disp('A continuación inserta el nombre del archivo de excel(sin extension) donde esten recopilados tus datos,')
disp('este debe de encontrarse en la misma carpeta donde esta este progama,los datos deben de estar acomodados en la')
disp('primera hoja con direccion de viento(°) en la columna C y velocidad de viento(km/hr) en la columna E ')
disp('los datos de rafaga si es direccion de rafaga(°) en la columna D y velocidad de rafaga(km/hr) en la')
disp('columna F.Importante: Tus datos deben de comenzar desde las 0:00 horas y cada diez minutos y tus resultados se ')
disp('desplegaran en m/s)')
disp('-------------------------------------------')
format short g;
ade=1;
```

2. Obtención de datos y generación de nombre de las imágenes

Como se puede observar en el programa, el nombramiento de la hoja de Excel se obtiene con un comando *input* y después se procede a la conversión de columnas de Excel en un arreglo de "m renglones y una columna (m x 1)". Para que un software como Matlab pueda hacer las operaciones que se le pidan de enviar a un archivo de imagen las gráficas, estas tienen que existir antes de generarlas, o por lo menos una figura vacía, las cuales se definen dos veces ya que hay que hacer graficas de ambos de viento y de ráfaga.

```
fdc=input('¿Como se llama tu archivo de excel?:   ','s');

FPM=[];
PMV=[];
ETG=[];

for ty=1:12
%Toma de Datos
f=[fdc,'(',num2str(ade),').xls'];
zx=f;
g=readtable(f);
coldv=table2array(g(:,2));
coldr=table2array(g(:,3));
colvv=table2array(g(:,4));
colvr=table2array(g(:,5));
rov=1;
```

```
for jk=1:2

filename3=['Vdrv',zx,'.jpg'];
filename2=['Hrv',zx,'.jpg'];
filename4=['Tfrv',zx,'.jpg'];
filename5=['Pot',zx,'.jpg'];
filename6=['Rd',zx,'.jpg'];
filename7=['FFAn',zx,'.jpg'];
filename8=['VPm',zx,'.jpg'];
filename9=['TFPV',zx,'.jpg'];
filename10=['FPM',zx,'.jpg'];
if rov==1
vvp=colvv;
dd=coldv;
filename1=['RVv',zx,'.jpg'];
elseif rov==2
vvp=colvr;
dd=coldr;
filename1=['RVr',zx,'.jpg'];
end
r=height(g);
vv=[];
mn=1;
c=1;
```

3. Tratamiento de errores y conversión de unidades

Hay ocasiones en que los anemómetros tienen pequeñas fallas en su funcionamiento, llegado a registrar valores que se salen de la media del rango. En este caso hay que hacerlos muy pequeños para que no lleguen a afectar al momento de hacer promedios y organizarlos, y esto se hace dividiéndolos entre una cantidad de 100 para que su aparición no afecte a la media general. La siguiente parte de conversión de unidades se refiere a que los datos en general vienen en km/hr y para el caso en específico de este código manejamos m/s.

```
%Tratamiento de errores
while c<=r
tev=vvp(mn);
if tev>100
    vv=[vv (tev/10)];
else
    vv=[vv tev];
end
mn=mn+1;
c=c+1;
```

```
%Conversion de Unidades
vvms=vv/3.6;
vv=vvms;
```

4. Rosa de los Vientos

La siguiente parte es el acomodo de los datos para poder generar la rosa de los vientos, los cuales tienen que ser diferenciados de acuerdo a su dirección (Norte, Sur, etc.). La primera parte es la definición de los vectores que se van a llenar: N, S, E, etc. Después, con la ayuda de un comando "*if*" se coloca el valor del vector dirección de acuerdo a la dirección que le corresponde [7]. Posteriormente, de acuerdo a los vectores generados se obtiene la cantidad de datos en cada uno de estos, ya que será la magnitud del vector en la rosa de los vientos. Se descomponen los vectores en sus componentes de X y Y, para ser multiplicados por su magnitud y colocados en un plano de brújula; después de darle formato a los vectores y al plano, es enviado como imagen al folder donde se encuentra el programa. Este proceso se lleva a cabo dos veces una para dirección de viento y otra para ráfaga.

```
%Datos de la Grafica de la Rosa de los Vientos
while a<=r
    z=dd(i);
 if z>=348.75||z<11.25
    N=[N z] ;
 elseif z>=11.25&z<33.75
    NNE=[NNE z] ;
 elseif z>=33.75&z<56.25
    NE=[NE z] ;
 elseif z>=56.25&z<78.75
    ENE=[ENE z] ;
 elseif z>=78.75&z<101.25
    E=[E z] ;
 elseif z>=101.25&z<123.75
    ESE=[ESE z] ;
 elseif z>=123.75&z<146.25
    SE=[SE z] ;
 elseif z>=146.25&z<168.75
    SSE=[SSE z] ;
 elseif z>=168.75&z<191.25
    S=[S z] ;
 elseif z>=191.25&z<213.75
    SSO=[SSO z] ;
 elseif z>=213.75&z<236.25
    SO=[SO z] ;
 elseif z>=236.25&z<258.75
    OSO=[OSO z] ;
 elseif z>=258.75&z<281.25
    O=[O z] ;
 elseif z>=281.25&z<303.75
    ONO=[ONO z] ;
 elseif z>=303.75&z<326.25
    NO=[NO z] ;
 elseif z>=326.25&z<348.75
    NNO=[NNO z] ;
 end
 i=i+1;
 a=a+1;
```

```
%Grafica de Rosa de los Vientos

rvh=figure;
grv=[lN*cosd(0) lNNE*cosd(22.5) lNE*cosd(45) lENE*cosd(67.5) lE*cosd(90) lESE*cosd(112.5)
grva=[lN*sind(0) lNNE*sind(22.5) lNE*sind(45) lENE*sind(67.5) lE*sind(90) lESE*sind(112.5
mxd=[lN,lNNE,lNE,lENE,lE,lESE,lSE,lSSE,lS,lSSO,lSO,lOSO,lO,lONO,lNO,lNNO];
max_lim =max(mxd*1.5);
x_fake=[0 max_lim 0 -max_lim];
y_fake=[max_lim 0 -max_lim 0];
h_fake=compass(x_fake,y_fake);
hold on;
h=compass(grv,grva);camroll(90),camorbit(180,180)
colors=[1 1 0
     0 0 0
     0 1 0
     0 1 1
     1 0 0
     1 0 1
     128/255 128/255 1
     240/255 120/255 0
     64/255 0 128/255
     128/255 64/255 0
     0 64/255 0
     128/255 128/255 128/255
     0 0 1
     0 128/255 128/255
     128/255 0 0
     1 128/255 128/255];
```

5. Histograma de Velocidades

El siguiente paso es hacer un histograma, que depende del porcentaje de las velocidades de viento y de ráfaga, pero sobrepuestos en una misma gráfica. Para este paso es necesario normalizar los valores de velocidad para que, al momento de hacer los intervalos, concuerden los datos. Posterior a esto se hace proceso para calcular viento y ráfaga igual que en los anteriores, esto para generar ambos archivos de imagen de viento y ráfaga.

```
%Datos de Histograma de Velocidades en Rango Normalizados
fciav=[];
fciavp=[];
df=1;
sf=1;
limi=0.1;
lims=1;
lk=1;

while limi<=max(vv)
    while lk<=r
     gh=vv(lk);
     if gh>=limi&gh<lims
     fciav(sf,df)=[gh];
     df=df+1;
     end
 lk=lk+1;
    end
    sf=sf+1;
    df=1;
    limi=limi+1;
    lims=lims+1;
    lk=1;
end

l=1;

for n=1:length(fciav(:,1))
fp=nnz(fciav(l,:));
fciavp(l,n)=fp;
l=l+1;
end
```

```
fre=(fciavp/sum(fciavp))*100;
mfvx=[];
jm=.5;

for gh=1:length(fre)
    rf=(l)*(jm);
    mfvx=[mfvx rf];
    jm=jm+1;
end

%Datos de Grafica de Variación Diurna y Ejes-Valores de Histograma

if rov==1
    TVV=TV;
    hll=FV;
    hhv=fre;
    ejxv=mfvx;
    fciavv=fciavp;
elseif rov==2
    hl2=FV;
    hhr=fre;
    ejxr=mfvx;
    fciavr=fciavp;
end
close all
rov=2;
end
```

```
%Empieza a Graficar las velocidades del viento y de rafaga
%Histograma de Velocidades
if length(ejxr)>length(ejxv)%Se igualan los vectores de viento y rafaga en longitud
   mfvx=ejxr;
elseif length(ejxv)>length(ejxr)
   mfvx=ejxv;
end
if length(hhv)<length(mfvx)
   for zv=1:(length(mfvx)-length(hhv))
      zz=0;
      hhv=[hhv zz];
      fciavv=[fciavv zz];
        end
elseif length(hhr)<length(mfvx)
   for zv=1:(length(mfvx)-length(hhr))
      zz=0;
   hhr=[hhr zz];
   fciavr=[fciavr zz];
   end
end
color=[0.2,0.2,0.8];
color2=[0,0.7,0.7];
hv=figure;
width1 = 0.8;
```

6. Graficas de Velocidad de Viento y Potencia del Aerogenerador

En unos valores anteriores se ejecutó un comando para que, al momento de hacer la media de un grupo de valores, los valores cero no contaran en esta, lo que permitió sacar la velocidad de viento promedio por hora para cada mes. También después de haber obtenido estos datos nos fue posible sustituirlos en la ecuación del polinomio que rige al aerogenerador (proporcionado generalmente por el fabricante), esto para obtener la energía promedio producida al día por el aerogenerador, además de que al multiplicarlo por el valor de tarifa 1 de la CFE se obtiene el posible ahorro promedio al mes.

```
%Variación Diurna
Vd=figure;
ach=[0:143];
vd=plot(ach,hll);
set(gcf,'NumberTitle','off')
set(gcf,'Name','Variación Diurna')
```

```
%Potencia del Aerogenerador Generada por Viento

TBB=[];%Elimina los ceros para que no haya valores negativos de Potencia
for jh=1:length(TVV)
for az=1:(numel(TVV)/144)
    dg=TVV(jh,az);
    if dg==0
        TBB(jh,az)=NaN;
    else
        TBB(jh,az)=dg;
    end
end
end

TVV=TBB;


paero=[-0.0005 .0412 -1.3123 18.263 -99.551 189.95 -12.827]%polinomio del aer
PA=polyval(paero,TVV);
SPA=[];
l=1;

for n=1:144
spa=nansum(PA(1,:));
SPA(l,n)=spa;
l=l+1;
end
```

```
%Energia Generada
gf1=figure
pgf1=plot(0:143,SPA)
set(gcf,'NumberTitle','off')
set(gcf,'Name','Energia Generada')
 xlabel('Horas del Dia');
 ylabel('Energia Generada (Watts) ');
 set(pgf1,'LineWidth',3);
 set(pgf1,'Color',color)
saveas(gf1,filename6,'jpg');



etg=sum(SPA/6);
ETG=[ETG etg];
fpm=etg/(30*24*1500)
pmv=nanmean(nanmean(TVV));

FPM=[FPM fpm];
PMV=[PMV pmv];
```

7. Tablas de Frecuencia de Velocidades, direcciones, potencia, energía generada y factor de planta

Con la ayuda de la herramienta "*uitable*" se pudo hacer tablas las cuales muestran los datos numéricos de las gráficas [7]. De igual forma se mostró la gráfica del factor de planta que demuestra el porcentaje de la energía total posible que se aprovecha por parte del aerogenerador. Al final de correr el programa, todas las gráficas y tablas son guardadas como imagen en la carpeta donde se encuentre, esto para su posterior análisis.

```
%Tabla de Frecuencias
vran=[];
limi=0.1;
lims=1;

for gb=1:length(hhr)
    rvd=['Velocidades de ',num2str(limi),' a ',num2str(lims),' m/s'];
    vran=[vran rvd];;
    limi=limi+1;
    lims=lims+1;
end

%Datos de de Tabla de Frecuencias
fvpt=figure;
cnames = {'Frec. Vel. de Viento' '% Vel. de Viento' 'Frec. de Vel. de Rafaga' '% Vel. de Rafaga'};
rnames = vran;
tfm=[fciavv' hhv' fciavr' hhr'];
t=uitable(fvpt,'Data',tfm,'ColumnName',cnames,'RowName',rnames,'Position',[50 50 1100 350]);
set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
set(gcf,'NumberTitle','off')
set(gcf,'Name','Tabla de frecuencias de Velocidad')
saveas(fvpt,filename4,'jpg');

ade=ade+1;
close all
end
```

```
VPVV=[PMV mean(PMV)];
VPFP=[PPM mean(PPM)];
EIIG=[EIG sum(EIG)];

CEG=EIG*0.8640;
CEGG=[CEG sum(CEG)];

mes={'ENERO' 'FEBRERO' 'MARZO' 'ABRIL' 'MAYO' 'JUNIO' 'JULIO' 'AGOSTO' 'SEPTIEMBRE' 'OCTUBR
%Datos de de Tabla de Frecuencias
tfpyv=figure;
cnames = {'Velocidaes de Viento (m/s)' 'Energia Generada por Mes (Watts*hr)' 'Factor de Plan
rnames = mes;
tfm=[VPVV' EIIG' (VPFP*100)' CEGG'];
t=uitable(tfpyv,'Data',tfm,'ColumnName',cnames,'RowName',rnames,'Position',[50 50 1100 350])
set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
set(gcf,'NumberTitle','off')
set(gcf,'Name','Tabla de Factor de Planta Y Velocidad')
saveas(tfpyv,filename5,'jpg');

disp('Listo tus graficas estan en tu carpeta')
```

RESULTADOS

Los datos que se ocuparon para probar el funcionamiento del programa fueron los de la estación ubicada en Huamantla, de los años 2013, 2014 y 2015, en la siguiente sección se muestran las grafica obtenidas a través del programa para el año de 2014. Es importante mencionar que por cuestión de espacio no se muestran las gráficas mensuales, en su lugar se presentan gráficas anuales que corresponden al mismo periodo.

- **Velocidad promedio mensual de Haumantla en el 2014**

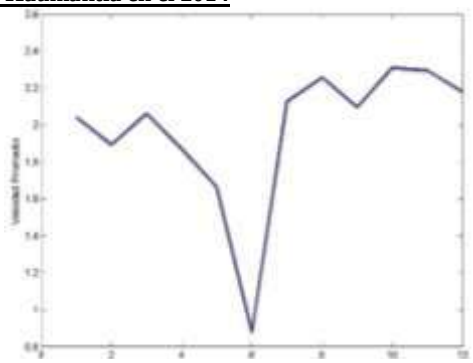


Figura 4. Velocidades promedio registradas en el 2014. Se observa que el rango oscila en los 2 m/s.

- **Velocidad promedio por mes en m/s rosas de los vientos**

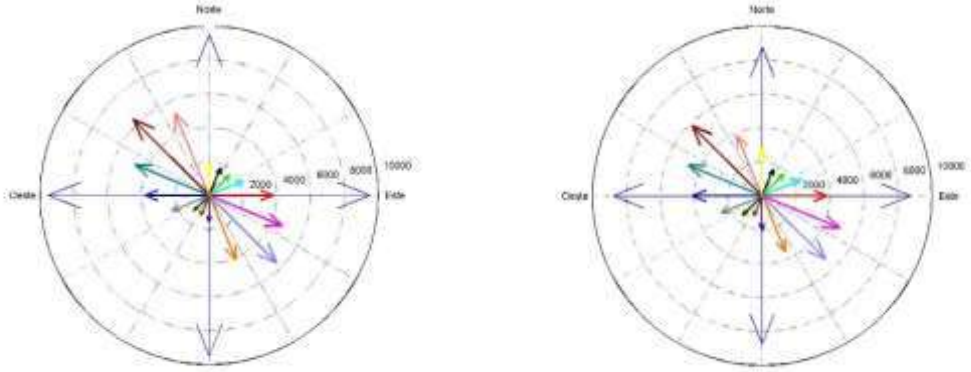


Figura 5. a) Velocidad de ráfaga anual 2014 y b) velocidad de viento anual 2014. Se observa que para ambas gráficas el viento proviene del noroeste y sureste.

- **Histograma de velocidades de viento y ráfaga en Huamantla en el 2014**

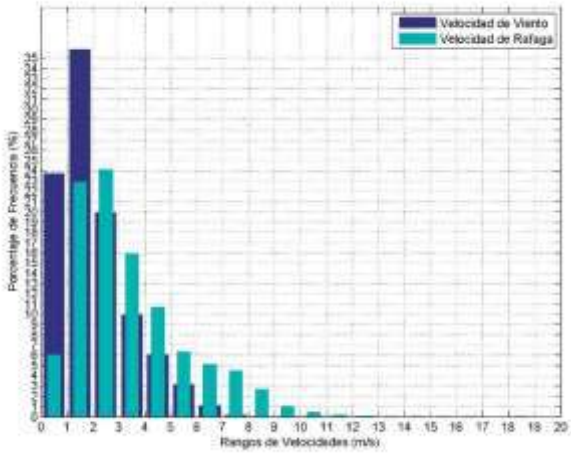


Figura 6. El porcentaje de frecuencias muestra que los valores para velocidad de ráfaga y viento se concentran entre 1 y 3 m/s.

- **Velocidad promedio en un día promedio de un año**

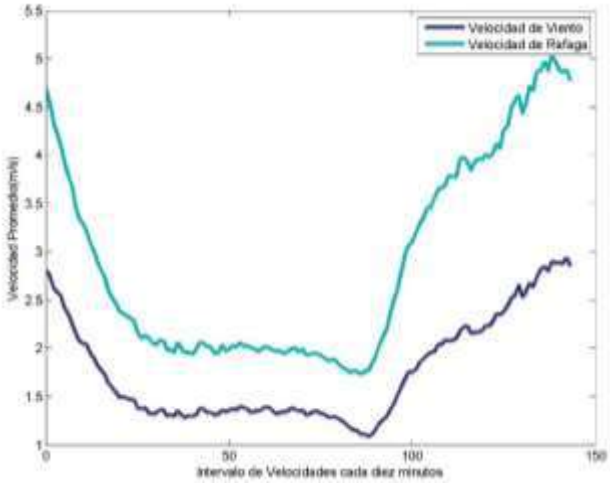


Figura 7. Se realizan144 mediciones para la velocidad de viento y de ráfaga en un día, para cada uno de los 365 días del año. Aquí se muestra un promedio de la media de un día.

- **Variación del factor de planta mensualmente en el año 2014 en Huamantla**

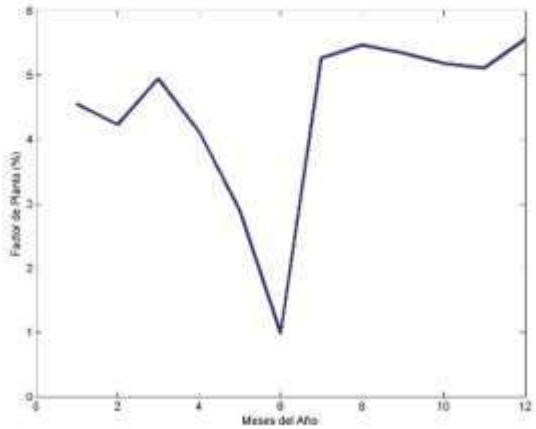


Figura 8. Capacidad en porcentaje que ocupa el aerogenerador para producir energía eléctrica. Se observa que el factor de planta no sobrepasa el 10%, lo que indica que no es muy factible la puesta en marcha de un aerogenerador en dicha zona.

- **Tabla de velocidades promedio de viento, energía generada, factor de planta y energía producida**

	Velocidaes de Viento (m/s)	Energia Generada por Mes (Watts*hr)	Factor de Planta(%)	$ DE ENERGIA PRODUCIDA
ENERO	2.0427	4.9176e+04	4.5533	4.2488e+04
FEBRERO	1.8920	4.5678e+04	4.2295	3.9466e+04
MARZO	2.0821	5.3378e+04	4.9424	4.6119e+04
ABRIL	1.8882	4.4503e+04	4.1206	3.8450e+04
MAYO	1.6627	3.1268e+04	2.8952	2.7016e+04
JUNIO	0.8759	1.0620e+04	0.9833	9.1756e+03
JULIO	2.1258	5.6838e+04	5.2628	4.9108e+04
AGOSTO	2.2568	5.9037e+04	5.4664	5.1008e+04
SEPTIEMBRE	2.0963	5.7707e+04	5.3432	4.9859e+04
OCTUBRE	2.3092	5.5946e+04	5.1802	4.8337e+04
NOVIEMBRE	2.2937	5.5146e+04	5.1061	4.7646e+04
DICIEMBRE	2.1801	6.0004e+04	5.5559	5.1843e+04
PROMEDIO ENERGIA TOTAL o $ TOTAL	1.9722	5.7930e+05	4.4699	5.0052e+05

Tabla 1. Datos promedios generados por la estación meteorológica de Huamantla, arrojados por el programa en Matlab. La energía se obtiene con la sustitución de valores en el polinomio del aerogenerador.

CONCLUSIONES

Con la creación de este programa en Matlab se puede observar la importancia de los softwares en el tratamiento y acomodo de datos estadísticos, en especial para el área de energía eólica ya que son millones de datos los que se recolectan con las estaciones meteorológicas, los cuales son de vital importancia para hacer análisis del potencial eólico de los lugares en los que son factibles el uso de la energía eólica.

Con la creación de este programa se logró facilitar el análisis de los datos de viento de algún lugar debido a la cantidad de datos que usualmente se obtienen de una estación son millones y con este algoritmo se pueden analizar con un simple comando, se observó que siempre y cuando los datos estén en un orden correcto, con una mínima cantidad de errores y mientras los anemómetros estén bien ajustados el programa puede funcionar sin falla alguna, la información que nos brinda el programa tiene una gran utilidad ya que nos proporciona la información suficiente para saber si la colocación de una aerogenerador en la locación de la estación es una buena opción al decirnos si la cantidad de viento será capaz de darnos una cantidad de energía suficiente para recuperar la inversión del aerogenerador, además de tener la información suficiente como para orientar los aerogeneradores que se compren para poder aprovechar al máximo el flujo de viento y por lo tanto la energía generada esto también con ayuda de la ecuación de aerogenerador y el factor de planta.

REFERENCIAS

1. THE-ARCHIMEDES. 29/04/2016]; Available from: http://dearchimedes.com/pdf/Curve_windturbine.jpg.
2. Hernández, O.R., *Análisis de la confiabilidad de datos anemométricos empleados en la estimación de energía eoloeléctrica*, in *Centro de Investigación en energía*. 2010, Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Hernández, A. and O.R. Ortega, *Análisis estadístico del viento como recurso energético*, in *Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos, Asociación Civil*. 2014, Instituto Politécnico Nacional.
4. Neira, R.H. and M.V. Velecela, *Estudio de factibilidad de generación eléctrica mediante energía eólica y energía fotovoltaica para el sector de Garahzhí de la Parroquia Quingeo perteneciente a la ciudad de Cuenca*. 2014, Universidad Politécnica Salesiana.
5. Magaña, E., et al., *Software para el análisis de datos meteorológicos*, in *Semana de Divulgación y Video Científico*. 2008.
6. Comisión-Nacional-de-Hidrocarburos, *Informe de labores*. 2010.
7. García, Á.F. *Medidas de la velocidad y dirección del viento*. 2013; Available from: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/viento.html.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO PARA TEMIXCO, MORELOS.

José de Jesús Quiñones Aguilar, Isaías Moreno Cruz, Camilo A. Arancibia Bulnes
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada de Xochicalco s/n, 62580 Temixco, Morelos, México. **Email: jjqa@ier.unam.mx**

Fernando U. Morales López
Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca, Avenida Universidad s/n, 71270 San Pablo Huixtepec, Oaxaca, México.

David Riveros Rosas
Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la investigación Científica s/n, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04150 Ciudad de México, D.F.

RESUMEN

Este artículo, tiene como finalidad presentar los resultados y el procedimiento estadístico para la obtención de un año meteorológico típico (AMT) con datos tomados de la Estación Solarimétrica y Meteorológica (ESOMET-IER), instalada en el Instituto Energías Renovables de la UNAM, que se localiza en Temixco Morelos, correspondiente a una latitud de 18°50'25.62"N, longitud de 99°14'10.49"O y una altura sobre el nivel del mar de 1253 m. El año meteorológico típico se construye a partir de datos de medidos durante un período de 6 años. Para esto se examinan las diferentes propuestas para la construcción de un AMT de los autores Naseem M. Sawaqed[1], Olayinka S. Ohunakin[2], A. Argiriouel[3], y el estándar internacional ISO 15927-4. Todas estas propuestas tienen como factor común un análisis estadístico de sensibilidad de diferentes pesos asignados a diferentes parámetros meteorológicos. El caso de estudio de este articulo esta enfatizado en el cálculo del AMT para la modelación de sistemas de concentración solar, por lo que el parámetro con mayor peso es la variable de irradiancia solar.

Palabras clave: Irradiancia solar; Irradiancia directa normal; Año meteorológico típico.

ABSTRACT

This article aims to present the results and the statistical procedure for obtaining a typical meteorological year (TMY) based on data taken from the Solarimetric and Weather Station (ESOMET-IER), installed in the Renewable Energy Institute of UNAM. This station is located in Temixco Morelos, corresponding to latitude 18 ° 50'25.62 "N, longitude 99 ° 14'10.49 " W, and 1253 m height from sea level. The typical meteorological year is constructed from data measured over a period of 6 years. For this, the various proposals for the construction of a TMY from M. Naseem Sawaqed [1], Olayinka S. Ohunakin [2], A. Argiriouel [3] and ISO 15927-4 International Standard, are examined. All these proposals have in common a statistical analysis of sensitivity of different weights assigned to different meteorological parameters. The case study of this article emphasizes the calculation of TMY for modeling of solar concentrating systems, so the parameter with the highes weight is solar irradiance.

Keywords: Solar Irradiance; normal direct irradiance; typical meteorological year.

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina un año meteorológico típico (AMT), para un lugar determinado, a un conjunto de datos de mediciones reales, comúnmente por hora, que forman un año completo de datos meteorológicos y de irradiancia solar. Este AMT, a diferencia de un año calendárico real, se construye a partir de datos de mediciones de varios años, buscando crear un año artificial, que sea representativo del lugar. Este tipo de información es muy útil para simular el comportamiento de largo plazo de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar.

Para determinar el AMT en el presente caso, se consideraron seis años consecutivos de datos medidos de 2010 a 2015. De esta manera el AMT para Temixco Morelos, fue determinado seleccionando cada uno de los 12 meses que conforman a un año, de de entre los meses medidos para estos seis años, basándonos en el procedimiento y el análisis estadístico que se presenta en el siguiente artículo. Cabe mencionar que el AMT determinado en este trabajo considera como preponderante la variable de la irradiancia solar global, a la cual se le

designó el mayor peso. En un futuro cercano se buscará generar un año basado en datos de radiación directa, específicamente para simulación de sistemas de concentración solar.

Por otro lado, con el método estadístico aquí presentado es posible determinar años meteorológicos para desarrollos o estudios de cualquier otra área, por ejemplo para el área de eólica se tendría que considerar como variable preponderante a la velocidad y dirección de viento y así para otros estudios en otras áreas, habría que considerar la variable preponderante para cada caso específico. Los años meteorológicos típicos resultantes serán diferentes, dependiendo a qué variable se le otorgue más peso.

2. DESARROLLO

2.1. Determinación de la distribución acumulativa de corto y largo plazo.

Este estudio parte de una base de datos con registros cada 10 minutos para cinco variables (irradiancia solar global, temperatura, humedad, velocidad de viento y presión), de esta base de datos se determinan los promedios diarios para cada una de las seis variables. Una vez obtenida esta información se procede de la manera siguiente:

El primer paso es obtener las distribuciones de probabilidad acumulativas para cada variable, para cada uno de los meses medidos. Estas se llaman distribuciones acumulativas de "corto plazo". Además se juntan todos los datos para un determinado mes de todos los años y se obtiene una distribución de probabilidad acumulativa de "largo plazo". Primero se ordenan los datos del conjunto que se esté considerando, ya sea de corto o largo plazo, de menor a mayor. Luego se asignan los valores de la probabilidad acumulativa (CDF, por sus siglas en inglés) mediante la ecuación siguiente

$$CDF_j = \frac{1}{n} j\,, \qquad j = 1,2,\ldots n \tag{1}$$

Para el corto plazo, n es el número de datos que corresponde al mes en cuestión, por ejemplo para enero n es igual a 31, y j corresponde al índice de rango que corresponde a un cierto dato dentro del conjunto ordenado de manera ascendente, es decir $j = 1,2,\ldots\ldots,n$. Así de esta forma el elemento de menor magnitud le correspondería el primer número de orden (1/31) y hasta el valor más alto del mes, con índice n, que le correspondería un valor de CFD igual a la unidad (n/n).

La distribución acumulativa de corto plazo determina la probabilidad de que valores menores a cierto valor específico se presenten durante ese mes de registros. Por otro lado, la distribución acumulativa de largo plazo determina la probabilidad de que lo mismo ocurra para un mes dado (por ejemplo, Enero) a lo largo de cualquiera de los seis años en cuestión. Todo este análisis se realiza por separado para cada una de las cinco variables. La figura 1 presenta la distribución acumulativa para la variable de irradiancia solar global para cada uno de los meses de Enero de los seis años, así como la distribución acumulada de largo plazo.

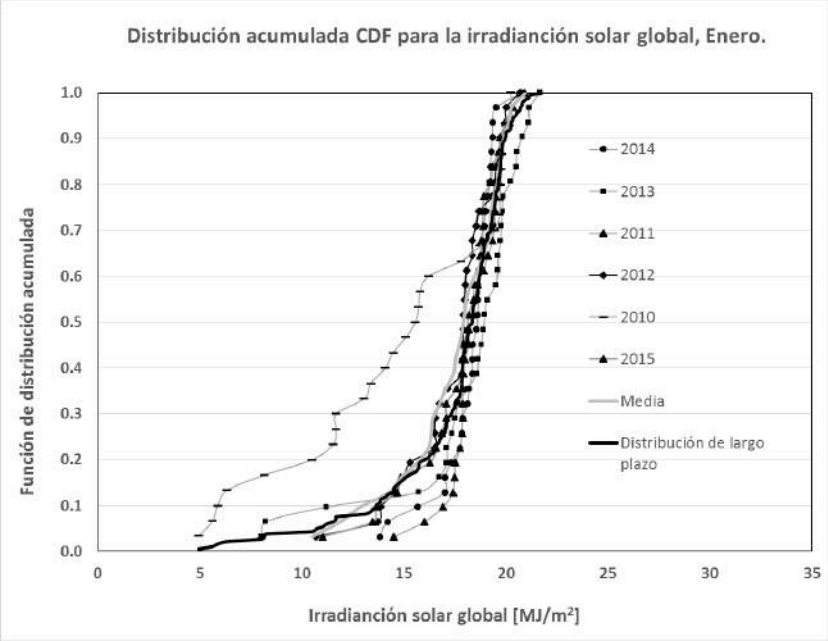


Figura 1. Distribución acumulativa para la variable de irradiancia solar global, para el mes de enero.

2.2. Determinación del estadístico de Finkelstein-Schafer.

El segundo paso es determinar el factor de Finkelstein-Schafer FS, que sirve de base para un método estadístico no paramétrico [5]. Este factor determina determina qué tan próxima es cada una de las CDF de corto plazo con respecto a la CDF de largo plazo. Para cada día de todo el conjunto de datos de cierta variable, se obtiene la diferencia absoluta δ_i, entre los valores de probabilidad que le corresponden a

ese día particular en la CDF de corto plazo y la de largo plazo. De esta menara la ecuación que determina el FS_j para cada mes está dada por

$$FS_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\delta_i \quad (2)$$

Donde i se mueve sobre el número de datos totales disponibles N para un cierto mes, al juntar los seis años y j es el parámetro de la variable meteorológica considerada; es decir, para la irradiación solar global $j = 1$, para la temperatura media $j = 2$ y así sucesivamente. La tabla 1 muestra las valores calculados par el factor FS, correspondientes al mes de enero y par los seis años en cuestión.

Tabla 1. Valores estadísticos del factor de Finkelstein-Schafer para el mes de enero de cada año.

Año	FS
2010	0.151
2011	0.188
2012	0.047
2013	0.084
2014	0.063
2015	0.081

2.3. Determinación del índice ponderado compuesto WS

El siguiente paso es agrupar los FS calculados, para las seis variables consideradas en este estudio. Dicha agrupación se lleva a cabo mediante el uso del índice ponderado compuesto, como lo proponen Sawaqed y colaboradores [1], el cual se define por

$$WS = \sum_{j=1}^{m} w_j FS_j \quad (3)$$

Donde, w_j es el peso ponderado asignado a cada una de las variables, FS_j es el factor determinado en el paso anterior y m es el número de términoss de la suma, determinado por el número de parámetros o variables meteorológicas consideradas. La tabla 2 muestra los factores de peso que fueron asignados a cada una de las variables meteorológicas. Estos factores son arbitrarios, pues dependen de qué tanto peso se le desee dar a cada variable. Los valores usados en este caso son los convencionales, donde se le da un peso mucho mayor a la radiación solar que a las otras variables.

Tabla 2. Índice ponderado W_j, asignado a cada variable meteorológica.

Parámetro	Factor W_j
Irradiación solar global	6/10
Temperatura promedio	1/10
Humedad relativa	1/10
Velocidad de viento	1/10
Presión barométrica	1/10

Para cada FS determinado por cada variable, se tendrá que determinar un WS para cada uno de los meses, de cada uno de los años. Finalmente, la suma de cada uno de estos WS por mes nos dará el WS final para ese mes en cuestión. La tabla 3 muestra el índice WS determinado para los seis años de análisis.

Una vez obtenidos los WS para cada uno de los meses y años, se procede a ordenar de forma ascendente los meses de acuerdo a este factor. De esta lista ascendente se seleccionan los primeros cinco años, que serán los posibles candidatos para seleccionar el mes que conformara el año meteorológico. La tabla 4 muestra la lista para el mes de enero. En particular, como se puede ver para el mes de enero, los mejores candidatos parecen ser los de los años 2010, 2011, pero es necesario considerara un conjunto más amplio de años para aplicar otros criterios

Tabla 3. Valores estadísticos del índice ponderado WS.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	0.004	0.010	0.012	0.014	0.009	0.010	0.004	0.010	0.008	0.020	0.010	0.013
2011	0.006	0.015	0.013	0.024	0.009	0.013	0.006	0.012	0.024	0.018	0.017	0.021
2012	0.015	0.023	0.009	0.007	0.014	0.012	0.010	0.009	0.007	0.014	0.007	0.013
2013	0.007	0.014	0.005	0.011	0.004	0.013	0.004	0.008	0.023	0.007	0.016	0.002
2014	0.009	0.022	0.010	0.008	0.006	0.006	0.017	0.006	0.012	0.014	0.007	0.013
2015	0.009	0.005	0.006	0.020	0.007	0.008	0.011	0.010	0.005	0.010	0.023	0.015

Tabla 4. Orden ascendente del factor WS, para el mes de enero.

Año	Ene
2010	0.004
2011	0.006
2013	0.007
2014	0.009
2015	0.009
2012	0.015

2.4. Determinación de los meses del AMT.

De acuerdo a lo anterior, para el mes de enero los posibles candidatos serían el 2010, 2011, 2013, 2014 y 2015. Una vez determinados los meses candidatos se procede de la manera siguiente:

En primer lugar, continuando con el ejemplo del mes de enero, se determina la media y la mediana de las distribuciones de largo y corto plazo, para la variable de mayor ponderación, que es la irradiación solar global. Una vez obtenido estos valores, se determina el valor absoluto de las diferencias entre las medias de corto y largo plazo, así como entre las medianas de corto y largo plazo, para los años que han sido seleccionados como candidatos. La tabla 5 muestra las diferencias absolutas mencionadas anteriormente.

Tabla 5. Determinación de las diferencias de medias y medianas para el mes de enero entre el corto y largo plazo.

Enero					
Año	**2010**	**2011**	**2013**	**2014**	**2015**
Diferencia en la media	2.68	0.96	0.62	0.71	0.19
Diferencia en la mediana	2.32	0.41	1.01	0.66	0.20

Una vez obtenidos las diferencias entre medias y medianas, en este caso para los cinco años seleccionados, se procede tabular dicha información seleccionando el parámetro que tenga el valor máximos para cada año, ya sea la media o la mediana. Posteriormente estos máximos valores obtenidos se ordenan de manera ascendente y el menor menor valor de los máximos obtenidos definirá el año a utilizar. En este ejemplo, para el mes de enero que formara parte del AMT. De este último análisis estadístico se determinó que para el mes de enero se tomara al año 2015 como el primer mes que conformara el AMT.

Tabla 7. Determinación de diferencias entre medias y medianas de largo y corto plazo para el mes de enero y jerarquización para la conformación del AMT. Se subraya elmes seleccionado.

Enero				
Año	**Dif. Media**	**Dif. Mediana**	**Dif. Máxima**	**Orden**
2010	**2.68**	2.32	2.68	5
2011	**0.96**	0.41	0.96	3
2013	0.62	**1.01**	1.01	4
2014	**0.71**	0.66	0.71	2
2015	0.19	**0.20**	0.20	**1**

3. RESULTADOS

De forma análoga se llevó a cabo el cálculo correspondiente para determinar los once meses restantes, quedando representados cada uno de ellos por los años que se muestran en la tabla .

Tabla 8. Meses que conforman el AMT para Temixco, Morelos.

Año Meteorológico Típico ESOLMET IER-UNAM												
Año	2015	2011	2011	2013	2014	2010	2015	2015	2014	2013	2014	2014
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.

La grafica 2 muestra las distribuciones para la irradiación solar global, para cada uno de los cinco años seleccionados, así como la media y la distribución correspondiente a los meses que conformaron al AMT. Cabe mencionar que entre las distribuciones del AMT y la media se obtuvo una máxima diferencia porcentual del 5.3%.

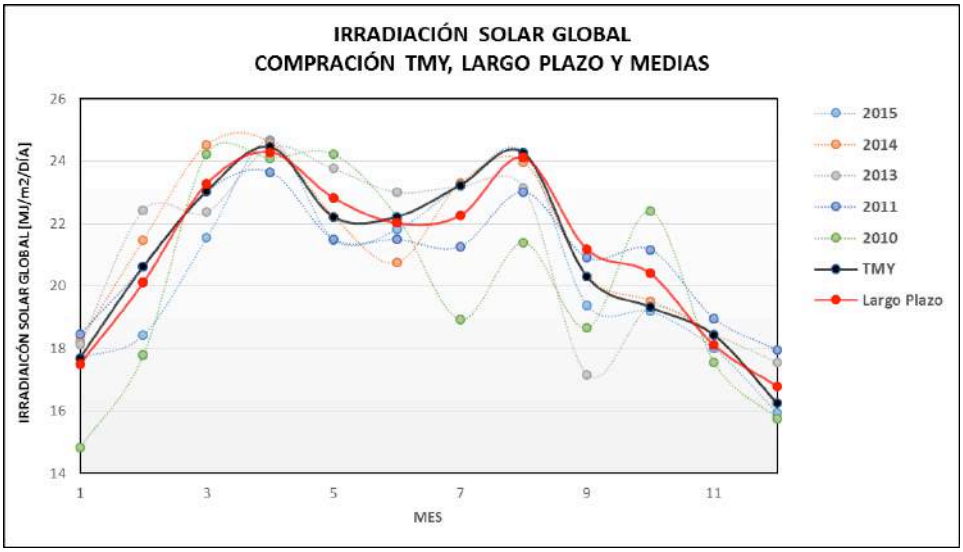


Figura 3. Distribuciones de la irradiación solar global en un plano horizontal. Año meteorológico típico (TMY, por sus siglas en inglés), media de largo plazo y medias mensuales para los años 2010, 2011, 2013, 2014 y 2015.

4. CONCLUSIONES

De lo anterior podemos concluir que el método aquí presentado es un método confiable para la determinación de años meteorológicos típicos (AMT), que da una buena cercanía con los valores medios observados, pero introduciendo la variabilidad diaria que se requiere para las simulaciones dinámicas de sistemas solares térmicos. Además podemos concluir que los promedios de largo plazo son una buena aproximación para las medias del AMT. Sin embargo existen diferencias importantes para algunos puntos a lo largo del año y en la variabilidad que se da en cada mes con respecto a la media. Por ello no recomendamos a esta distribución como una distribución representativa de algún lugar, debido a que esta diferencia también puede cambiar de manera significativa de acuerdo a la variable que se determine como preponderante.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por parte del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), a través del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), en el marco de la Convocatoria 2013-02, del Fondo SECTORIAL CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, dentro del Proyecto Estratégico No. 16 con título: “Inventario Nacional del Recurso Solar”, por medio del cual fue posible desarrollar la investigación y apoyar la formación de recursos humanos a nivel posgrado. Isaías Moreno Cruz agradece el apoyo de CONACYT a través de una beca de doctorado.

6. REFERENCIAS

[1] Naseem M. Sawaqed, Yousef H. Zurigat and Hilal Al-Hinai. A step-by-step application of Sandia method in developing typical meteorological years for different locations in Oman. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH Published online 1 April 2005 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/er.1078 Int. J. Energy Res. 2005; 29:723–737.

[2] Olayinka S. Ohunakin, Muyiwa S. Adaramola, Olanrewaju M. Oyewola, Richard L. Fagbenle, and Fidelis I. Abam A Typical Meteorological Year Generation Based on NASA Satellite Imagery (GEOS-I) for Sokoto, Nigeria. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2014, Article ID 468562, 7 pages http://dx.doi.org/10.1155/2014/468562.

[3] Argiriou , S. Lykoudis, S. Kontoyiannidis, C. A. Balaras , d. Asimakopoulos, M. Petrakis and P. Kassomenos. Comparison of methodologies for AMT generation using 20 years data for athens, greece. Solar Energy Vol. 66, No. 1, pp. 33–45, 1999 Ó 1999 Elsevier Science Ltd. PI I : S0038 – 092X(99)00012 – 2.

[4] International Standard ISO 15927-4 Hygrothermal performance of buildings — Calculation and presentation of climatic data — Part 4: Hourly data for assessing the anual energy use for heating and cooling. First edition 2005-07-15.

[5] J. M. Filkenstein and R. E. Schafer, “Improved goodness-of-fit tests,” Biometrika, vol. 58, no. 3, pp. 641–645, 1971.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTADO ACTUAL DE LA SUSTENTABILIDAD EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO: INDICADORES ENERGÉTICOS

R. Acosta O. y J. Hernández
División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019
Tel 01 (983) 83 5 03 89, racosta@uqroo.edu.mx

M. Martínez F.
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México
Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, México. C.P. 62580
Teléfono 01(777) 3620096

RESUMEN

El desarrollo sustentable es avanzar en el bienestar de las personas y de la sociedad al considerar simultáneamente aspectos sociales, económicos, ambientales e institucionales, con atención especial a los más desprotegidos del presente y a las generaciones futuras (Tagüeña, J. y M. Martínez, 2009).

Por otro lado, se tiene que los indicadores de sustentabilidad y los índices compuestos están tomando mucha importancia y cada vez más como una poderosa herramienta para la formulación de políticas y la comunicación pública de aspectos relacionados con el ambiente, la economía, la sociedad y las instituciones (United Nations. 1996. Indicators of Sustainable Development Framework and Methodologies. New York: UNCSD). Al conceptualizar los fenómenos y destacar tendencias, los indicadores de sustentabilidad simplifican, cuantifican, analizan y comunican la información compleja (Singh, Murty, Gupta & Dikshit, 2009).

En este trabajo se presenta una revisión sobre la situación energética del estado de Quintana Roo, México, analizando la evolución que han tenido algunos indicadores seleccionados del desarrollo energético sustentable en el periodo 2006 a 2014. Adicionalmente se destacan los instrumentos regulatorios, con los que cuenta el estado de Quintana Roo.

Palabras claves: Sustentabilidad, indicadores energéticos, Quintana Roo.

ANTECEDENTES DE SUSTENTABILIDAD

En 1992, la comunidad internacional – representada por 179 países, personas y organizaciones no gubernamentales – participó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, también llamada "Cumbre de la Tierra"; entre sus principales resultados se encuentran: la Declaración de Río y el Programa 21, también llamada Agenda 21 (en alusión al siglo XXI).

El desarrollo sustentable es un modelo de crecimiento que consiste en atender las necesidades de la generación presente sin poner en riesgo la capacidad los (recursos y oportunidades) de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades de crecimiento y desarrollo. La sustentabilidad fomenta el progreso desde un enfoque amplio, tomando en cuenta tres dimensiones: social, económica y ambiental. Un gobierno local con enfoque de sustentabilidad evalúa y apoya toda iniciativa buscando un equilibrio entre estas tres dimensiones; así, el bienestar social y el desarrollo económico quedan inevitablemente vinculados a un medio ambiente de calidad.

En años recientes, el concepto de sustentabilidad se ha ligado a las dimensiones social, económica, ambiental e institucional, lo que ha propiciado se busquen indicadores sencillos que puedan definir mejor el desarrollo que el Producto Interno Bruto, como la felicidad del ser humano. En ese sentido, para avanzar en el desarrollo sustentable se debe garantizar el bienestar de las personas y de la sociedad al considerar simultáneamente aspectos sociales, económicos, ambientales e institucionales, con atención especial a los más desprotegidos del presente y a las generaciones futuras.

Un referente indispensable al hablar de sustentabilidad es la capacidad de carga de la naturaleza; es decir, qué tanto puede la naturaleza soportar una actividad humana sin quedar afectada de manera permanente. Puesto que los recursos naturales son finitos y algunos no son renovables, tienen un límite de tolerancia a las actividades humanas o de explotación. En un municipio, un ejemplo de la capacidad de carga sería el consumo - moderado, equilibrado y equitativo – de los recursos naturales que el territorio puede sostener sin desequilibrar el funcionamiento y la productividad de los ecosistemas.

La energía es imprescindible para potenciar el bienestar social y económico, y se le considera como indispensable para generar la riqueza industrial y comercial. Para lograr este cometido, entonces se requiere de un desarrollo energético sustentable y por lo mismo establecer una serie de parámetros o indicadores que permitan medir o visualizar como se está avanzando hacia dicho desarrollo.

Los indicadores energéticos se busca que no solo sean estadísticas, sino que sean un instrumento que provea un entendimiento más profundo de las relaciones entre energía, economía, sociedad y ambiente. En su conjunto estos indicadores pueden dar una imagen del sistema integral de energía, incluyendo vínculos y compromisos entre diferentes dimensiones del desarrollo sustentable, así como las

implicaciones a largo plazo de las decisiones actuales y el comportamiento, de los cambios en los valores del indicador que en el tiempo marcan el progreso o la falta de progreso hacia el desarrollo sostenible (Vera, I. y Langlois, L., 2007).

Los indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS), han sido diseñados con el objeto de proporcionar información sobre las tendencias en materia de energía, en un formato que simplifica la adopción de decisiones con miras a ayudar a los países a evaluar políticas energéticas efectivas en el ámbito del desarrollo sustentable, enfocados en cuatro dimensiones: social, económica, ambiental e institucional.

Indicadores energéticos del desarrollo sustentable.

De acuerdo con Naciones Unidas, el desarrollo energético sustentable se alcanza a partir de la interacción de aspectos ambientales, sociales, económicos e institucionales, como sistemas interdependientes (ONU, 1996). En 1999 la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) en colaboración con otras organizaciones establecieron que el concepto de *Sustentabilidad Energética* se debe definir como el suministro de energía a un costo accesible para la población, asegurando el servicio y respetando el medio ambiente (IAEA/IEA, 2001).

De este modo, se contemplan los vínculos entre energía, sociedad, ambiente, economía e instituciones al considerar que (a) la energía es un recurso vital para cubrir las necesidades humanas básicas; (b) se entiende que su uso contribuye a la producción de bienes y servicios; y (c) se reconoce que su uso tiene un impacto sobre el ambiente a través de sus funciones de fuente de energía y sumidero de emisiones y residuos (László Pintér, Peter Hardi and Peter Bartelmus, 2005).

Los indicadores deben interpretarse en el contexto particular de la economía de cada país y de sus recursos energéticos. Cabe señalar que no todos los indicadores se aplican en cada caso ya que cada país puede seleccionar de acuerdo a sus características los indicadores que aplican en su caso particular. En México, el INEGI y el INE, lograron generar 113 indicadores de sustentabilidad de un total de 134. De los 113 indicadores generados, 39 son de presión, 43 de estado y 31 de respuesta. En los tres casos, los resultados obtenidos pueden considerarse altamente satisfactorios, según lo reflejan sus proporciones respecto al número de indicadores propuestos por la CDS: 90.7%, 79.6% y 83.8%, respectivamente (Indicadores de Desarrollo Sustentable en México, INEGI e INE, http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/311.pdf, visitada 20160809).

En México también existe el Sistema de Cuentas Ecológicas y Económicas de México (SCEEM), de donde se obtiene el Producto Interno Neto Ecológico (PINE). (Foladori, 2006).

QUINTANA ROO

El Estado de Quintana Roo está ubicado en el extremo este del país, ocupa la porción oriental de la península de Yucatán, sus límites naturales y geoestadísticos están entre los paralelos 17° 54" y 21° 36 de latitud norte y entre los meridianos 86° 45" y 89° 10 de longitud oeste del meridiano de Greenwich, y tiene una extensión superficial de 44,705 km^2 que lo ubica en el vigésimo lugar nacional; esta área representa 2.3% de la República Mexicana y 30.66% del territorio peninsular (INEGI, 2011). Cuenta con 1,176 km de litorales, lo que representa el 10.6% del total nacional. Y está dividido en once municipios: Bacalar, Benito Juárez, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, José María Morelos, Lázaro Cárdenas, Othón P. Blanco, Puerto Morelos, Solidaridad y Tulum. Quintana Roo es uno de los estados cuya biodiversidad es de las más ricas de México. El 90% de su territorio está conformado por selvas bajas, en las que se albergan más de mil especies de flora, 360 especies de aves, 105 de mamíferos y 83 especies de anfibios y reptiles. El gobierno de México conserva valiosos ecosistemas terrestres y marinos en más de la tercera parte del territorio del estado (un millón 574 mil 965 hectáreas) mediante el esquema de Áreas Naturales Protegidas.

Quintana Roo es la región turística más importante de la República Mexicana. Cancún y la Riviera Maya son por sí mismos sitios de renombre mundial, catalogados como destinos turísticos principales, no sólo dentro de México, sino de toda la cuenca del mar Caribe. De acuerdo con las estadísticas que ofrece la secretaria de turismo del Estado de Quintana Roo (SEDETUR), para el periodo entre 1999 y 2014, el volumen de turistas ha aumentado sostenidamente, alcanzando niveles significativos: en el año 1999 Quintana Roo recibió 4,282,959 turistas, mientras que en el año 2014 se recibieron 10,137,509 turistas y visitantes; es decir, un aumento de 2.36 veces en 15 años. Por su parte, la Tasa Media Anual de Crecimiento (TMAC) señala que el crecimiento demográfico estatal en el periodo 1990-2005 fue de 5.71%, mientras que para el periodo 2000-2005 fue de 5.37%. Se prevé que la población continúe aumentando en las décadas futuras, alcanzando en 2020 una tasa de crecimiento de 2.47% anual y en 2030 llegará a un ritmo de crecimiento de 1.89% anual. La importancia del Caribe Mexicano trasciende el ámbito local del estado de Quintana Roo y ha adquirido una dimensión nacional. La captación de divisas turísticas en el periodo de los años 2002 a 2007 muestra que por Quintana Roo ha ingresado más de la cuarta parte de las divisas turísticas del total nacional (SEDETUR, 2015). A diciembre de 2014 el Estado de Quintana Roo tenía una infraestructura hotelera de 88,280 cuartos y 931 hoteles, con una afluencia de 10,137,509 turistas y en el 2013 captó el 40% del total de divisas que ingresaron al país por concepto de turismo y el número de cuartos de hotel que se estima existirán para el año 2025 es de 125,240 unidades, mientras que la población inducida por efecto de los anteriores alcanzará un rango de entre 1.50 y 1.95 millones de habitantes (Gobierno del estado de Quintana Roo, 2015 y SEDETUR, 2015). Toda esta infraestructura turística demanda energía eléctrica para su óptima operacionalidad, por lo que la energía se vuelve un elemento estratégico en el engranaje del desarrollo del Estado. De esta manera, el crecimiento de la economía quintanarroense está indiscutiblemente basado en el éxito, desarrollo y expectativas del turismo.

El Gobierno del Estado de Quintana Roo elaboró en los primeros años del 2000, tres instrumentos de planeación en los que se plasma la visión estatal respecto al futuro del turismo, los asentamientos humanos y el ordenamiento territorial, con incidencia en el Caribe Mexicano. Esta visión continúa vigente en lo general y, de hecho, se mantiene en sus principios rectores.

El primero de estos instrumentos es el Programa Estatal de Desarrollo Urbano del Estado de Quintana Roo (PEDUQROO), que generó la visión de la infraestructura del desarrollo urbano estatal mientras que el segundo es el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (PEOTQROO), éste evaluó la relación entre las actividades turísticas y el crecimiento urbano, dando como resultado hasta 15.64 habitantes por cuarto en la región Caribe Norte. El tercero, el Programa Subregional de Desarrollo Urbano de la Región Caribe Norte (PSDURCN), que generó la visión de la infraestructura necesaria para continuar y sostener el desarrollo urbano y turístico del norte

del estado de Quintana Roo. El antecedente de los tres programas antes mencionados fue el Plan Estratégico de Desarrollo Integral del Estado de Quintana Roo 2000–2025.

Asimismo, el estado cuenta con la *ley para el fomento de la eficiencia energética y del aprovechamiento de las fuentes de energía renovables en el estado de Quintana Roo*. Cuyos principales objetivos son el: fomentar el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, y el uso de tecnologías limpias, la eficiencia y la suficiencia energética en el Estado y los Municipios como instrumento de promoción del desarrollo sustentable, la innovación, el desarrollo tecnológico, la competitividad económica, la mejora de la calidad de vida y la protección y preservación del medio ambiente; promover la planeación estatal y municipal en materia de aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, alineada al Plan Estatal de Desarrollo como un instrumento de las políticas públicas de la Estrategia Nacional de transición energética; e impulsar el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, en la planeación del desarrollo urbano, para lograr el mejor aprovechamiento de las condiciones climáticas del entorno (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2014).

Indicadores energéticos para Quintana Roo En la mayoría de los análisis del desarrollo energético sustentable, se orientan a la aplicación a nivel de todo un país, por lo que la visión resultante es global o general, y poco se conoce de la contribución particular de cada estado o región hacia este desarrollo. Como ya se mencionó el estado de Quintana Roo, tiene una actividad económica predominante del sector servicios (turismo), existen seis plantas para la generación de energía eléctrica (5 a base de turbogas y una a diésel), hay pocas industrias de gran tamaño (se tiene un ingenio azucarero en el sur de estado) y el campo cuenta con poco desarrollo. Esto se refleja en que la electricidad, sea uno de los principales tipos de energía consumidos en el sector productivo, tal y como se observa en la figura 1, en donde se muestra que cerca del 80% de la energía que se consume en el estado de Quintana Roo en los sectores productivos (agropecuario e industrial) es la electricidad, lo cual se debe a que es un estado con relativamente poca industria y cuya base de la economía es el turismo.

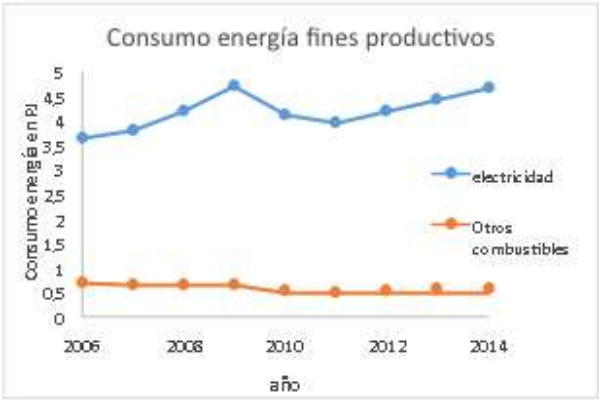


Figura 1. Gráfica del consumo de energía en Quintana Roo en el periodo de 2006-2014. Elaboración propia con datos de SENER e INEGI.

Como antecedentes en el análisis de los indicadores energéticos para el estado de Quintana Roo, se mencionan los trabajos de la Universidad de Guanajuato en donde en el año 2011, se elaboró un análisis de los indicadores energéticos del desarrollo sustentable para los estados de Baja California y Quintana Roo, basados en información de los años 2008 y 2009, usando 7 indicadores, uno de tipo social y 6 de carácter económico (Universidad de Guanajuato, 2011).

En este trabajo, para analizar el desarrollo de los indicadores energéticos de Quintana Roo, se hace un análisis con base a la información del INEGI, la SENER y la SEMARNAT entre otras fuentes, abarcando el periodo de 2006 a 2014, que son los años más recientes de los cuales existe información. Cabe señalar que pueden existir algunas discrepancias en cuanto a los valores de algunos parámetros, y que esto se debe a que para el caso de Quintana Roo, hay información que no está contabilizada, y en tales casos se han realizado estimaciones con base a la metodología para balances energéticos propuesta por Sheinbaum *et al.* (2012).

El consumo anual de energía del estado se incrementó de 46.5 a 63.7 PJ, en el periodo de 2006 a 2014. Con un incremento constante del consumo de energía año con año; como se observa en la figura 2.

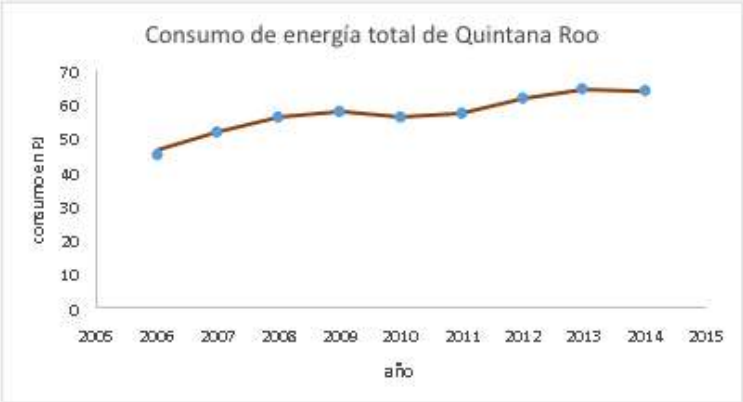


Figura 2. Gráfica del consumo anual de energía total en Quintana Roo en el periodo de 2006-2014. Elaboración propia con datos de la SENER e INEGI.

Figura 3 Gráfica del consumo de energía por sector. Elaboración propia con datos de la SENER e INEGI.

En la figura 3, se observa cómo se comporta el consumo de energía por sector, en donde se aprecia que el sector transporte es el principal consumidor de energía.

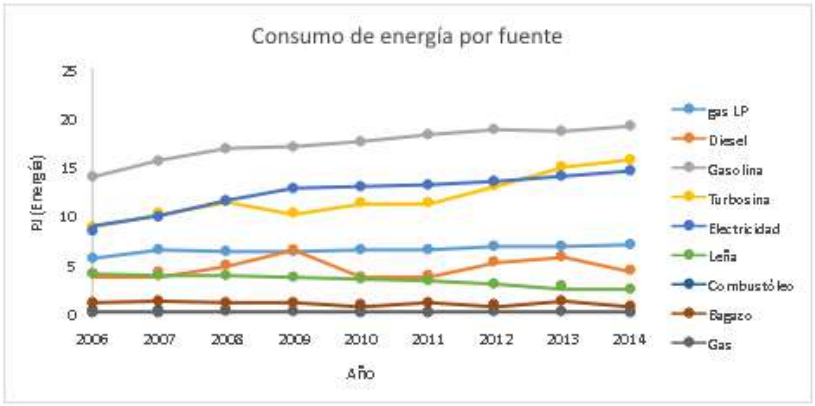


Figura 4. Gráfica del consumo de energía por fuente en el periodo de 2006-2014. Elaboración propia con datos de SENER e INEGI.

Por su parte en el uso de la biomasa, se consideran básicamente los consumos de bagazo de caña y leña de uso doméstico, los cuales han disminuido, principalmente debido a que el uso de la leña tiene una tendencia a disminuir, como se observa en la figura 4. En tanto que el consumo de bagazo casi se ha mantenido constante, al ser la fuente de combustible para el ingenio azucarero.

Para este trabajo, se han seleccionado como representativos un indicador social, cinco económicos y uno ambiental.

En la parte social, el indicador que se ha utilizado es del subtema accesibilidad que implica el porcentaje de hogares sin acceso a la energía eléctrica. En la figura 5, se presenta la evolución de dicho indicador.

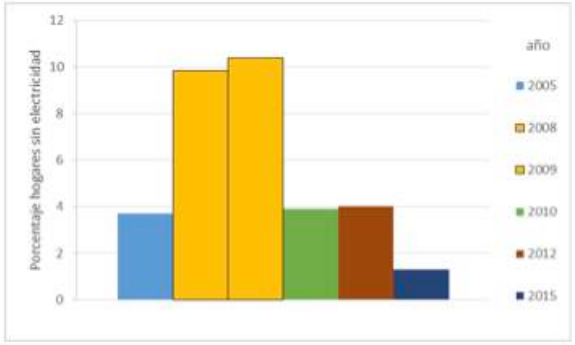


Figura 5. Gráfica del porcentaje de hogares con acceso a electricidad en el estado. Elaboración propia con datos de SENER e INEGI.

Cabe destacar que los datos de las columnas de 2008 y 2009, son los reportados por un análisis realizado en (2010) por parte de la Universidad de Guanajuato y como se aprecia discrepan con el resto de las estadísticas, las cuales fueron tomadas de la información del INEGI y SENER. En este indicador la tendencia es a disminuir, es decir se ha logrado que cada vez sea menos la población que carece de acceso a los servicios de electricidad.

Por otra parte, en el aspecto del gasto dedicado a transporte en los hogares, en los tres años más recientes (2012 a 2014) se observa una tendencia al alza, ya que creció del 12.9 % a 13.4% y finalmente se alcanzó un valor de 14.25%.

Por otra parte, otro de los indicadores económicos, se observa en la figura 6, donde se presenta la evolución en el consumo de energía total per cápita, para el periodo 2006-2014, se presentan los datos tanto del estado como los del País.

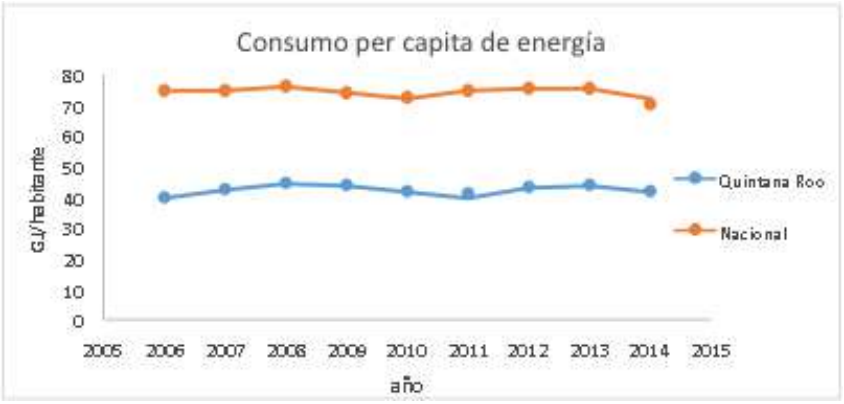


Figura 6. Gráfica del consumo de energía per cápita del estado de Quintana Roo y de México. Elaboración propia con datos de SENER e INEGI.

En la figura 6 se observa un comportamiento casi uniforme en este indicador, en donde en 2008 alcanzó su valor máximo (44.2 GJ/habitante), para posteriormente disminuir entre 2009 y 2011, volviendo a incrementarse para alcanzar un valor de 43.3 GJ/habitante en 2013) y establecerse en 41.6 GJ/habitante en 2014. Esta fluctuación en el comportamiento del consumo de energía per cápita, también se observa a nivel nacional donde en 2008 se alcanzó el máximo de consumo por habitante de 75.98 GJ/hab, para después ir disminuyendo, hasta quedar en 72.04 GJ/hab en 2014.

En el aspecto de la energías renovables solo se tiene un generador eólico de 1.5 MW instalado en la zona de Cancún y operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Existen diversos sistemas fotovoltaicos autónomos que desde 1995 se han estado instalando en el estado, pero no hay un censo confiable de los mismos y han sido normalmente para generar energía eléctrica de autoconsumo, por lo que no se ve un crecimiento importante en la participación de las energías renovables en el periodo analizado. Sin embargo hay que mencionar que a partir del 2009 se han instalado sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de la CFE.

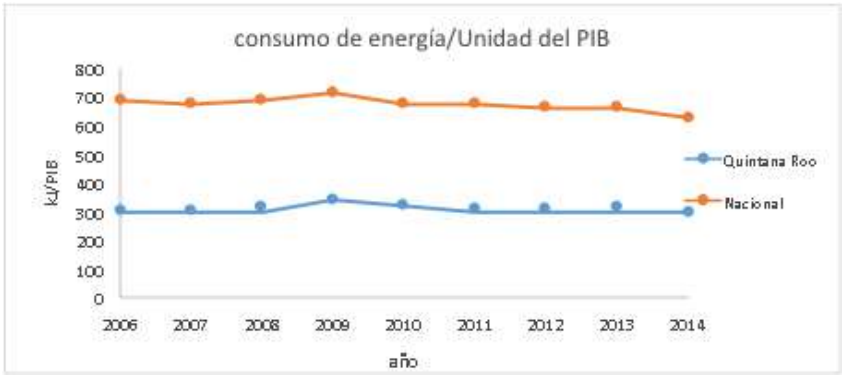


Figura 7. Gráfica de la evolución del consumo de energía por unidad de PIB (Elaboración propia a partir de datos de SENER e INEGI).

Analizando el comportamiento del consumo de energía por unidad del producto interno bruto (figura 7), para el periodo de 2006 a 2014, se observa que después del año 2009, cuando alcanzó su punto máximo (340.5 GJ/unidad del PIB), ha tendido a disminuir, para situarse en el 2014 en 297.5 GJ/unidad del PIB.

Dentro de los indicadores ambientales, en la figura 8, se observa la evolución en las emisiones de CO_2 con respecto a la generación de energía eléctrica en el estado.

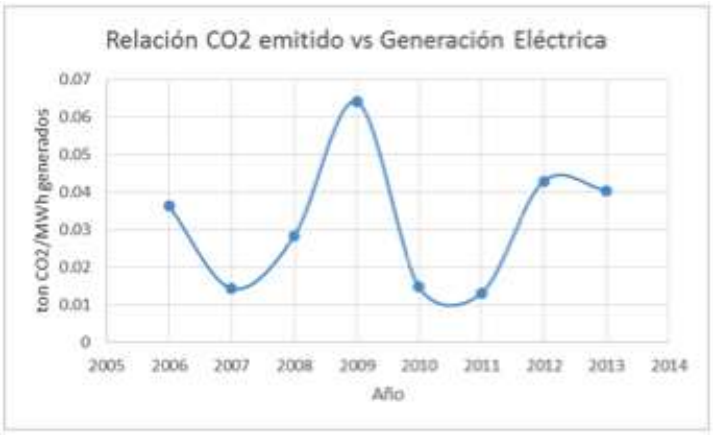


Figura 8. Gráfica de la relación de CO_2 emitido con respecto a la generación de energía eléctrica. Elaboración propia con datos de SENER e INEGI.

De esta figura, se observa que en 2009 se presenta la máxima generación de CO_2 por MWh producido en el estado, producto de la generación de energía eléctrica, pero después hay una disminución importante entre 2010 y 2011, para después crecer otra vez en los años 2012 y 2013, que es el último año del cual existen datos.

CONCLUSIONES

El estado de Quintana Roo tiene una actividad económica predominante del sector de servicios (turismo), que se refleja en que sea la región turística más importante de la República Mexicana. Una tercera parte del territorio del estado está protegida como *áreas naturales protegidas*. Se tienen instrumentos de planeación en los que se plasma la visión estatal respecto al futuro del turismo, los asentamientos humanos y el ordenamiento territorial; esta visión continúa vigente en lo general y, de hecho, se mantiene en sus principios rectores. Se destaca que todo el estado cuenta con Programas de Ordenamiento Territorial. Asimismo se tiene una ley estatal para el fomento de la eficiencia energética y del aprovechamiento de las fuentes de energía renovables. En conclusión se puede afirmar que el estado tiene los elementos e instrumentos regulatorios relacionados con el desarrollo sustentable.

En este trabajo, se ha realizado un ejercicio de análisis de algunos indicadores del desarrollo energético sustentable para el estado de Quintana Roo, México. De los indicadores seleccionados, en el indicador de acceso a los servicios de energía eléctrica, se ha observado que existe una mayor cobertura de dicho servicio en el estado, que es del orden del 96%. Por otra parte, en cuanto a los indicadores de consumo de energía per cápita, por unidad de PIB en general se han mantenido con una ligera tendencia a disminuir.

La evolución de la proporción del gasto en el hogar dedicado a transporte ha crecido en los dos últimos años, y no se tienen propuestas de desarrollos de proyectos de energías renovables en el estado, que permitan reducir la dependencia de los combustibles de origen fósil. El estado de Quintana Roo, tiene el potencial para explotar las energías renovables, un área de oportunidad es el sector transporte, en donde se presenta el mayor consumo de combustibles y donde algunas innovaciones podrían aportar al desarrollo energético sustentable.

A partir del presente análisis se observa en general que en estado de Quintana Roo, no hay un avance importante hacia lograr el desarrollo sustentable. Aún cuando hay más acceso a los servicios y beneficios de la energía, los hogares dedican mayor parte de sus ingresos en cubrir esta necesidad, además de la alta dependencia de los combustibles de origen fósil, en los sectores de mayor consumo de energía.

Debido a su dinámica poblacional, el estado de Quintana Roo presenta cada año un aumento del consumo anual de energía, siendo el sector transporte el mayor consumidor de energía, seguido de la electricidad (ambos sectores fundamentales para la actividad turística). Esta tendencia seguirá aumentando debido a dos factores: el aumento en la población y el aumento en la capacidad turística, por lo que es importante utilizar los instrumentos regulatorios con los que se cuenta, para que la demanda de energía que se requerirá sea suministrada a través de energía renovable.

REFERENCIAS

Andreas Kemmler, Daniel Spreng. Energy indicators for tracking sustainability in developing countries. Energy Policy 35 (2007) 2466–2480.

Bustillo, L. & Martínez, J. (2008). Los enfoques del desarrollo sustentable. Interciencia, 33(5), 389–395.

Cantú, P. (2012). El axioma del desarrollo sustentable. Revista de Ciencias Sociales Universidad de Costa Rica, 3(137), 83–91.

Kemmler, A. and Spreng, D. (2007). Energy indicators for tracking sustainability in developing countries. Energy Policy 35: 2466-2480.

Foladori, G. (2006). La insostenibilidad social del desarrollo sostenible, en Revista Portularia, Vol. VII, No.2 Universidad de Huelva, España.

García Camacho, Alejandro, Ramírez Treviño, Alfredo, Sánchez Núñez, Juan Manuel, El desarrollo sustentable: Interpretación y análisis. Rev. Centro Inv. (Méx) Vol. 6, Núm. 21, Jul.-Dic. 2003, pp 55-59.

Gobierno del estado de Quintana Roo. 2015. página web:www.qroo.gob.mx

Honorable XIII Legislatura del Estado Libre y Soberano de Quintana Roo. 2013. Ley para el fomento y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables en el estado de Quintana Roo.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, (2011). Perspectiva estadística de Quintana Roo.

International Atomic Energy Agency/ International Energy Agency (IAEA/IEA), (2001). Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. ISBN 92–0–116204–9

László Pintér, Peter Hardi and Peter Bartelmus, (2005) "Sustainable Development Indicators, PROPOSALS FOR THE WAY FORWARD. Prepared for the United Nations Division for Sustainable Development (UN-DSD)". International Institute for Sustainable Development.

Meadows, D., 1998. Indicators and information systems for sustainable development. A report to the Balaton Group.

Mog, J.M., 2004. Struggling with sustainability—a comparative framework for evaluating sustainable development programs. World Development 32 (12), 2139–2160.

OIEA. Indicadores Energéticos del Desarrollo Sostenible. Directrices y metodologías. OIEA Austria julio 2008.

Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. 2014. Ley para el fomento de la eficiencia energética y del aprovechamiento de las fuentes de energía renovables en el estado de Quintana Roo

Ramírez, A., Sánchez, J. & García, A. (2004). El desarrollo sustentable: interpretación y análisis. Revista del Centro de Investigación, 6(21), 55–59.

SEDETUR-Secretaria de turísmo del estado de Quintana Roo. 2015. http://sedetur.qroo.gob.mx

Secretaria de energía (SENER), Información energética sobre las 32 entidades federativas. Primera edición (2013).

Secretaria de energía (SENER), Información energética del estado de Quintana Roo 2012. Primera edición (2013).

C Sheinbaum P; S. Briceño V; G. Robles M. Guía para realizer balances energéticos estatales para la estimación de inventarios de gases de efecto invernadero. INE-UNAM. Reporte final 2012.

Singh, R, Murty, H., Gupta, S. & Dikshit, A. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. Ecological Indicators, 9(2), 189--212.

Tagüeña, J. y M. Martínez, (2009). "Fuentes renovables de energía y desarrollo sustentable", SEP y ADN Editores, México.

Universidad de Guanajuato. 2011. Evaluación de Recursos Energéticos Renovables y uso eficiente del recurso para el desarrollo sustentable de la península de Baja California y Quintana Roo.

I. Vera, L. Langlois. Energy indicators for sustainable development. Energy 32 (2007) 875–882

WCED (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo), 1987. Our Common Future (Nuestro Futuro Común), Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA CUENCA RÍO LA ANTIGUA

Daniel A. Guzmán Muñoz, Héctor D. García López, Juan C. Tapia Olivas, Karla I. Martínez Valdivieso, Karyme M. Pérez Ramírez, Paulina Galindo Camacho, Silvana Castro Vizcarra y Silvia L. Jiménez Cañez
Programa Educativo de Ingeniería en Energías Renovables de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, 22260, México, 01-(664)-676-8222,
aguzman91@uabc.edu.mx, hector.daniel.garcia.lopez@uabc.edu.mx, juan.carlos.tapia.olivas@uabc.edu.mx, ivette.martinez12@uabc.edu.mx, perez.karyme@uabc.edu.mx, paulina.galindo@uabc.edu.mx, silvana.castro@uabc.edu.mx, llanely.jimenez@uabc.edu.mx.

RESUMEN

El proyecto "Minicentral Hidroeléctrica Cuenca Río La Antigua" es una minicentral hidroeléctrica ubicada en el Delta de los Ríos Xico y Teocelo. La minicentral aprovechará una altura de 48 metros con un caudal mínimo de 1.87 m^3/s y un caudal máximo de 24.08 m^3/s. El diseño está basado en un sistema de conducción forzada con una tubería de 1 metro de diámetro de acero inoxidable, la cual estará subterránea paralela al río llegando a la casa de máquinas; donde se separará el caudal en dos, pasando a dos turbinas tipo Francis con una eficiencia del 94 % y finalmente a un generador de 750 rpm, 400 kW y una eficiencia de 93.3 %. La planta cuenta con un factor de generación de 0.34, por lo cual es considerada una planta pico. La producción de la minicentral contribuirá a satisfacer la demanda eléctrica de Teocelo, la cual está conectada a una red de distribución de 13,800 V; que alimenta también a los municipios de Coatepec y Xico.

Al realizar el análisis hídrico se consiguió determinar qué el proyecto generará una media anual de 2,878 MWh/año, lo cual permitiría tener un ahorro de 1,693 Barriles de Petróleo Equivalentes (BEP). Sin embargo, considerando los caudales medios de cada mes sería posible generar hasta 28,787 MWh/año con lo cual se tendría un ahorro de 16,939 BEP, evitando así la emisión de 18,711.55 toneladas de CO_2. El proyecto tiene como objetivo producir energía limpia con el propósito de comercializarla mediante la red de distribución eléctrica de Comisión Federal de Electricidad. Para esto se llevó a cabo un análisis técnico para determinar su viabilidad.

ABSTRACT

The following project "Mini central Hidroeléctrica Cuenca Río La Antigua" consists in a mini Hydroelectric power station located at head start from rivers Xico and Teocelo. This project will take advantage the water fall of 48 meters with a minimum water flow of 1.87 m^3/s and a maximum water flow of 24.08 m^3/s. The design is based on a penstock pipe system with 1 meter diameter stainless steel pipe, which will be buried parallel to the river reaching power generator station. Where the water flow will be split in half leaving two streams flowing through two Francis turbines with an efficiency of 94% and finally leading to the power generator of 750 rpm, 400 kW with an efficiency of 93.3%.The plant will have a power factor of 0.34 which it's considered a backup power station. The power generated by the mini hydroelectric power station will contribute to satisfy electric energy demand from Teocelo, which is connected to a distribution grid of 13800 V; that also feeds the municipals of Coatepec and Xico.

After performing the water flow rate analysis it was able to determine that this power station project will generate an annual average of 5,949 MWh/year, which will allow saving up to 3,742 barrels of oil (BOE). Even considering the lowest average water flow rate it could be possible to generate up to 28,787 MWh/year which will be a 16,939 (BOE) saving, mitigating the gas emissions equal to 18,711.55 tons of CO_2. The project has as objective to produce clean energy with the goal of commercialize it through the power grid of the Federal Electricity Commission. That's why a technical analysis was performed to determine the viability of the project leading to promising results.

Palabras claves: Minicentral, Hidroeléctrica, Energía Renovable, Rio Teocelo, Rio Xico.

INTRODUCCIÓN

Durante la década de los años 70's la producción de energía eléctrica a través de energías renovables ha tenido un gran crecimiento en el sector energético debido a la crisis del petróleo. Dentro de estas, la energía hidráulica presenta una gran demanda debido a su alta generación, sus bajas emisiones y a su durabilidad. México tiene como objetivo al año 2030 reducir un 25% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y de Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC). Este compromiso fue planteado tomando en cuenta la Ley General de Cambio Climático en la cual se establece que se debe priorizar las acciones de mitigación que mejoren la salud pública. Esto implica una reducción del 22 % de GEI y del 51% de emisiones de carbono negro. Para lograrlo el gobierno de México tiene como objetivo que en el año 2030 el 43% de la generación de energía eléctrica provenga del aprovechamiento de las energías renovables.

Este proyecto se comprende como una minicentral hidroeléctrica ubicada en el Río Xico-Teocelo que tiene como objetivo producir energía limpia con el propósito de comercializarla mediante la infraestructura de Comisión Federal de Electricidad y con esto disminuir la sobredemanda que existe en el mercado. Para esto se llevará a cabo un análisis técnico para determinar su viabilidad en el sitio designado, tomando en cuenta las licencias y permisos así como el impacto ambiental que pudiese ocurrir en la zona. El planteamiento del proyecto considera la situación social de la cuenca, en donde existe un gran problema con las comunidades aledañas al área delimitada debido a la construcción de represas. El diseño de la planta considera un sistema de conducción forzada evitando la construcción de una represa y así evitar una mayor afectación del Río Xico-Teocelo, del cual no solo depende la flora y fauna sino la actividad económica de los habitantes de la zona.

ANTECEDENTES

En el año de 1996 se puso en marcha la minicentral hidroeléctrica de Lanzahita, España en la provincia de Ávila, sobre el río Garganta de la Eliza contando con un caudal de 2.1 m^3/s y una potencia de 1970 kW, generando una energía anual de 5,000 MWh. La central de Lanzahita se encuentra totalmente automatizada para funcionar de manera desasistida.

Otro de los países con minicentrales hidroeléctricas es Argentina que cuenta con 75 pequeñas, mini y micro hidroeléctricas, una potencia sumada de 377 MW y una generación anual que equivale al 1.6 % de la demanda nacional de electricidad un ejemplo de ello es la llamada Saltito II, localizada en la provincia de Misiones con una potencia de 640 kW y una generación anual de 2,525 MWh. De acuerdo con información de CONAGUA, CONANP e INEGI, desde hace mucho tiempo atrás se construyen centrales hidroeléctricas para así poder aprovechar el agua como energía hidráulica, o simplemente para suministrarla para usos privados. En el año de 1898 se inaugura la primer minicentral hidroeléctrica, la cual es utilizada para la obtención de recursos naturales energéticos, está ubicada en el municipio de Teocelo en el estado de Veracruz.

Teocelo es un municipio del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Este se encuentra en la zona centro montañoso del Estado. El lugar cuenta con un total 16,327 habitantes con un total de 4,296 viviendas, de las cuales solo 4131 cuentan con electricidad, estas cifras con base al Censo de Población y Vivienda 2011 de INEGI. Basado en datos de CONAPO se estima que la población llegue a 18,586 habitantes para el año 2030. Teocelo cuenta con una hidroeléctrica llamada Texolo, ésta entro en operación en 1959, generando 1600 kilowatts por hora. Hasta el año 1990 está estragaba la energía directamente a la red de Teocelo y Xico. Sin embargo, a partir de ese año se distribución cambio de ruta a la subestación del municipio de Coatepec y de ahí se distribuía a Teocelo y Xico. La “Minicentral Hidroeléctrica Cuenca Río La Antigua” ayudará a satisfacer la demanda generada en los próximos años debido al aumento de población y avance industrial. Teniendo en consideración el correcto funcionamiento y la puesta en marcha de la “Minicentral Hidroeléctrica Cuenca Río La Antigua” se piensa implementar nuevas alternativas para la remodelación de la planta creando nuevas expectativas para una mejor calidad de energía. Por lo cual mediante INEGI se recabaron datos importantes para la generación de nuevos beneficios.

METODOLOGÍA

Para analizar el gasto disponible por mes se utilizaron los datos de la banda hidrométrica con clave 28103 de CONAGUA. Los cuales contienen los gastos diarios de cada año. Las herramientas de apoyo utilizadas para la recolección de información fueron las siguientes:

- CONAPO
- Google Earth

El manejo digital de la información hidrométrica es importante para la gestión del recurso hídrico del país, por lo que, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) nos provee información de bandas hidrométricas. El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana.

Por otra parte, el Instituto de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) publica un simulador de flujos de aguas de cuencas hidrológicas SIATL; el cual es un servicio accesible vía internet con funcionamiento de redes geométricas que cuenta con una función interactiva con herramientas sencillas de búsqueda de localización y rasgos hidrográficos. Con el objetivo de proveer sencillamente de un medio de conocimientos geográficos, enfocado en hidrología superficial con la finalidad de evaluar escenarios para la realización de proyectos, rutas de evaluación, construcción de infraestructura y ordenamiento. El complemento de Google Earth te permite navegar por Internet y explorar datos geográficos sobre un globo terráqueo en 3D desde un navegador web.

LOCALIZACIÓN DEL SITIO

El proyecto se encuentra ubicado en la zona centro del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave en México (Imagen 1), específicamente en el municipio de Teocelo (Imagen 2) en las coordenadas 19° 24' latitud norte y 96° 59' longitud oeste, a una altura de 1,160 metros sobre el nivel del mar (imagen 3). Limita al norte con Xico y Coatepec, al sureste con Tlaltetela, al sur con Cosautlán de Carvajal, al oeste con Ixhuacán de los Reyes. La distancia aproximada del proyecto es al sursuroeste de la capital del Estado, por carretera es de 18 km.

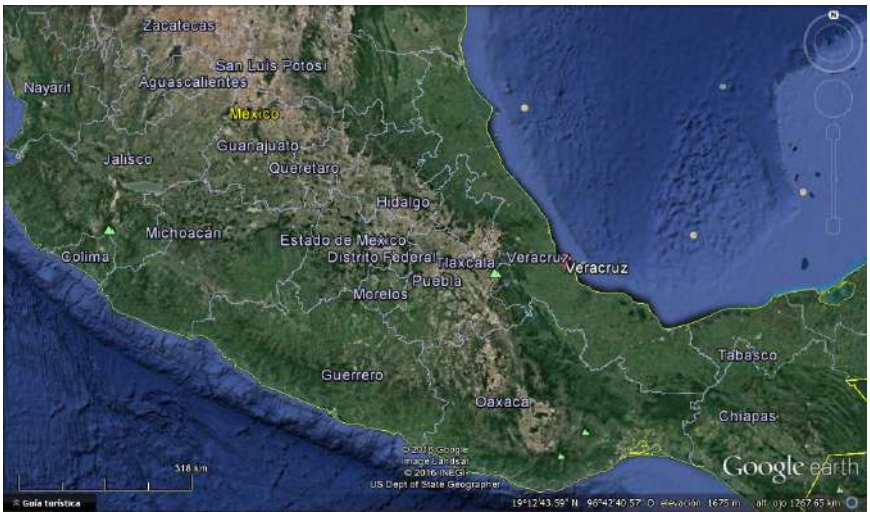


Imagen 1. Veracruz en México.
Fuente: Google Earth

Imagen 2. Teocelo en Veracruz.

Fuente: Google Earth

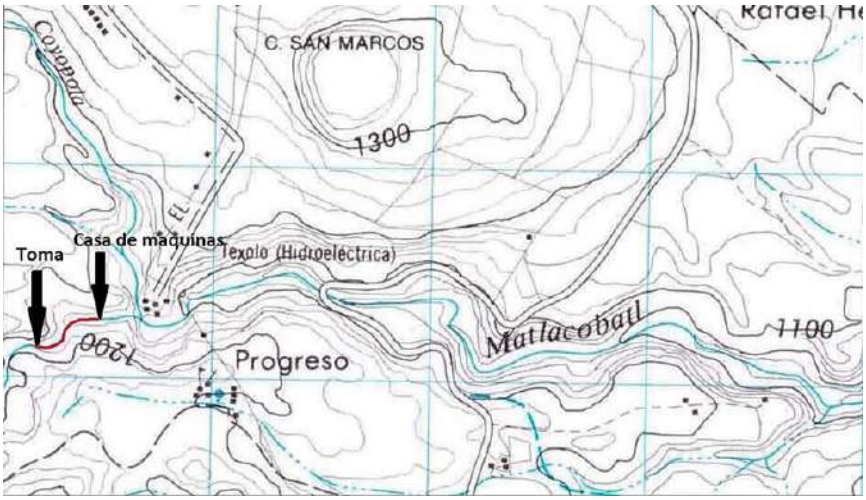


Imagen 3. Ubicación del proyecto en la carta topográfica 1:50,000.

Fuente: Carta topográfica E14B37, INEGI.

DEMANDA DE USUARIO

Dentro de los cálculos para el diseño de la central es de vital importancia contabilizar el recurso ya que así se pueden estimar cifras en referencia a la generación del lugar, para ello se obtienen datos de la estación hidrométrica correspondiente al sitio en donde se visualicen los gastos por mes.

El cálculo de generación eléctrica inicia con el ordenamiento de los gastos de mayor a menor como se muestra en la Tabla 1, de este modo queda establecido el periodo bimestral que se dispondrá para el mantenimiento del sitio, en este caso los meses elegidos son marzo y abril por el bajo caudal que presentan.

Gastos de mayor a menor (m^3/s)		Gasto medio (m^3/s)
Septiembre	24.0866	1.9363
Julio	23.2801	1.9363
Agosto	18.8782	1.9363
Junio	11.4651	1.9363
Octubre	5.9955	1.9363
Noviembre	2.8978	1.9363
Diciembre	2.3455	1.9363
Enero	2.1643	1.9363
Febrero	2.0496	1.9363
Mayo	1.9363	1.9363
Marzo	1.9088	1.9363
Abril	1.8705	1.9363

Tabla 1. Gastos de mayor a menor.
Fuente: Estación hidrométrica Xico

CASO DE ESTUDIO

Debido a que todo el estado de Veracruz cuenta con alta disponibilidad de recurso hídrico, el municipio de Teocelo no es la excepción. La cuenca del río La Antigua incluye a este lugar como uno de sus integrantes y debido a esto hay afluentes que son propicios a la instalación de una minicentral hidroeléctrica. Se aprovechará una altura de 48 m con un caudal mínimo de 1.87053 m^3/s y un caudal máximo de 24.08669 m^3/s. El diseño está basado en un sistema de conducción forzada con una tubería de 1 metro de diámetro de acero inoxidable, la cual estará sumergida en el río y llegará a la casa de máquinas donde se separará el caudal en dos partes iguales, pasando a una turbina tipo Francis, respectivamente, con una eficiencia del 94 % y finalmente a un generador modelo SF250-8/850 de 750 rpm, 400 kW y una eficiencia 93.3 %. La planta cuenta con un factor de generación de 0.34209 la cual por ser un valor menor o igual a 0.4 es considerada una planta pico. La producción de la mini hidroeléctrica contribuirá a satisfacer la demanda eléctrica de Teocelo, la cual está conectada a una red de distribución de 13,800 V; que alimenta al Estado de Coatepec, Xico y Teocelo.

DIMENSIONAMIENTO

Mediante los datos requeridos en Google Earth, y tomando en cuenta las bandas hidrométricas se lograron localizar los principales puntos y de esta manera conocer las medidas correspondientes para el dimensionamiento del área tanto como de la construcción de esta.

Al recopilar la información requerida para el análisis hídrico del área se logró determinar qué proyecto en la Cuenca Río La Antigua generará una media anual de 2,878 MWh/año y con el cual se obtendrá un ahorro de 1693 BEP (determinado al realizar la conversión que nos indica la cantidad de petróleo requerido para generar energía eléctrica es de 1L para generar 10 kWh aproximadamente) aprovechando el recurso hídrico mínimo disponible. Considerando los caudales medios de cada mes será posible generar hasta 28,787 MWh/año como se muestra en la Tabla 2, con lo cual tendríamos un ahorro de 16,939 BEP, con esto evitando la emisión de 18,711.55 toneladas de dióxido de carbono, considerando que este proyecto es de pequeña escala es una cantidad significativa de ahorro en el uso de combustibles fósiles.

Potencia Mensual							
Mes	Caudal	Potencia (w)	Potencia (mw)	Dias por mes	Horas	Generación (wh y mwh)	
Enero	2.1644	893822.8662	0.8938	31.0000	744.0000	665004212.4278	665.0042
Febrero	2.0496	846444.5859	0.8464	28.5000	684.0000	578968096.7249	578.9681
Marzo	1.9089	788306.8708	0.7883	31.0000	744.0000	586500311.8821	586.5003
Abril	1.8705	772477.5694	0.7725	30.0000	720.0000	556183849.9517	556.1838
Mayo	1.9363	799655.6796	0.7997	31.0000	744.0000	594943825.5959	594.9438
Junio	11.4651	4734766.9871	4.7348	30.0000	720.0000	3409032230.6775	3409.0322
Julio	23.2802	9614042.4890	9.6140	31.0000	744.0000	7152847611.8036	7152.8476
Agosto	18.8783	7796189.3693	7.7962	31.0000	744.0000	5800364890.7512	5800.3649
Septiembre	24.0867	9947111.2690	9.9471	30.0000	720.0000	7161920113.6586	7161.9201
Octubre	5.9955	2475969.6722	2.4760	31.0000	744.0000	1842121436.1331	1842.1214
Noviembre	2.8978	1196716.7114	1.1967	30.0000	720.0000	861636032.2396	861.6360
Diciembre	2.3455	968644.2903	0.9686	31.0000	744.0000	720671351.9743	720.6714
		Generación anual (wh/año y mwh/año) =				29930193963.8204	29930.1940
		Generación media anual (wh/año y mwh/año) =				2494182830.3184	2494.1828
		Generación anual sin mantenimiento (wh/año y mwh/año) =				28787509801.9866	28787.5098
		Generación media anual sin mantenimiento (wh/año y mwh/año) =				2878750980.1987	2878.7510

Tabla 2. Generación media y anual

CONCLUSIÓN

El sector energético que aprovecha la energía hidráulica en el país cuenta con una amplia experiencia dando como resultado 64 centrales hidroeléctricas operando en el país actualmente las cuales conforman el 21.9% de la capacidad eléctrica instalada en México. Las mini hidroeléctricas son una opción viable en la generación eléctrica debido a sus características técnicas las cuales se caracterizan por tener menor cantidad de requisitos como lo es una menor área de construcción requerida así como modificación mínima del área designada al proyecto donde incluso es posible descartar la construcción de un embalse en ciertas zonas. Los costos de inversión varían significativamente de una hidroeléctrica a una mini hidroeléctrica y con retorno de inversión bastante prometedor sin dejar a un lado el compromiso ambiental mejorando los niveles de contaminación del medio ambiente evitando la emanación de gases nocivos a la naturaleza.

Al analizar el contenido de este documento se puede confirmar que la implementación de tecnologías que aprovechan los recursos renovables en la lucha por mitigar los efectos ambientales causados por el uso desmedido de los combustibles fósiles y de igual manera se garantiza que la generación necesaria para cumplir con la creciente demanda de energía eléctrica a nivel nacional; es una alternativa viable debido a las constantes mejoras de estos sistemas. En lo cual se tendría un ahorro de 16,939 barriles de petróleo, con esto evitando la emisión de 18711.55 toneladas de dióxido de carbono, considerando que este proyecto es de pequeña escala el ahorro de combustible es una cantidad significativa de ahorro en el uso de combustibles fósiles.

El diseño del proyecto considera la situación social de la cuenca, en donde existe un gran problema con las comunidades aledañas al área delimitada debido a la construcción de represas. Para esto el diseño considera un sistema de conducción forzada evitando la construcción de una represa y así evitar una mayor afectación del Río Xico-Teocelo, del cual no solo depende la flora y fauna sino la actividad económica de los que habitantes de la zona.

REFERENCIAS

Pereyra, D. & Pérez, A. (2005). *Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el Estado de Veracruz.* Noviembre 16, 2015, de INEEC Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/06_hidrologia.pdf

Diario Oficial de la Federación (2012). *Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la cuenca hidrológica Rio La Antigua de la región hidrológica denominada Papaloapan A.* Recuperado el 26 el Noviembre del 2015, de DOF Sitio web: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5227830&fecha=03/01/2012

Banco nacional de datos de aguas superficiales (2007). Recuperado el 26 de Noviembre del 2015, de CONAGUA Sitio web: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20B ANDAS.htm

Gobierno Municipal de Teocelo. (2014). *Plan municipal de desarrollo*. 2015, de Veracruz. Gobierno del Estado Sitio web: teocelo.gob.mx/wp- content/uploads/sites/28/2014/.../PLAN-MPAL.pdf

Principales resultados por localidad (ITER). (2010). *Censo de Población y Vivienda 2015*, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía Sitio web: http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx

CONAGUA, (2005), *Mapa Hidrológico, escala 1:1 000 000*. Sistema de Información Geográfica del Agua, Subgerencia de Programación de la Gerencia Regional Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua.

SEMARNAT. (2014). *Guía programas fomento energías renovables municipios república mexicana*. 05/2016, de SEMARNAT Sitio web:http://www.conuee.gob.mx/pdfs/generacion_distribuida/guiaprogramasfomentoenergiasrenovablesmunicipiosrepublicamexicana.pdf

http://smallhydroturbines.sell.everychina.com/p-102804244-400kw-horizontal-francis-water-turbine-electric-generator-hydro-power-turbine.html

Consejo Nacional de Población. (2010). Proyecciones de la población. 2015, de Secretaría de Gobernación Sitio web: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones

Domitilio y Pérez (2005). *Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz*. Recuperado el 26 de Noviembre del 2015, de UV Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/06_hidrologia.pdf

SEMARNAT (2015). *México Comunica a Las Naciones Unidas sus Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Período 2020 – 2030*. Recuperado el 26 el noviembre del 2015, sitio web: http://www.inecc.gob.mx/acerca/difusion-cp-inecc/1279-indc.

El INEGI pone en línea el simulador de flujos de aguas de cuencas hidrológicas. Recuperado el 28 de noviembre de 2015, Sitio web: http://atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1769:el-inegi-pone-en-linea-el-simulador-de-flujos-de-aguas-de-cuencas-hidrologicas&catid=128:sistema-de-informacion&Itemid=588.

Atlas Municipal de Riesgos Nivel Máximo de La Antigua (2011). Recuperado el 28 de Noviembre del 2015 de SNPC Sitio web: http://utilidades.gatovolador.net/issuu/down.php?url=http%3A%2F%2Fissuu.com%2Fuliseszl64%2Fdocs%2Fla_antigua&inicial=1&np=120

Adriana Castro. (2006). Minicentrales hidroeléctricas. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Secretaría de Energía. (2008). Energías Renovables 2008 - Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos. Argentina: Tecnología de la Información, Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

MODELO DINÁMICO NO LINEAL DE UN ÁLABE DE AEROGENERADOR SOMETIDO A UNA FUERZA DE EXCITACIÓN VARIABLE

Andrés López-López
Programa de posgrado en Energías Renovables, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1+500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis, C.P. 29150, México, 9612005733, **alopez@mer.upchiapas.edu.mx**
José. B. Robles-Ocampo
Programa Académico de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1+500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis, C.P. 29150, México, 9616562232, **jrobles@upchiapas.edu.mx**
Perla. Y. Sevilla-Camacho
Programa académico de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1+500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis, C.P. 29150, México, 9616562232, **psevilla@upchiapas.edu.mx**

RESUMEN

Las altas demandas de energía a nivel mundial y la preocupante cantidad de gases contaminantes que se emiten a la atmósfera cada año, ha llevado a muchos países a implementar sistemas energéticos renovables, que satisfagan la demanda energética y favorezcan al medio ambiente. Entre los sistemas energéticos renovables destacan las turbinas eólicas, las cuales aprovechan la energía del viento para generar electricidad. Actualmente, las turbinas eólicas se diseñan con alabes más largos y esbeltos para aprovechar la mayor cantidad de energía eólica. Sin embargo; al tener mayor longitud, los alabes son más flexibles provocando mayores vibraciones. Estas vibraciones a su vez causan diferentes tipos de daños, tales como: los engranajes rotos, el desprendimiento de los alabes, la ruptura o agrietamiento del rotor y del alabe, el desbalance en las partes rotativas, entre otras. Estos daños resultan en altos costos de reparación y prolongados tiempos de mantenimiento, que sumados a los costos iniciales de instalación encarecen la producción de energía eléctrica. Además, disminuye la eficiencia de las turbinas eólicas, y con ello la competitividad con los sistemas energéticos tradicionales.

Para mantener la eficiencia constante de estas máquinas es necesario mantener a la turbina eólica en condiciones de operación estable y reducir los niveles de vibración en los alabes; para ello, se deben conocer las características dinámicas del alabe; siendo los modelos matemáticos una buena opción para predecir el comportamiento dinámico no lineal de los alabes en operación.

En este trabajo, se desarrollan las ecuaciones diferenciales de un alabe de aerogenerador; estas ecuaciones determinan las inestabilidades debido a las vibraciones que se producen al interactuar con el fluido. Además, se introducen parámetros no lineales de las grandes deflexiones, que se presentan cuando la fuerza externa excita vibraciones de alta frecuencia. La formulación matemática se basa en la dinámica Lagrangiana y las ecuaciones se resuelven numéricamente con el método de Runge-kutta.

ABSTRACT

High energy demands worldwide and the worrying amount of greenhouse gases emitted into the atmosphere each year, have led many countries to implement renewable energy systems that meet energy demand and promote the environment. Among the renewable energy systems include wind turbines, which use the energy of the wind to generate electricity. Currently wind turbines are designed with blades longer and slender to take as much wind energy; however, to have a greater length, the blades are more flexible causing increased vibration. These vibrations in turn cause damage to the gears, detachment of the blades, breaking or cracking of the rotor, unbalance in the rotating parts, among others. These damages result in high repair costs and long maintenance times, which added to the initial installation costs increase the cost of electricity production. Also decreases the efficiency of wind turbines, and thus competitiveness with traditional energy systems.

To maximize the efficiency of these machines is necessary to keep the wind turbine under steady operation and reducing vibration levels in the blades; for this, one must know the dynamic characteristics of the blade. Mathematical models are a good option for predicting the nonlinear dynamic behavior of the blades in operation.

In this paper the differential equations of a blade wind turbine that determine instabilities due to vibrations that occur when interacting with the fluid and nonlinear parameters of large deflections, which are presented are introduced develop when the external force excites vibrations high frequency. The mathematical formulation is based on the Lagrangian dynamic equations are solved numerically by the Runge-Kutta methods.

Palabras claves: álabe, dinámica no-lineal, grandes deformaciones, vibraciones, eólica,

Introducción.

Las energías renovables, especialmente la energía eólica, han ganado mucha atención en los últimos años, debido a la alta demanda energética y a la reciente crisis ecológica. Actualmente, el aprovechamiento de la energía eólica ha crecido rápidamente, convirtiéndose en la mayor fuente de energía renovable. Esto ha aumentado su competitividad económica en comparación con las tecnologías convencionales de generación eléctrica y al ser una fuente renovable se ha convertido en un pilar de los sistemas de energía de muchos países, reconocida como una fuente fiable de electricidad (Staino & Basu, 2013).

Las turbinas eólicas son máquinas que aprovechan la energía cinética del viento y la convierten en energía eléctrica, la mayoría son de eje horizontal con rotores de dos o tres alabes, siendo la turbina de tres alabes la más eficiente. El rotor de la turbina está ubicado en lo alto de la torre donde el viento tiene más energía cinética. En condiciones normales el rotor se orienta frente a la dirección del viento con el objetivo de capturar la máxima cantidad de energía (Conca de la Asunción, 2012). Muchas veces las turbinas eólicas operan a altas

velocidades provocando daños graves al sistema de rotor. Además; por la naturaleza variable del viento, las turbinas se someten a esfuerzos de fatiga que terminan en la ruptura o desprendimiento de los alabes; aunado a esto, los diseños de los alabes son cada vez más flexibles, largos y esbeltos. Estas características provocan mayores deflexiones al interactuar alabe-fluido y se incrementan los niveles de vibración (Fitzgerald & Basu, 2013).

Para reducir estos daños, las turbinas eólicas deben mantenerse en condiciones de operación estables y reducir al máximo las vibraciones, para ello se deben conocer las características dinámicas de la turbina, siendo necesario aplicar sistemas de monitoreo de las condiciones de operación y detección de fallas. Una forma común y efectiva de obtener estas características es la aplicación de un análisis experimental de vibraciones especialmente en las partes de rotación (Liu, 2013). Otra forma de obtener las características vibratorias de los alabes, es a partir de modelos matemáticos de solución analítica o numérica que predicen su comportamiento dinámico. Varios investigadores trabajan para obtener parámetros dinámicos de los elementos en una turbina y desarrollan modelos cada vez más precisos que rijan su comportamiento físico. Muchos de estos modelos matemáticos están fundamentados en las grandes deflexiones de vigas y en su radio de curvatura, cuando la geometría es muy esbelta.

Por la configuración geométrica en la que se encuentran los alabes unidos a la góndola de la turbina, la mayoría de los investigadores analizan a los alabes como vigas en cantiléver. Desde los años 80 existe un gran cuerpo de trabajo en el modelado de alabes giratorios bajo cargas aerodinámicas y gravitacionales; tales como: el desarrollado de ecuaciones diferenciales parciales del movimiento rotativo de una pala de aerogenerador (Wendell, 1982); la determinación de la inestabilidad dinámica de un alabe por medio de modelos basados en elementos finitos, considerando una viga tipo Timoshenko con un ángulo inicial de torcimiento (Sabuncu & Evran, 2006) ; también, se han incluido los efectos de la gravedad y la acción del ángulo de cuerda en los modelos (Kallesøe, 2007).

En investigaciones recientes, los modelos matemáticos se enfocan en estudiar la no linealidad de la dinámica de las turbinas, en la literatura se encontró que se han determinado las condiciones de inestabilidad del alabe bajo diferentes excitaciones, siendo los parámetros de rigidez, geometría y la interacción viento-estructura los que modifican la linealidad del sistema (Larsen & Nielsen, 2007).

También se han desarrollado ecuaciones no lineales que modelan el potencial de deflexión de una viga no uniforme, y puede ser extendida a grandes alabes flexibles (Caruntu, 2008). Algunos, se han enfocado en la no linealidad geométrica cuando existen grandes deflexiones, usando métodos de elementos finitos para su solución aplicados a elementos delgados que se modelan con elementos tipo viga o placa, y demuestran que los efectos no lineales resultan ser una función de la geometría (Jauregui & Jimenez, 2011). Otros, desarrollan ecuaciones diferenciales parciales que rigen el movimiento plano de un alabe de turbina eólica, sujeto a cargas aerodinámicas utilizando el principio de Hamilton extendido. Incluyen en la ecuación términos no lineales debido a la curvatura, geometría no lineal y excitación directa de la frecuencia de rotación (Ramakrishnan & Feeny, 2011)).

Modelar alabes como vigas en cantiléver facilita el análisis dinámico y el desarrollo de modelos matemáticos que describen su comportamiento vibratorio (Inoue, Ishida, & Kiyohara, 2012; Jauregui & Jimenez, 2011; Cruz, Gutiérrez, & Martínez, 2008; Jáuregui et al, 2008; Ramakrishnan & Feeny, 2011). Este trabajo consiste en desarrollar un modelo matemático a partir de vigas en cantiléver con grandes deflexiones, incluyendo parámetros como la flexibilidad del alabe, que sometidas a cargas variables del viento producen fatiga; así como problemas de inestabilidad (Ahlstrom, 2005). Para la adecuada caracterización dinámica del alabe se recurre a una formulación Lagrangiana utilizando elementos finitos tipo vigas bidimensionales que se solucionan con el método de solución numérica Runge-Kutta.

Modelo matemático.

El modelo dinámico del alabe se obtiene aplicando las ecuaciones de movimiento de Lagrange. El alabe de acuerdo a su posición en la turbina se le considera como una viga en voladizo. Para el modelo se usa una viga vertical empotrada en el extremo inferior a una base fija; en el extremo superior es libre y se aplica una fuerza que varía en función de la velocidad del viento. La base se considera completamente rígida, en la figura 1 se muestra la configuración del modelo.

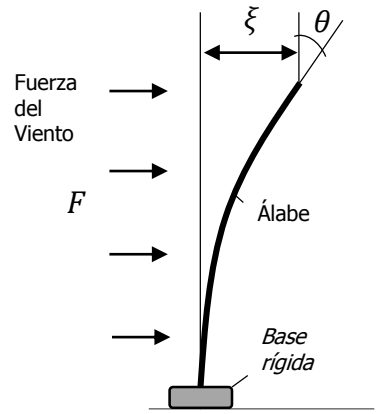


Figura 1. Diagrama de una viga vertical flexionada por la fuerza del viento.

La ecuación de movimiento de Lagrange en términos de la energía cinética T y la energía potencial U está dada por la ecuación (1), la cual se aplica a un elemento tipo viga bidimensional de dos nodos.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \tag{1}$$

Las energías cinética y de deflexión se determinan con la ecuación (2) aproximando las deflexiones como una función polinomial cubica, considerando que sólo varía en función de la posición vertical y.

$$\xi(y,t) = g_0(t) + g_1(t)Y + g_2(t)Y^2 + g_3(t)Y^3 \tag{2}$$

La energía potencial de deflexión se expresa en la ecuación (3), dónde: E es el módulo de elasticidad del material de la viga, I es el momento de inercia de la sección transversal y k es la ecuación de la curva de deflexión.

$$U = \frac{EI}{2}\int_0^L k^2 dy \tag{3}$$

Para este estudio se modelan las grandes deflexiones en el álabe y es necesario introducir los parámetros no lineales, antes estudiado por (Caruntu, 2008; Jauregui & Jimenez, 2011 y Ramakrishnan & Feeny, 2011), donde la curva de deflexión se expresa de forma aproximada en la ecuación (4).

$$k \approx \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}\right)^2 \left[1 - \frac{3}{2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial y}\right)^2\right]^2 \tag{4}$$

La variación de la energía cinética se expresa en la ecuación (5) y se obtiene asumiendo que la masa está distribuida en cada nodo.

$$T = \frac{1}{2}\rho A \int_0^L \left(\frac{\partial \xi(t)}{\partial t}\right)^2 dy \tag{5}$$

Al sustituir las ecuaciones (3), (4) y (5) en (1) se obtiene un sistema de 2 ecuaciones (6) y (7) en términos de la deflexión nodal ξ y de la pendiente θ.

$$m\frac{13}{35}\ddot{\xi} - m\frac{11}{210}\ddot{\theta}L + U_\xi = Q_\xi \tag{6}$$

$$m\left(-\frac{11}{210}\ddot{\xi}L + \frac{1}{105}\ddot{\theta}L^2\right) + U_\theta = Q_\theta \tag{7}$$

Para el cual las derivadas parciales U_ξ y U_θ están expresadas en las ecuaciones (8) y (9).

$$U_\theta = -\frac{EI}{770L^7}(-3888\xi\theta^5L^6 + 5220\xi^2\theta^4L^5 - 1080\xi^2\theta^3L^4 + 3645\xi^3\theta^2L^3 - 8100\xi^4\theta L^2 + 6804\xi^5L + 5632\theta^3L^6 - 7920\xi\theta^2L^5 + 4752\xi^2\theta L^4 - 5940\xi^3L^3 + 4620\xi L^5 - 3080\theta L^6) \tag{8}$$

$$U_\xi = \frac{EI}{770L^7}(-1044\theta^5L^5 + 540\xi\theta^4L^4 - 3645\xi^2\theta^3L^3 + 16200\xi^3\theta^2L^2 - 34020\xi^4\theta L + 34992\xi^5 + 2640\theta^3L^5 - 4752\xi\theta^2L^4 + 17820\xi^2\theta L^3 - 28512\xi^3L^2 + 9240\xi L^4 - 4620\theta L^5) \tag{9}$$

Las fuerzas no conservativas Q_ξ y Q_θ para este sistema son de dos tipos: una para la fuerza de excitación f_v y otra a la fuerza de amortiguamiento estructural del álabe, de modo que las fuerzas no conservativas Q_ξ y Q_θ se obtienen de (10) y (11).

$$Q_\xi = f_v + F_\xi \tag{10}$$

$$Q_\theta = F_\theta \tag{11}$$

La fuerza de excitación f_v del viento que deflexióna a la viga delgada se determina con la ecuación (12).

$$f_v = A \cdot P_v \tag{12}$$

La presión del viento que ejerce sobre el alabe es una fuerza distribuida a lo largo de su longitud, que aumenta con el cuadrado de la velocidad del viento y se reduce con la resistencia aerodinámica. La presión del viento P_v viene dada por la ecuación (13) donde: A es el área sobre la cual impacta el aire, C_d es el coeficiente aerodinámico de la resistencia al avance ($C_d = 1.17$ para superficies planas), R_o la densidad del aire seco (R_o =1.223 kg/m^3 a 1 atm y 15° C) y v es la velocidad del viento.

$$P_v = C_d \cdot R_o \cdot v^2 \tag{13}$$

Las fuerzas de amortiguamiento estructural F_ξ y F_θ se determinan a partir de las ecuaciones (14) y (15) (Jauregui & Jimenez, 2011).

$$F_\xi = -\frac{mC}{210}(-11\dot{\theta}L + 78\dot{\xi}) \tag{14}$$

$$F_\theta = -\frac{mCL}{210}(-2\dot{\theta}L - 11\dot{\xi}) \tag{15}$$

Finalmente al sustituir (10) y (11) en (6) y (7) y resolver simultáneamente las ecuaciones. Se obtiene el conjunto de ecuaciones (16) y (17) que modelan el comportamiento dinámico del álabe.

$$\ddot{\xi} = \frac{12}{m}f(t) + \frac{66}{mL}F_\theta + \frac{12}{m}F_\xi - \frac{12}{m}U_\xi - \frac{66}{mL}U_\theta \tag{16}$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{66}{mL}U_\xi - \frac{468}{mL^2}U_\theta + \frac{66}{mL}\mathbf{f}(t) + \frac{468}{mL^2}F_\theta + \frac{66}{mL}F_\xi \quad (17)$$

Los fenómenos no lineales comúnmente se identifican en los espectros de frecuencia (FFT), con frecuencias subarmonicas o a altas frecuencias dentro de amplios rangos de excitación. Sin embargo, esta técnica de FFT es limitada a problemas no lineales más complejos.

Siendo los diagramas de fase, las ondoletas (wavelet), técnicas estadísticas, entre otras, muy versátiles para la determinar si un sistema es no lineal. En este trabajo se usa los diagramas de fase para determinar la no linealidad del sistema. El modelo matemático es una forma aproximada de identificar estos fenómenos. Las ecuaciones (16) y (17) se resuelven numéricamente utilizando el método de Runge-Kutta obteniendo los desplazamientos y velocidades del alabe. Para ello se corrieron 3 tipos de pruebas: la primera, se hizo para obtener la vibración libre del alabe; la segunda y tercera prueba, se realizó variando la fuerza de excitación para identificar las vibraciones no lineales de un sistema, esto se consiguió usando la fuerza aerodinámica del viento a velocidades medias de 86 km/h y altas de 120 km/h.

El álabe analizado tienes una sección transversal rectangular con las siguientes dimensiones: longitud de 0.28 m, ancho de 0.012 m y espesor de 0.00059 y un momento de inercia de 3.663888x 10^{-12} m^4. Se considera que el álabe es de aluminio 6160 con un módulo de elasticidad de 70 GPa.

Desarrollo experimental

Para validar el modelo matemático se utilizó los siguientes equipos: Un túnel de viento AEROLAB Basic Educacional Wind Tunnel (EWT) que alcanza velocidades del viento de hasta 68.8 m/s. Permite variar las velocidades del viento y con ello las fuerzas de excitación, el túnel de viento tiene un área de pruebas de 30.48x30.48x60.96-cm; un acelerómetro XL135 analógico con sensibilidad de ± 3 g (1 g= 9.81 m/s) cuya masa se considera despreciable; un osciloscopio Tektronix TBS.

El álabe de aluminio AL 6160 con las dimensiones mencionadas anteriormente, se considera como un elemento vertical. Este elemento es montado dentro del túnel, el extremo superior es libre donde se instaló un acelerómetro XL135 analógico. Las señalas se adquieren por osciloscopio Tektronix TBS 1042 a una tasa de muestreo de 5000 muestras/s. Finalmente los datos obtenidos, son integrados por el método de Simpson generando la velocidad y el desplazamiento de la viga.

El objetivo del experimento es obtener las velocidades y desplazamientos de la viga para compararlos con los obtenidos en la simulación numérica. Además de graficar los diagramas de fase con los que se identifican los fenómenos no lineales del álabe en funcionamiento.

Para ello se corrieron 3 tipos de pruebas: la prueba 1 se realizó con una deflexión inicial a la viga de 0.06 m; la prueba 2 se hizo para una velocidad media del viento de 86 km/h y la prueba 3 para una velocidad del viento de 120 km/h.

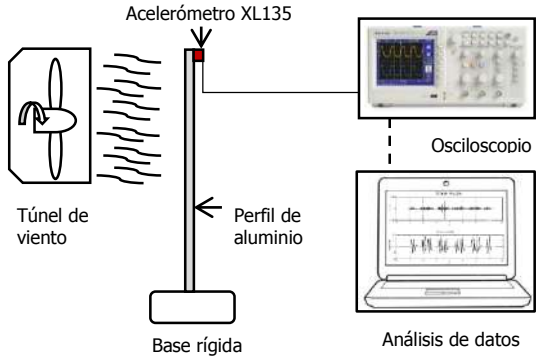


Figura 2. Esquema experimental de una viga vertical flexionada por la fuerza del viento.

Resultados numéricos y experimentales

En esta sección, se presentan los resultados numéricos del modelo matemático y los resultados de las pruebas experimentales del álabe considerado como una viga delgada. De la simulación numérica se obtiene el comportamiento dinámico del álabe, que se muestra en los diagramas de la figura 3. En estas gráficas, se observa como las amplitudes del desplazamiento incrementan con los cambios de las velocidades del viento y con ellos las deflexiones del álabe. En la prueba 1 con movimiento libre, los desplazamientos y velocidades se mantienen estables y se afirma que la viga tiene un comportamiento armónico lineal; se comprueba con el diagrama de fase que el sistema es lineal, donde los ciclos son completamente ovalados y bien definidos. En las prueba 2, se muestra un desplazamiento inicial grande debido a que la fuerza deflexiona al álabe y la deja oscilando en esta posición; en el diagrama de fase, se ve que el sistema es semi-estable, debido a que existen pequeñas perturbaciones en la trayectoria. En la prueba 3, se muestra amplitudes de desplazamientos y velocidades altos, indicado que existe mayor oscilación en el álabe y por lo tanto mayor deflexión, esto se puede comprobar en el diagrama de fase, donde se muestra mayor alteración en los lóbulos observando ciclos que se entrecruzan con formas poligonales amorfas, siendo más notorias en la prueba con mayor fuerza de excitación, considerando que el sistema es inestable.

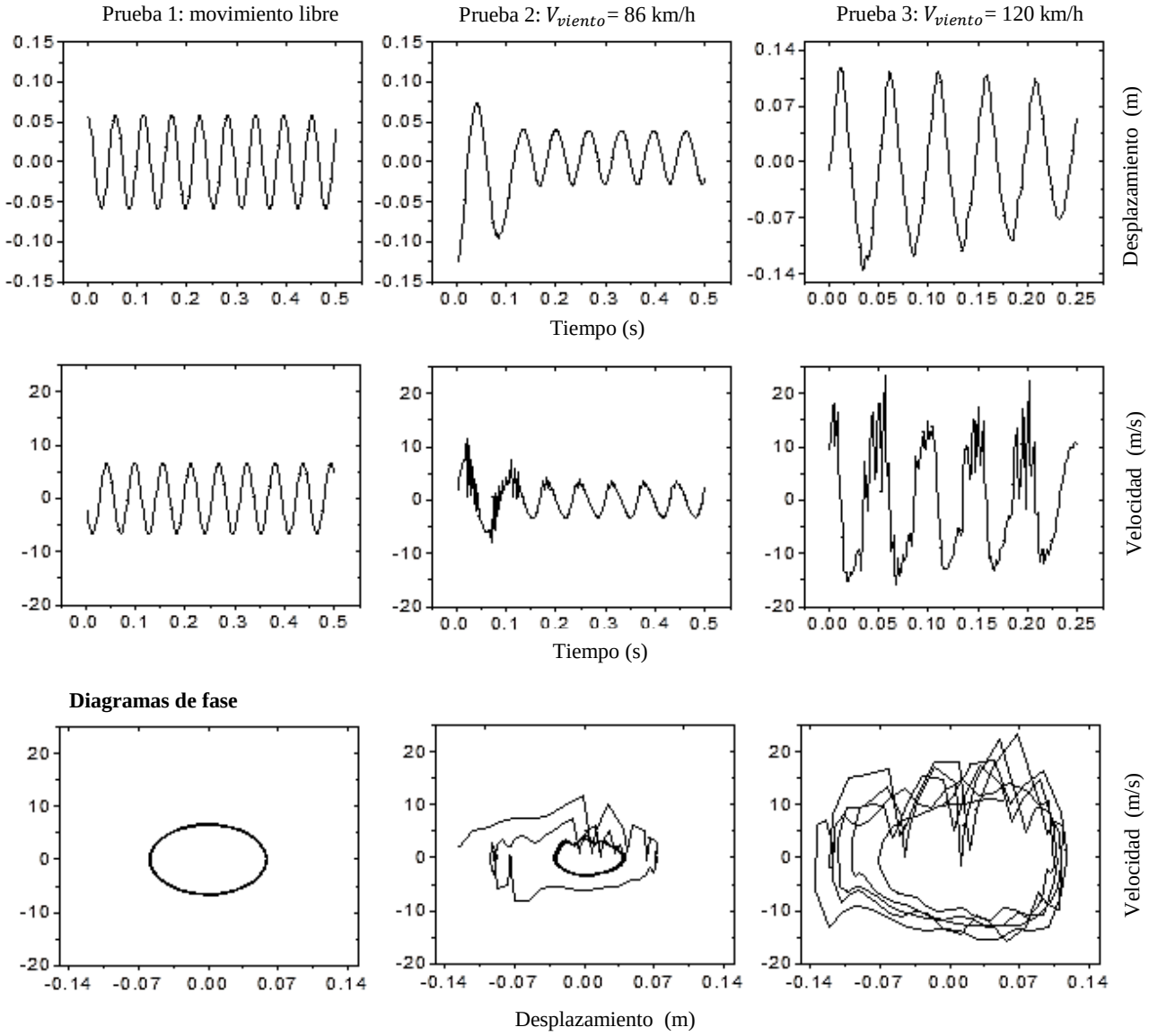


Figura 3. Resultados numéricos para la flexión de una viga de aluminio, en movimiento libre y a la acción de la fuerza del viento a velocidades de 86 km/h y 120 km/h.

La figura 4 muestra los resultados experimentales ordenados por número de prueba de izquierda a derecha. La prueba 1; corresponde al movimiento libre de la viga, donde el desplazamiento es periódico y estable. La amplitud del desplazamiento disminuye una pequeña cantidad en cada periodo de oscilación, por el bajo coeficiente de amortiguamiento estructural del álabe. Al igual que el desplazamiento, la velocidad es periódica y armónica con una pequeña disminución en sus amplitudes. Al comparar los gráficos, se observa que la velocidad se encuentra desfasada respecto al desplazamiento, esto demuestra que el método de integración utilizado es eficiente. El diagrama de fase de la prueba 1 tiene un comportamiento estable, donde los ciclos que lo forman son ovoides regulares, lo que implica una relación lineal que existe entre el desplazamiento y la velocidad.

Las fuerzas de excitación del viento modifican el comportamiento armónico de los diagramas en las pruebas 2 y 3. Al comparar los desplazamientos de estas pruebas se observa que a mayor velocidad del viento, se incrementa la amplitud de vibración. Además, en los dos casos, se observa como la curva de movimiento tiende a desplazarse hacia arriba, esto indica la dirección en la que el viento deflexiona a la viga. Las fuerzas de excitación se incrementan al aumentar las velocidades del viento y con ello las inestabilidades del sistema, las cuales se ven reflejadas en los diagramas de velocidad como saltos y picos de las ondulaciones. Estas distorsiones en los gráficos se hacen presentes a mayores velocidades del viento, cuando la relación del desplazamiento con las velocidades forzadas es no lineal.

Esta no linealidad se observa a mayor detalle en los diagramas de fase, para la prueba 2 el diagrama de fase muestra ciclos ovoideos en su centro y ciclos irregulares que se entrecruzan a su alrededor, esto se debe que se encuentran presentes en el grafico comportamientos lineales y no lineales, por lo que el sistema es semi-estable. En cambio para la prueba 3, a una mayor velocidad del viento, el diagrama de fase es más irregular y el comportamiento no lineal es predominante, en este momento el sistema es inestable.

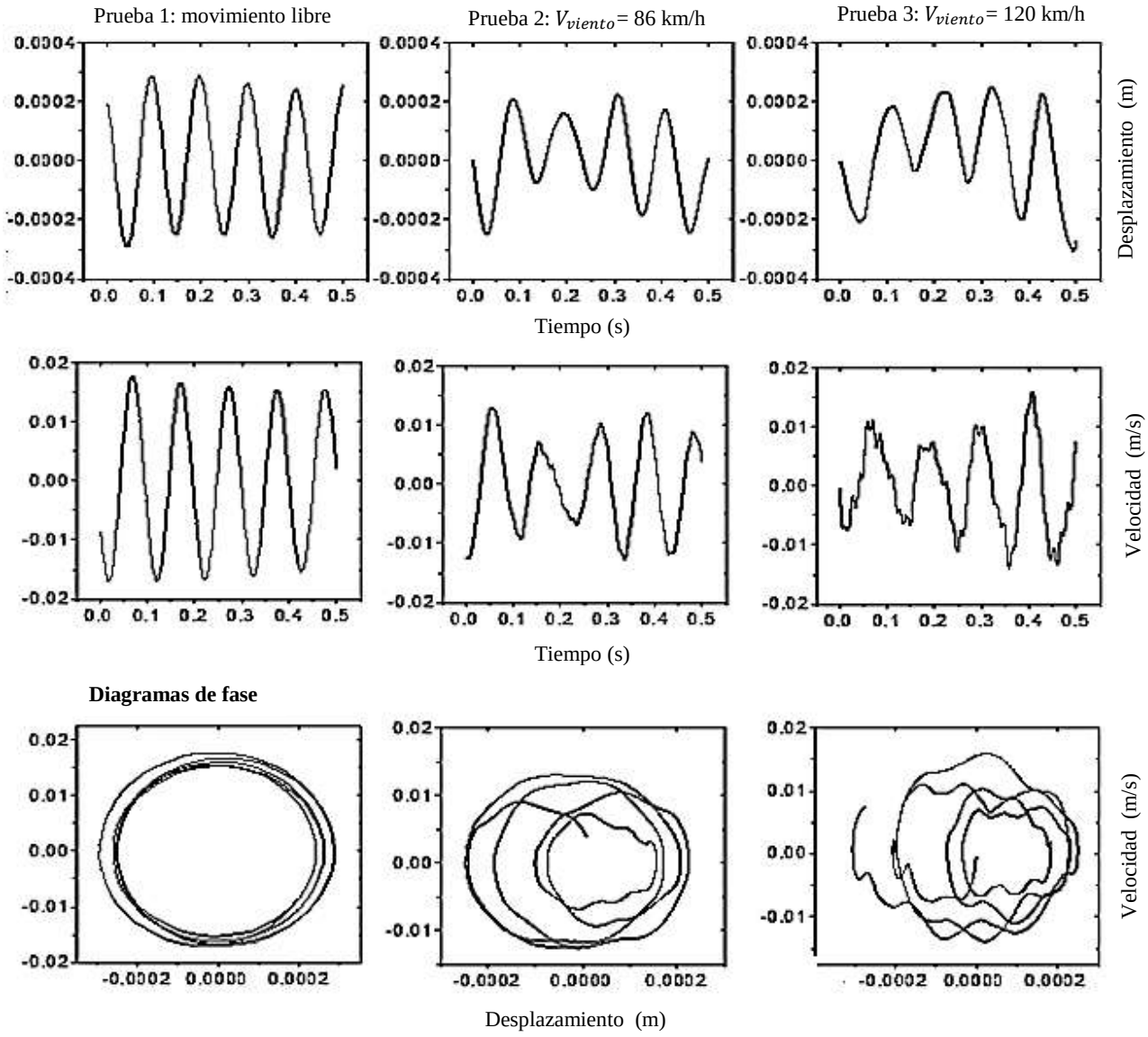


Figura 4. Resultados experimentales de la flexión de una viga de aluminio, en movimiento libre y a la acción de la fuerza del viento a velocidades de 86 km/h y 120 km/h.

Conclusiones

El modelo matemático del alabe desarrollado para una viga vertical donde se consideran parámetros de elasticidad, inercia, fuerza excitadora y coeficiente de amortiguación. El modelo permite obtener los desplazamientos del alabe cuando es sometido a grandes deflexiones, tanto en vibración libre como forzada. Los desplazamientos y velocidades de la simulación numérica son similares a los obtenidos de forma experimental, de este modo el modelo desarrollado es un método eficaz de obtener las características vibratorias de los alabes

Los diagramas de fase permiten identificar el comportamiento no lineal del alabe, siendo la no linealidad un parámetro que aumenta al tener mayores deflexiones y al incrementar las velocidades del viento. Además, la forma de los diagramas de fase obtenida de la simulación numérica tiene una forma poligonal similar a los experimentales, concluyendo que los diagramas de fase obtenidos de la simulación son confiables y son una herramienta útil para identificar cuando el sistema entra en la no-linealidad.

El modelo matemático propuesto ofrece una aproximación cercana de las vibraciones libres y forzadas en el alabe, permitiendo identificar los efectos no lineales de grandes deflexiones. Además; ofrece la ventaja de modificar las velocidades del viento, las propiedades mecánicas del material y el nivel de amortiguamiento del alabe, con los cuales se pueden obtener las características óptimas para lograr la estabilidad del sistema. El modelo matemático también puede ser aplicado a todas aquellas estructuras con gran esbeltez y flexibilidad, como las que se utilizan en las edificaciones o en el diseño de diversas maquinas industriales.

REFERENCIAS

Ahlstrom, A. (2005). Aeroelastic Simulation of Wind Turbine Dynamics. Stockholm, Sweden.

Caruntu, D. (2008). On nonlinear forced response of nonuniform blades. In Proceeding of the 2008 ASME Dynamic Systems and Control Conference, no. DSCC2008-2157, ASME.

Conca de la Asunción, C. (2012). Evaluación de estrategias de control de aerogeneradores de alta potencia. Valencia.

Cruz, A. P., Gutiérrez, W. E., & Martínez, R. E. (2008). Sistema para reducción de esfuerzos en álabes de turbinas. Memorias del 14 congreso internacional anual de la SOMIM.

Fitzgerald, B., & Basu, B. (2013). Cable connected active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades. Journal of Sound and Vibration, 5980–6004.

Inoue, T., Ishida, Y., & Kiyohara, T. (2012). Nonlinear Vibration Analysis of the Wind Turbine Blade (Occurrence of the Superharmonic Resonance in the Out of Plane Vibration of the Elastic Blade), Journal of Vibration and Acoustics.

Jáuregui, C. J., Jiménez, V. D., & Rubio, C. E. (2008). Identificación del comportamiento dinámico no lineal en estructuras esbeltas. Memorias del 14 congreso internacional anual de la SOMIN.

Jáuregui, J. C., & Jiménez, D. (2011). Nonlinear vibration analysis of wind turbine blades. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, 19-25.

Kallesøe, B. S. (2007). Equations of motion for a rotor blade, including gravity and pitch action. Wind Energy, 209–230.

Larsen, j. & Nielsen, k. (2007). Nonlinear parametric instability of wings turbine wings. Journal of sound and vibration, 299.

Liu, W. (2013). The vibration analysis of wind turbine blade–cabin–tower coupling system. Engineering Structures, 954–957.

Ramakrishnan, V., & Fenny, B. F. (2011). In-plane nonlinear dynamics of wind turbine blades. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences.

Sabuncu, M. & Evran, K. (2006). The dynamic stability of a rotating pre-twisted asymmetric cross-section Timoshenko beam. International Journal of Mechanical Sciences, 579–590.

Staino, A., & Basu, B. (2013). Dynamics and control of vibrations in wind turbines with variable rotor speed. Engineering Structures, 58–67.

Wendell, J. (1982). Simplified aeroelastic modeling of horizontal-axis wind turbines. Massachusetts Inst. Of Tech., Cambridge, USA.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

Transición energética en la demanda de energía eléctrica del sistema eléctrico mexicano

Gabriela Hernández-Luna, Antonio Rodríguez-Martínez
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa. Cuernavaca, Morelos. C.P. 62290. México.
gabriela.hernandezluna@uaem.edu.mx

Helena Cabal, Yolanda Lechón
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Av. Complutense, 40, 28040 Madrid, España.

José María Ponce Ortega
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Av. Francisco J. Múgica s/n. Ciudad Universitaria, Morelia Michoacán. C.P. 58030. México.

RESUMEN

La producción de energía eléctrica en México es generada, en gran medida, a partir de combustibles fósiles que trae como consecuencia emisión de gases efecto invernadero, siendo el sector eléctrico en México responsables de la emisión de casi el 60% [1]. En este trabajo se presenta una alternativa de crecimiento del sector eléctrico mexicano cuyo objetivo es satisfacer la demanda energética nacional cumpliendo con la Ley General de Cambio Climático (LGCC) emitida por el Gobierno Federal en el año 2012 [2]. Esta Ley establece criterios definidos respecto al uso de distintas fuentes energéticas, principalmente energías limpias, utilizadas en la generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda energética nacional. En este trabajo la demanda energética nacional es determinada en función de proyecciones probabilísticas derivadas de estimaciones de *Revision of the World Population Prospects* 2015 de la Organización de las Naciones Unidas [3] con tres diferentes consumos energéticos *per cápita*. Se analizaron pruebas para datos históricos disponibles obteniendo así prospectivas para períodos de 2020, 2030, 2040 y 2050. Los resultados muestran que para los años analizados es factible satisfacer la creciente demanda energética bajo las restricciones de la LGCC. Adicionalmente se determina el número óptimo de centrales que satisfacen la demanda energética nacional así como también el costo erogado por tipo de tecnología, considerando costo de inversión, costo por uso de combustible y el costo del mantenimiento del tipo de central. Como producto derivado de la generación de energía eléctrica utilizando una matriz de fuentes energéticas, se determinaron las emisiones de CO_2 equivalente. De manera general, se observa en los periodos analizados una disminución en la generación de energía eléctrica empleando fuente fósiles así como incremento de la contribución de generación de energía eléctrica empleando fuentes energéticas limpias.

ABSTRACT

The electrical energy production in Mexico is generated, mainly, from fossil energetic sources producing emission of the greenhouse gases (GHG) which are responsible of almost the 60 % of the total emissions. In this work an alternative energy production growth with the objective of satisfy the electrical energy demand under the constrictions of the General Climate Change Law (LGCC in Spanish) is proposed. This law establishes limits about the proportional contribution to electrical energy generation from fossil energetic sources. The electrical energy demand is calculated from the *Revision of the World Population Prospects* 2015 of the UN with tree energy consumption *per cápita* in this work. The historical electrical generation data were analyzed to obtain prospectives for the year 2020, 2030, 2040 and 2050. The results show it is possible to satisfy the electrical energy demand under the LGCC constrictions. The optimal number of power plants were determined for each demand condition, as well as the cost realized by the use of each kind of technology, including investment cost, fuel usage cost and operation and maintenance cost. Also equivalent of CO_2 emissions were calculated. Generally the model shows there is feasible the electrical energy generation diminishing the usage of fossil fuels and increasing the electrical energy generation from clean fuels.

Palabras claves: sistema eléctrico mexicano, generación de energía, energía eléctrica, emisiones, energía fósil, energía limpia, demanda.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Eléctrico Mexicano (SEM) genera energía eléctrica para satisfacer la demanda nacional empleado principalmente combustibles fósiles (aproximadamente el 60 %) y el resto proviene de fuentes renovables. La estructura del SEM consta de sectores públicos y privados. El sector público es administrado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el privado está compuesto por sectores como cogeneración de particulares, consumo propio, pequeña producción, importaciones y exportaciones proviene de fuentes energéticas fósiles así como de fuentes renovables [3]. En este trabajo se presenta una alternativa de crecimiento del sector eléctrico mexicano cuyo objetivo es satisfacer la demanda energética nacional bajo las restricciones impuestas por la Ley General de Cambio Climático (LGCC) emitida por el Gobierno Federal en el año 2012 [2]. Esta Ley establece criterios definidos respecto a contribuciones porcentuales de distintas fuentes energéticas utilizadas en la generación de energía eléctrica satisfaciendo una demanda determinada en función de proyecciones probabilísticas derivadas de estimaciones de *Revision of the World Population Prospects* 2015 de la Organización de las Naciones Unidas [3] con tres consumos energéticos, de 1.91, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita*.

METODOLOGÍA

En la elaboración del modelo propuesto se siguieron los siguientes pasos

- Análisis del sistema eléctrico mexicano (SEM).

En esta etapa se realiza una búsqueda de información disponible del SEM respecto a la generación de energía eléctrica, fuentes energéticas, capacidades de centrales, número de centrales disponibles de las tecnologías empleadas en la generación de energía eléctrica a partir del año 2000 y hasta el año 2014.

- Determinación de variables del SEM.

De acuerdo a la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), así como de los sistemas de generación de energía eléctrica se identifican las variables a considerar en el modelo a proponer, haciendo una primer clasificación de las fuentes energéticas por su origen: fósiles y limpias. Dentro de cada tipo de fuente se sugiere subdividirse de acuerdo al tipo de combustible empleado para la generación de la energía eléctrica; así las fuentes fósiles se subdividen en sistemas que emplean carbón, combustóleo, diésel y gas natural mientras que las fuentes limpias en sistemas que usan bioenergía, energía eólica, fotovoltaica, geotérmica, hidráulica y nuclear para la generación de energía eléctrica.

- Obtención del modelo de optimización.

El modelo se plantea al hacer un minucioso análisis de las capacidades de generación de energía eléctrica así como el número de centrales en función de la clasificación realizada.

La demanda energética nacional es modelada considerando las contribuciones energéticas provenientes de fuentes fósiles y fuentes limpias proponiendo una superestructura presentada en la Fig.1 y representada a través de la Ec. 1.

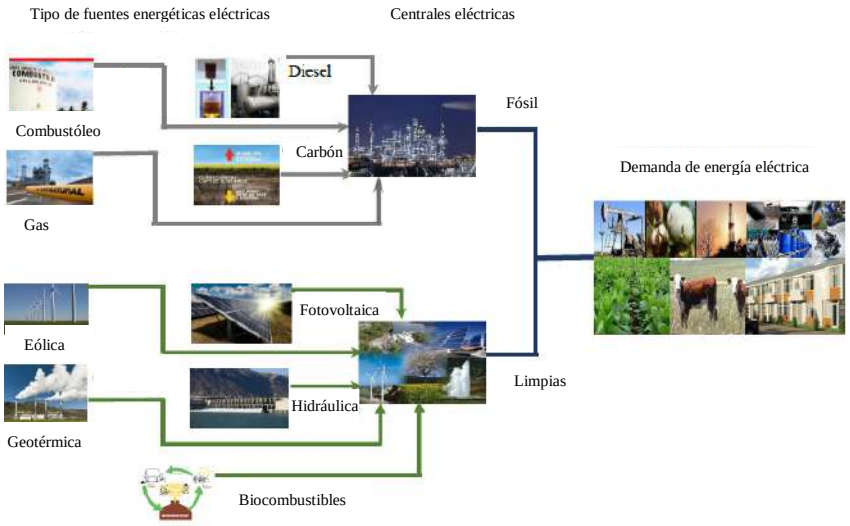


Figura 1. Superestructura propuesta para satisfacer la demanda del sector eléctrico mexicano

$$E_{demanda} = E_{fósil} + E_{\lim pia} \tag{1}$$

donde $E_{demanda}$ representa la demanda de energía eléctrica nacional, E_{fosil} representa sistemas que emplean fuentes energética fósiles como carbón, combustóleo, diésel y gas natural para la generación de energía eléctrica, mientras que la E_{limpia} representa sistemas que emplean como fuentes energéticas limpias como biomasa, energía eólica, fotovoltaica, geotérmica, hidráulica y nuclear para la generación de energía eléctrica.

Las contribuciones individuales de cada tipo de fuente energética se determinan con la Ec. 2.

$$E_i \leq E_{i_{instalada}} + x_i * E_{i_{capacidad}} * af \tag{2}$$

donde *i* representa los diferentes tipos de energéticos empleados en la generación de energía eléctrica, $E_{instalada}$ es la energía instalada en un periodo previo al periodo de análisis, sus unidades son MWh; x_i es el número de centrales para cada tipo de energético, $E_{i_{capacidad}}$ representa la capacidad de cada tipo de central para la generación de energía eléctrica en MW y finalmente a*f* es un factor para homogenizar las unidades.

Adicionalmente se determinan costos y emisiones de CO_2 originadas por la generación de energía eléctrica de cada tipo de combustible empleado.

En esta propuesta, el costo total anual (TAC) de generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda nacional consideran el costo de inversión, *a*; costo por uso de combustible o fuente energética, *b*, así como también el costo de operación y mantenimiento, *c* [4]. La expresión para determinar los costos se presenta en la Ec. 3.

$$TAC = \sum_{1}^{i} E_i * \sum_{1}^{i} \left(a_i + b_i + c_i \right) \tag{3}$$

La generación de energía eléctrica trae consigo una emisión de CO_2 como consecuencia del empleo de combustibles, misma que se determina en cada periodo de análisis así como para cada fuente energética empleada a través de la Ec. 4.

$$CO_{2\,emisión} = \sum_{1}^{i} E_i * FECO_{2i} \tag{4}$$

donde $FECO_{2i}$ es un factor de emisión de CO_2 por el uso de cada combustible *i* analizado [5] .

- Implementación del modelo de optimización.

El modelo energético propuesto satisface la demanda energía nacional generada por CFE en función del tipo de fuente energética, como objetivo principal se propone minimizar el número de centrales que emplean fuentes energéticas fósiles dando prioridad al número de centrales que usan tecnologías renovables. Para lograr este objetivo y considerando la linealidad del modelo propuesto, se hizo uso de la programación LP con GAMS (*General Algebraic Modeling System*) bajo las restricciones propuestas por la ENCC [2], presentada en la Tabla 1.

Año / Tipo de fuente energética	% Energía Fósil	% Energía Limpia
2020	70	30
2030	65	35
2040	60	40
2050	50	50

- Pruebas y validación del modelo de optimización.

La demanda energética anual a satisfacer está basada en proyecciones probabilísticas derivadas de estimaciones de la *Revision of the World Population Prospects* 2015 [3] con dos diferentes modelos poblacionales: *LFV*, (L*ow Fertitlity Variant*, por sus siglas en inglés) y CFV (*Constant Fertility Variant*, por sus siglas en inglés) con consumos de 1.91, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita* cada modelo. El primer consumo, 1.9 MWh/*cápita*, representa el consumo promedio en el periodo de 2000 a 2010. El segundo, de 2.0 MWh/*cápita*, considera un incremento anual poblacional de 10 % y el tercero y último, 4.0 MWh/*cápita*, es el consumo actual de algunos países desarrollados. Se realizaron pruebas para calibrar el modelo en función de datos históricos disponibles y posteriormente se realizaron prospectivas para periodos de 2020, 2030 y 2050 considerando satisfacer la demanda bajo las restricciones de ENCC respecto a las proporciones de energía eléctrica proveniente de distintas fuentes energéticas empleadas.

- Evolución del SEM al 2050.

La demanda energética modelada fue validada con investigaciones previas de la literatura especializada [6] y los resultados son presentados en las Fig. 1 y Fig. 2.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de aplicar el modelo propuesto para incremento poblacional *CFV* y *LFV* son presentados en el siguiente orden. Inicialmente se presenta la demanda eléctrica nacional para los tres diferentes consumos *per cápita*. Una vez definida la demanda, se determinan el costo total anual (TAC) de la generación de energía eléctrica de cada una de las condiciones de consumo, a la par se presentan el número óptimo de centrales eléctricas que satisficieran la demanda requerida bajo las restricciones mencionadas.

Demanda energética nacional

La demanda eléctrica anual de las tres condiciones de consumo analizadas se presenta en las Fig. 1 y 2. Se observa, para los dos modelos poblacionales, un incremento paulatino además de consumos totales energéticos muy semejantes entre sí para las demandas de 1.9 y 2.0 MWh/*capita*, con muy poca diferencia entre ambos, tal como era esperado. No así el caso cuya demanda eléctrica es de 4.0 MWh/*capita*, donde se corrobora un alto consumo energético, aunque los tres casos siguen una misma tendencia.

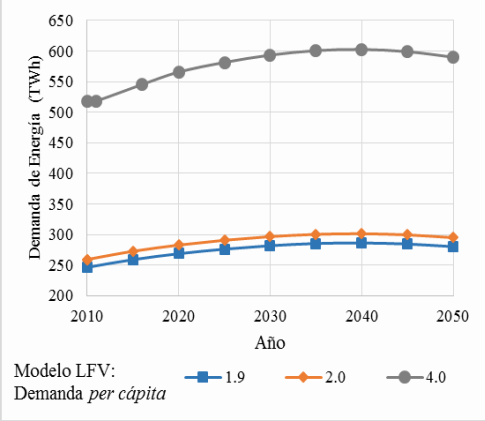


Figura 2. Demanda eléctrica nacional utilizando el modelo *LFV* para tres condiciones de consumo *per cápita*.

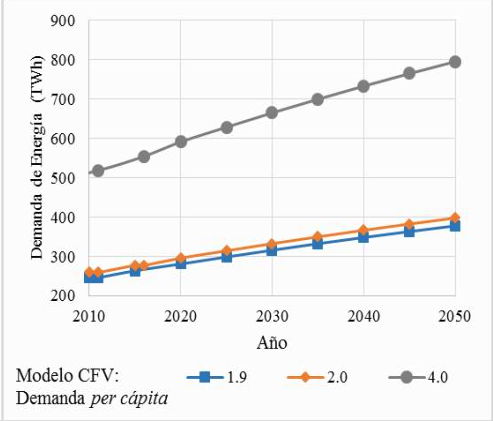


Figura 3. Demanda eléctrica nacional utilizando el modelo *CFV* para tres condiciones de consumo *per cápita*.

Número óptimo de centrales

Al aplicar la metodología presentada utilizando los dos diferentes modelos poblacionales bajo las restricciones de la ENCC, se generan curvas Pareto graficando el comportamiento del TAC con la demanda energética en el periodo de análisis. Las curvas Pareto para el modelo *LFV* para las demandas de 1.9, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita* son presentadas en la Fig. 4.

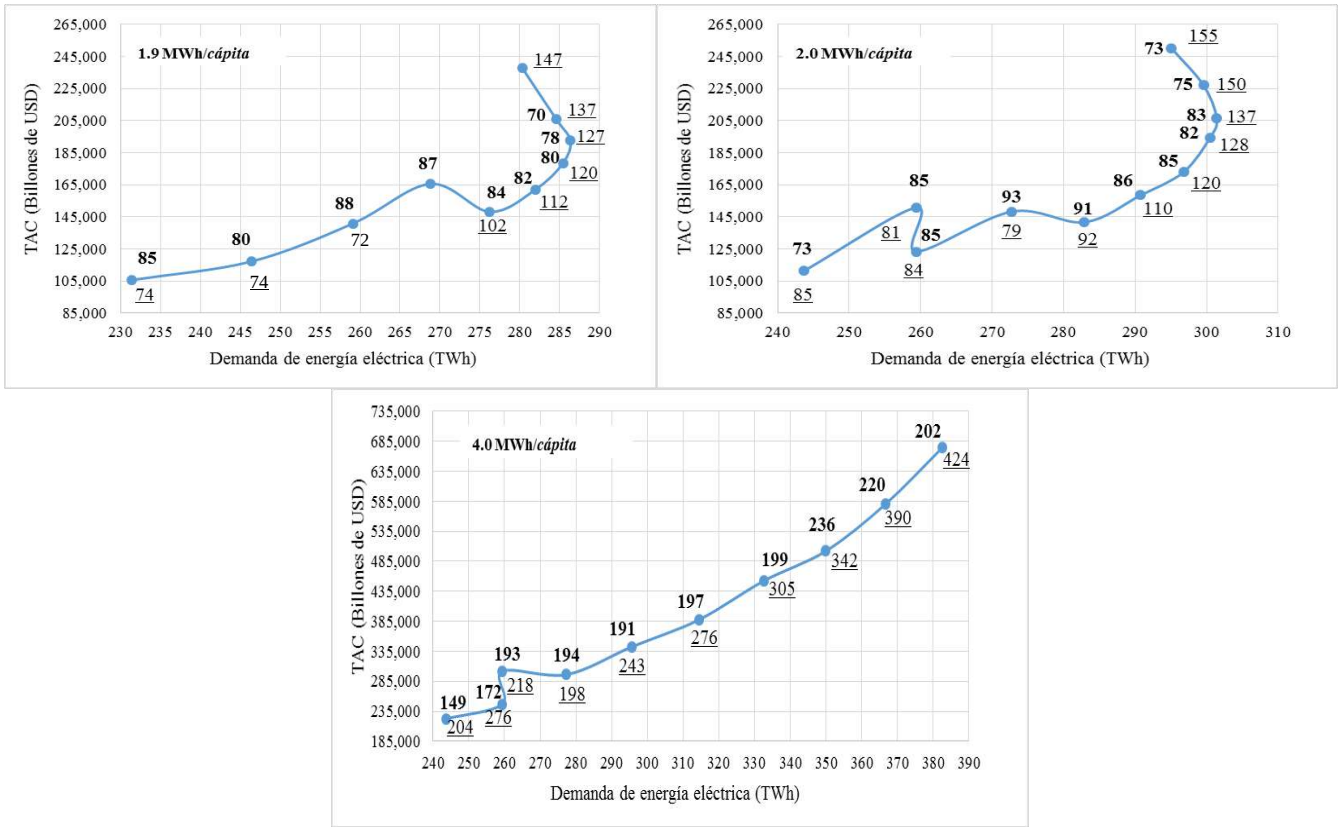
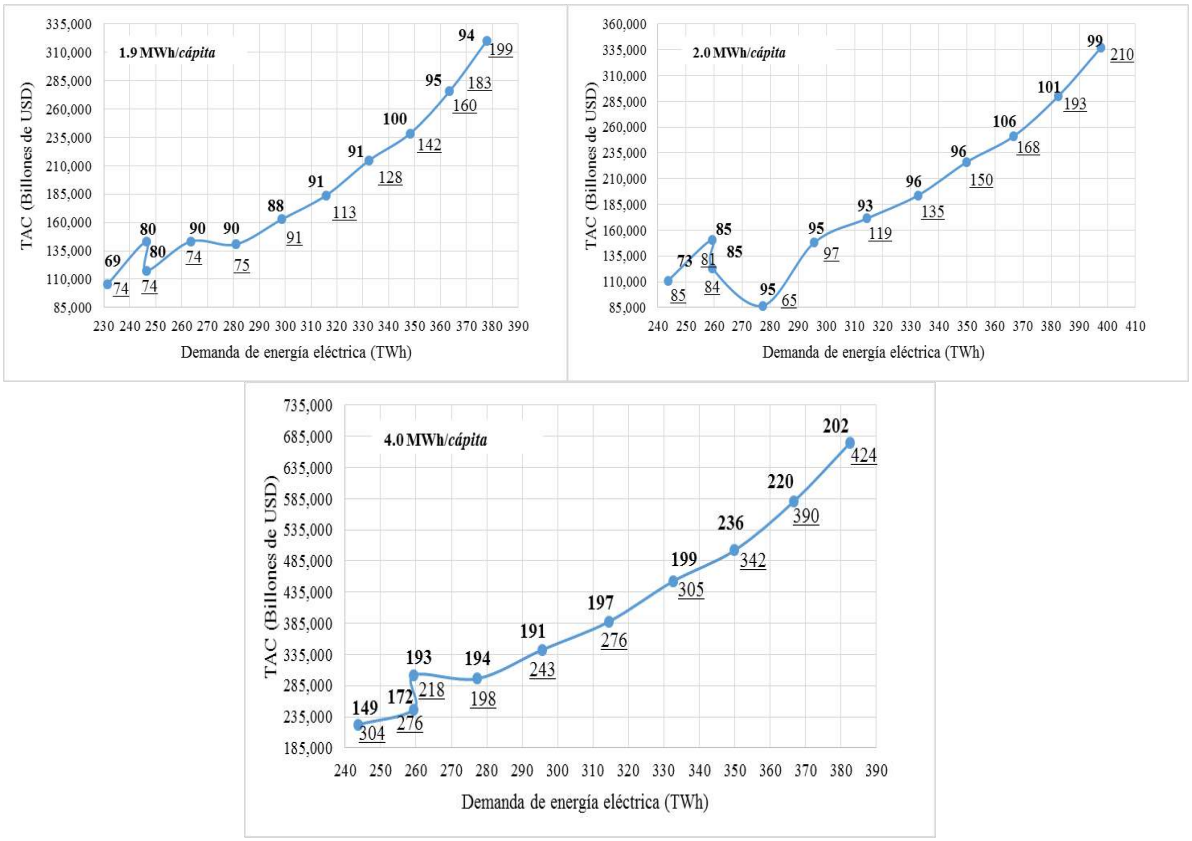


Figura 4. Curvas Pareto para el modelo LFV para tres condiciones de consumo *per-cápita*.

En las gráficas Pareto se presenta el número óptimo de centrales por fuente energética para cada condición de demanda de energía eléctrica. Es posible contar con un número de central diferente al presentado pero éste número será diferente al óptimo. El número óptimo de centrales con fuente fósil se presentan por encima de la curva y en negritas mientras que el número óptimo de centrales cuya fuente energética es limpia se presenta por debajo de la curva y de forma subrayada.

En la Fig. 4 se aprecian las curvas Pareto para las tres condiciones de demanda: 1.9, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita* utilizando el modelo poblacional *LFV* de la ONU. Para la demanda de 1.9 Wh/*cápita* se observa un decremento del número óptimo de centrales fósiles durante el periodo de análisis así como un incremento del número óptimo de centrales limpias para satisfacer la demanda energética nacional, tal como era esperado. El caso de demanda energética de 2.0 MWh /*cápita* presenta un comportamiento peculiar pues aunque el número óptimo de centrales limpias incrementa durante todo el periodo de análisis, el número óptimo de centrales fósiles se incrementa pero retoma el número presentado inicio del periodo de análisis, lo que ocurre de manera semejante para el caso de demanda energética de 4.0 MWh /*cápita*. Una de las posibles razones de este comportamiento es los costos de cada tipo de tecnología así como a la política gubernamental de incrementar el porcentaje de generación de energía eléctrica con gas natural, el cual, a pesar de ser una fuente de combustible de relativamente baja emisión de gases de efecto invernaderos, no deja de ser un combustible fósil.

Las correspondientes curvas Pareto para el modelo *CFV* con demandas energéticas de 1.9, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita* son presentadas en la Fig. 5.



.

Figura 5. Curvas Pareto para el modelo CFV para tres condiciones de consumo *per-cápita*.

En la Fig. 5 se aprecian las curvas Pareto para las tres condiciones de demanda: 1.9, 2.0 y 4.0 MWh/*cápita* utilizando el modelo poblacional *CFV* de la ONU. Para la demanda de 1.9 Wh/*cápita* se observa un decremento del número óptimo de centrales fósiles durante el periodo de análisis así como un incremento del número óptimo de centrales limpias para satisfacer la demanda energética nacional, tal como era esperado. El caso de demanda energética de 2.0 MWh /*cápita* presenta un comportamiento peculiar pues aunque el número óptimo de centrales limpias incrementa durante todo el periodo de análisis, el número óptimo de centrales fósiles se incrementa pero retoma el mismo número presentado inicio del periodo de análisis, lo que ocurre de manera semejante para el caso de demanda energética de 4.0 MWh /*cápita*. Una de las posibles razones por las cuales se presenta este tipo de comportamiento es debido a los costos de cada tipo de tecnología así como a la política gubernamental de incrementar el porcentaje de generación de energía eléctrica empleando gas natural, el cual, a pesar de ser una fuente de combustible de relativamente baja emisión de gases de efecto invernaderos, es un combustible fósil.

Emisiones de gases de efecto inverdadero

En cada periodo analizado, además de obtener el número óptimo de centrales que satisfacen la demanda energética nacional también se determinaron las emisiones de CO_2 y son presentadas en las Figs. 5 y 6 para los modelos poblacionales *LFV* y *CFV*, respectivamente.

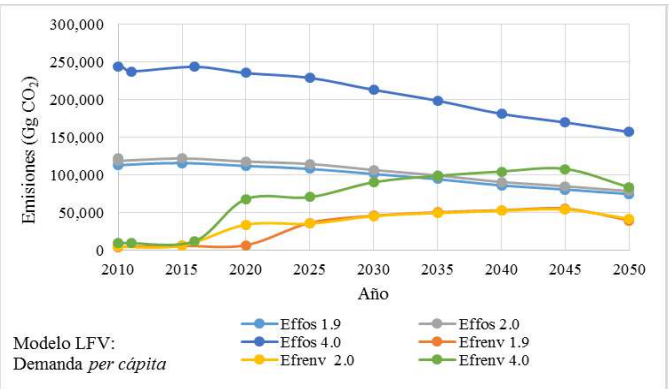


Figura 5. Emisiones de CO_2 para satisfacer la demanda eléctrica nacional utilizando el Modelo poblacional *LFV* de la ONU para tres condiciones de consumo per-cápita.

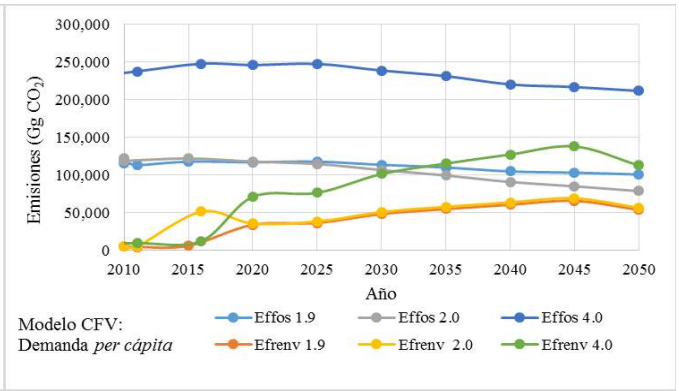


Figura 6. Emisiones de CO_2 para satisfacer la demanda eléctrica nacional utilizando el Modelo *CFV* de la ONU para tres condiciones de consumo per-cápita.

Como se obseva en las Figs. 5 y 6, las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de tecnologías fósiles disminuyen durante todo el periodo de análisis, siendo mayores las emisiones para e caso de demanda energética de 4.0 MWh/*cápita* para los dos modelos *LFV* y *CFV*. Las emisiones debidas al uso de tecnología limpia se incrementan por la presencia de centrales con fuente energética proveniente de materia de origen natural pues auque las emisiones son bajas, existe una contribución importante debido al número de centrales ya que además de considerar las emisiones por su uso, también se consideran las emisiones ocasionadas por la construcción de cada tipo de tecnología.

CONCLUSIONES

El modelo propuesto aplicado a cada escenario y periodo analizado bajo las restricciones impuestas por la Ley General de Cambio Climático muestra la posibilidad de satisfacer la demanda energética anual usando un número óptimo de centrales cuya fuente energética es fósil y un número óptimo de centrales cuya fuente energética es limpia, minimiza además el uso de combustibles fósiles aplicando la restricción de la LGCC en cada periodo de análisis. Estos resultados permiten presentar alternativas de crecimiento del sector eléctrico mexicano satisfaciendo la demanda de energía eléctrica nacional con baja de emisiones de CO_2. Es importante resaltar que aunque los resultados obtenidos con este sencillo modelo, son satisfactorios, todavía cuenta con áreas de oportunidad a incorporar en un futuro cercano como análisis del uso de agua de cada tecnología, sitios óptimos de ubicación de centrales propuestas, así como otros impactos sociales sólo por mencionar algunas.

AGRADECIMIENTOS

Gabriela Hernández-Luna agradece su apoyo a PRODEP por la asignación de la beca posdoctoral en la UAEM y a la Red Temática en sustentabilidad energética, medioambiente y sociedad (Red SUMAS), proyecto CONACyT 271624 por el apoyo de esta investigación.

REFERENCIAS

1. ENCC. “Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40”. Gobierno de la República. 2013. pp. 44.
2. LGCC. “Ley General de Cambio Climático”. Diario Oficial de la Federación. Junio 2012. pp. 42 http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6583/1/ley_general_de_cambio_climatico.pdf
3. WWP. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. “World Population Prospects: The 2012 Revision.” Published: http://esa.un.org/unpd/wpp/index.html. 2012.
4. CFE. “COPAR-2012: Generación. Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico mexicano. Mayo 2012.
5. Cabal H. and Lechón and Y., Rodríguez A. and Castrejón D. and Flores M. P. “Effect of the energy and climate polices in the future mexican electricity”, *International Energy Workshop*, 2015.
6. Carbon Dioxide Emissions Coefficients. Febrero-2016. https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.cfm.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN PLANOS VERTICALES CON DIFERENTES DIRECCIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Mauro Valdés Barrón
Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, C. U., Delegación Coyoacán., Ciudad, Ciudad de México, 04150, México,
(55) 56 22 41 39, **mauro@geofisica.unam.mx.**

Liliana Y. Maldonado Sánchez
Unidad de Posgrado Arquitectura, campo Tecnología., Universidad Nacional Autónoma de México , Av. Universidad N° 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Delegación Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México,
045 97 11 27 42 91, **lyms.maldonado@gmail.com.**

RESUMEN

Existe una preocupación sobre el rápido crecimiento de la infraestructura de edificios y su impacto en el medio ambiente. La irradiación solar en planos verticales juega un papel importante en la determinación del rendimiento energético y térmico de un edificio. Se vuelve importante para el diseño y análisis de sistemas activos y pasivos.

Este artículo presenta los resultados preliminares de la Irradiación global horizontal (G_h) y verticales Norte (G_{vn}), Sur (G_{vs}), y Oeste (G_{vo}) medidas en el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM en sus instalaciones de Ciudad Universitaria (19° 20' 01" latitud Norte y 99° 11' 54" longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm) cuyos datos han sido recopilados y analizados. Los datos de un año continuo de mediciones (2014) han sido integrados por día y mes.

El promedio de radiación solar global mensual vertical sur, vertical oeste, vertical norte y horizontal es de 8.10, 5.73, 2.68, y 18.07 MJ / m2, respectivamente. La superficie vertical Sur recibe más radiación que el resto de las superficies verticales, prácticamente la mitad de radiación respecto a la horizontal (44.82%), mientras que la Oeste recibe una tercera parte (31.71%) y el Norte una séptima (14.83%).

ABSTRACT

There is a growing concern about the rapid development of infraestructure buildings and its impacts on the enviroments. Solar Irradiation, particulary on vertical surfaces, plays a major role in determinating the termal and energy performance of a building. It becomes important to the design and the analysis of active and passive systems solar architecture.

This paper presents the preliminaries results of measuring Global Solar Irradiation in Horizontal (G_h) and vertical surfaces North (G_{vn}), South (G_{vs}) and West (G_{vo}) at Solar Radiation Observatory (ORS). It belongs to the Geophysics Institute, located at the Central University City Campus of National Autonomous University of Mexico (19 ° 20 '01 "N, 99 ° 11' 54" W, at an altitude of 2268 m), whose data have been compiled and analyzed. A complete year data measurements (2014) were averaged by day and month.

The monthly average global solar radiation on vertical south, east, north and the horizontal was 8.10, 5.73, 2.68, y 18.07 MJ / m2, respectively. The total insolation incident on vertical south Surface is larger than the other verticals.. Practically, the south receive the half radiation from the horizontal (44.82%), while the West receive a third part (31.71%) and the north a seventh (14.83%).

Palabras claves: Irradiación Solar Global, Superficies Verticales, Luz Natural, Ahorro de energía, Edificios Sostenibles, Carga Energética, Caracterización Energética.

INTRODUCCIÓN

El diseño arquitectónico incorrecto de edificios ha aumentado la demanda de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado debido a las ganancias térmicas mayores provocadas por la radiación solar.

Como consecuencia de la ausencia de adecuados datos de radiación vertical, los arquitectos tienen que depender de herramientas y modelos predictivos, cuyo objetivo de exactitud todavía está en proceso, reportándose hasta 30% de sobreestimación de aire acondicionado en edificios.[1] Considerando que los arquitectos trabajan con envolventes y gran parte de estos son fachadas (planos verticales), se vuelve importante la medición del recurso solar para un mejor aprovechamiento de estos. Más aún cuando la demanda de espacios de gran altura sigue en aumento.

México se encuentra entre los países más soleados del mundo, en casi el 40% de su extensión territorial (2 millones de kilómetros cuadrados aprox.), se reciben 21 MJ/m2 día.[2]

La medición de Irradiación Solar global en planos horizontales se realiza en varios sitios de nuestro país. Sin embargo, no existe una estación para medir la radiación solar global en superficies verticales con orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste.

La irradiación solar está ligada al concepto de luz natural, diseñar la utilización correcta de la luz natural, puede producir un ahorro significativo. Investigaciones previas muestran que un ahorro del 20 a 40% es alcanzable para los edificios de oficinas que utilizan la luz natural eficientemente.[3]

Los beneficios asociados con el estudio de la radiación solar y la luz natural son varios. Conociendo la carga térmica y distribución temporal de ésta, podremos saber con mayor precisión cuál será el desempeño de determinado material o tecnología aplicada a estructuras antes de su edificación., además de mayor exactitud en cálculos térmicos realizados mediante software y modelos predictivos de radiación solar y cálculos de luz natural.

Este estudio presenta las mediciones y análisis de un año completo (2014) de la Irradiación Solar Global horizontal y de las superficies verticales en cada uno de los puntos cardinales.

Estación de Medición

Los registros fueron obtenidos de las mediciones realizadas en el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM en sus instalaciones de Ciudad Universitaria (19° 20' 01" latitud Norte y 99° 11' 54" longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm). Dichas instalaciones se encuentran en un área despejada, libre de sombras de edificios o vegetación adyacente que pudiera afectar las mediciones.

Se realizan mediciones verticales a 90° en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste con piranómetros debidamente referenciados a la Escala Radiométrica Mundial. La radiación solar se midió con piranómetros Kipp & Zonen modelo CM11 para las mediciones verticales y CMP21 para las horizontales. El sistema de adquisición Campbell instalado calcula y almacena lo datos minuto a minuto.

Los datos almacenados en milivolts (mV) se convierten en W/m2 y estos a su vez en MJ/m2.

Los datos obtenidos minuto a minuto se filtran y se muestran en formato horario, después en valores diarios y se calculan promedios mensuales y por día juliano. Para conocer la distribución del fenómeno se obtienen mapas de energía (conocidos gráficamente como mapas de calor) para cada mes del año[4].

Resultados Preliminares. La Fig.1 Muestra el total de radiación global en la superficie horizontal (G_h). La radiación máxima se presentó en el mes de Abril. El valor del día promedio para este mes fue de 22.04 MJ/m2.

Fig. 1. Promedio Mensual Diario de Irradiación Solar Global (G_h) en la Ciudad de México.

[1] Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis, H., & Muneer, T. (2004). Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site). Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.

[2] Galindo I. y Cifuentes G., (1996). "Irradiación Solar Global en la Republica Mexicana" Valores Horarios Medios. Instituto de Geofísica. (UNAM). Programa Universitario de Energía.

[3] Muneer,T. (1997).Solar Radiation and Daylight Model., Architectural Press,Great Britain.

[4] Anexo adjunto a este documento.

La tabla 1 muestra el promedio diario y mensual de la Irradiación Solar Global incidente en las superficies horizontal y vertical (Norte, Sur, Oeste) que han sido graficadas y presentadas en el documento.

Tabla 1. El promedio diario mensual de la Irradiación Global en superficie horizontal (G_h) así como el de las superficies verticales Sur (G_{vs}), Oeste (G_{vo}) y Norte (G_{vn}) presentadas en MJ/m2.

Año	***Mes***	G_{vs}	G_{vo}	G_{vn}	G_h
2014	1	14.23	6.29	1.73	16.16
2014	2	14.18	7.40	1.77	20.38
2014	3	8.00	6.61	2.15	20.58
2014	4	4.97	5.77	2.86	22.04
2014	5	3.52	5.07	3.86	18.80
2014	6	3.55	5.06	4.24	17.48
2014	7	3.18	4.60	3.66	18.91
2014	8	4.24	5.32	3.32	19.91
2014	9	5.82	4.91	2.84	16.04
2014	10	8.73	5.50	2.22	15.77
2014	11	13.18	6.15	1.86	16.15
2014	12	13.55	6.08	1.70	14.65
	Promedio	8.10	5.73	2.68	18.07

Fig. 2. Muestra los resultados de la radiación medida en la superficie vertical Norte (G_{vn}), el valor mínimo de día promedio fue 1.70 MJ/m2 en Diciembre y el máximo de 4.24 en Junio. El menor número de horas de luz en invierno, menor intensidad de radiación y bajos valores de declinación solar concuerdan con los resultados obtenidos en el mes de diciembre., aumentando considerablemente en temporada de verano el mes de junio.

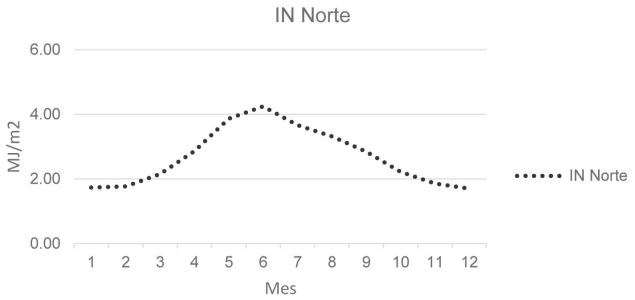


Fig. 2. Promedio Mensual Diario de Irradiación Solar Global (G_{vn}) en la Ciudad de México.

Fig. 3. Se grafica la Irradiación global para la superficie Oeste (G_{vo}). El valor mínimo registrado para el día promedio fue 4.60 MJ/m2 en Julio y el mayor tuvo un registro de 7.40 MJ/m2 en Febrero.

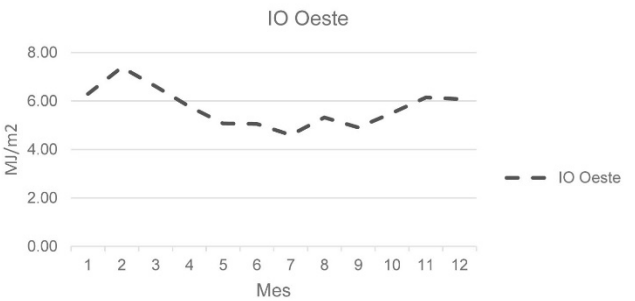


Fig. 3. Promedio Mensual Diario de Irradiación Solar Global (G_{vo}) en la Ciudad de México.

Fig. 4. Se presenta el total de Irradiación en la superficie vertical sur (G_{vs}). Presenta un comportamiento normal, durante el solsticio de invierno el sol se encuentra inclinado hacia la fachada sur con una altitud menor aumentando la radiación sobre esta. La máxima radiación fue en temporada de invierno con 14.23 MJ/m2 (enero), mientras que la menor insolación fue en temporada de verano 3.18 MJ/m2 (Julio) cuando la altitud del sol es alta., aunque se siguen registrando valores altos durante este mes.

La radiación media mensual en esta superficie fue 8.10 MJ/m2 , siendo más grande que el Oeste (5.73 MJ/m2) y Norte (2.68 MJ/m2) pero definitivamente no superior a la superficie horizontal (18.07 MJ/m2). Esto se refleja en la fig. 5.

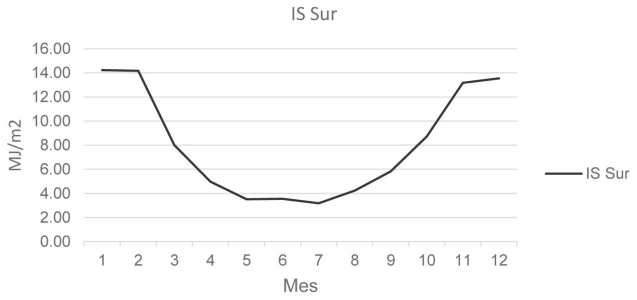


Fig. 4. Promedio Mensual Diario de Irradiación Solar Global (G_{vs}) en la Ciudad de México.

Fig. 5. Se muestran la cantidad de radiación entre verano e invierno en los equinoccios, la superficie vertical Sur recibe prácticamente la mitad de radiación respecto a la horizontal (44.82%), la Oeste una tercera parte (31.71%) y el Norte una séptima (14.83%).

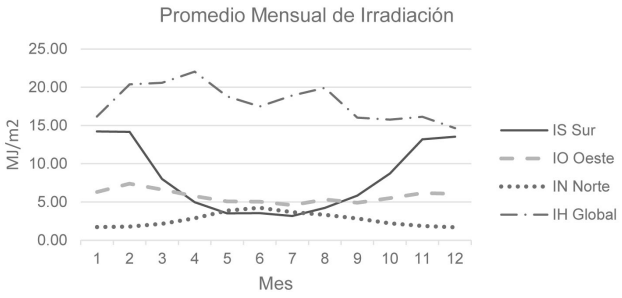
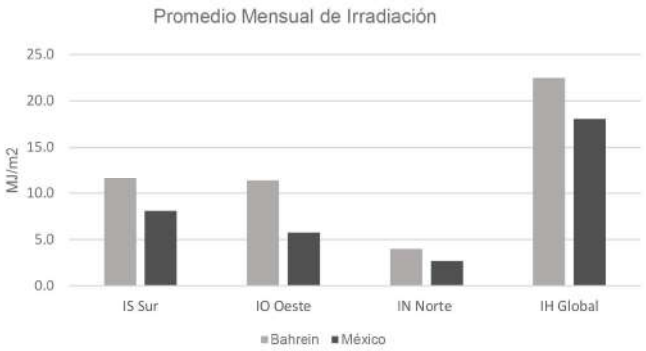


Fig. 5. Promedio Mensual Diario de Irradiación Solar Global $G_{h,}$, G_{vn} G_{vs}, G_{vo} en la Ciudad de México.

Conclusión. Los datos obtenidos en las superficies horizontal y vertical, muestran patrones normales. Siendo la primera medición real de Irradiación Global en superficies verticales en nuestro país, se sigue la verificación utilizada por Muneer, Alnaser y Fairooz[5] : Se comparan los valores obtenidos de un país con latitud similar a la de Cd. de México (en este caso el Reino de Bahrein), tomando en cuenta las diferencias de ubicación y condiciones del cielo para respaldar las mediciones presentadas.



[5] Muneer T, Alnaser W, Fairooz F.(2007).The insolation on vertical surface having different directions in the Kingdom of Bahrain. Desalination. 209, (1-3) 269–274.

Fig. 6. Comparativa de Promedios Mensuales Diarios de Irradiación Solar Global $G_{h,}$ G_{vn} G_{vs}, G_{vo} de la Ciudad de México y el Reino de Bahrein.

Los datos se usarán para modelar la Irradiación en envolventes arquitectónicas., es una herramienta que ayuda a arquitectos e ingenieros a contribuir en la creación de edificios amigables con bajos costos de energía en su mantenimiento, volviendo con el conocimiento del entorno climático a elementos fundamentales del diseño.

REFERENCIAS

Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis, H., & Muneer, T. (2004). Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site). Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.

Galindo I. y Cifuentes G., (1996). "Irradiación Solar Global en la Republica Mexicana" Valores Horarios Medios. Instituto de Geofísica. (UNAM). Programa Universitario de Energía.

Muneer,T. (1997).Solar Radiation and Daylight Model., Architectural Press,Great Britain.

Muneer T, Alnaser W, Fairooz F.(2007).The insolation on vertical surface having different directions in the Kingdom of Bahrain. Desalination. 209, (1-3) 269–274.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2013.

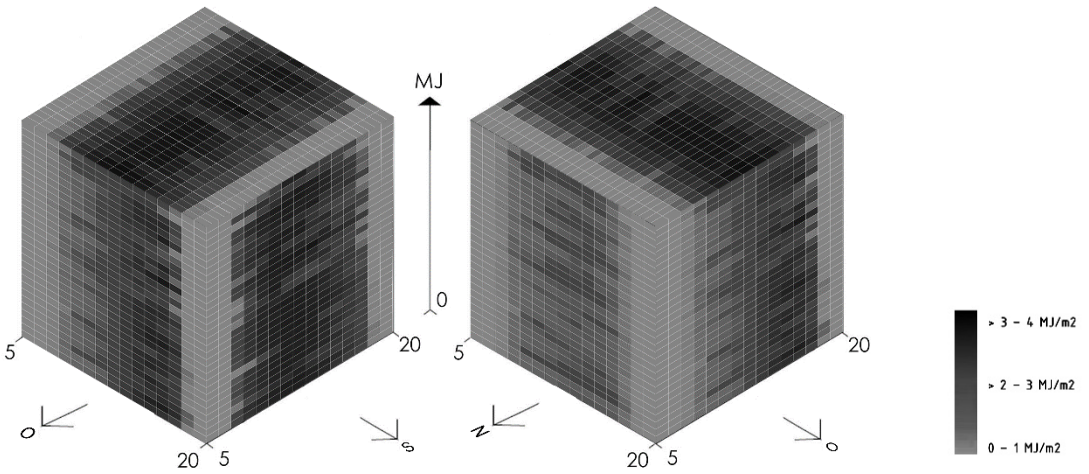
V., Chester., L., Thomas., R. Michael.(1981) Proceedings of the International Energy Agency Conference on Pyranometer Measurements: Final Report : 16-20 March 1981, Boulder, Colorado. Solar Energy Research Institute.

Kong, H. J., & Kim, J. T. (2015). Evaluation of global vertical illuminance and irradiance models against data from Yongin, South Korea. Energy & Buildings, 91139-147. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.02

ANEXO I

Figura cúbica

La siguiente figura es una forma de representación más sencilla de interpretación del fenómeno medido. Se muestran los mapas de calor en las diferentes orientaciones tanto vertical como horizontal en el mes de Enero, el cual recibió mayor cantidad de energía en la superficie vertical sur.



XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

EL AHORRO POTENCIAL DE ENERGÍA EN LOS HOGARES URBANOS Y RURALES DE MÉXICO, MEDIANTE EL USO DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA, UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Jorge Alberto Rosas-Flores José Luis Fernández Zayas [a]
Instituto Nacional de electricidad y Energías Limplias (INEEL) Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.
Tel: +52 (777) 362 3811 EXT 7536. Correo electrónico: jorge.rosas@iie.org.mx
DionicioRosas-Flores
Posgrado de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, DF, Mexico d Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, DF, Departamento o División,

RESUMEN

En este milenio, la energía renovable cubrirá mucha de la demanda de energía alrededor del mundo, principalmente por el incremento del precio en el petróleo. La ubicación geográfica de México permite que éste sea un país privilegiado para las cantidades diarias de posible recolección de energía solar.
En este trabajo se presenta un análisis de ahorro de energía mediante la aplicación de calentadores solares de agua (CSA) en los hogares urbanos y rurales de México, utilizando un sistema de información geográfica (SIG); también se presentan los mapas de radiación solar promedio, el consumo y ahorro de energía. Información correspondiente a 187,719 y 4,525 lugares urbanos y rurales, respectivamente; datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI)
Entre los principales resultados se muestra que cada año México podría ahorrar 53.66 PJ que corresponde al 51% del consumo anual de GLP en los hogares para calentar el agua, lo que representaría evitar la emisión de 3.74 Tg CO2 al medio ambiente.

ABSTRACT

In this millennium, the renewable energy will cover much of the demand of the world-wide energy, mainly by the increase in the price of oil. Mexico's geographic location gives it a privileged state for the daily amounts of possible solar harvesting of energy.

This paper presents an analysis of energy savings by implementing solar water heaters (SWH) in urban and rural households in Mexico using a geographical information system (GIS); the maps of average solar radiation, energy consumption and energy savings are presented. Information of assigned to 187,719 and 4,525 locations urban and rural respectively; official data from the National Institute of Statistics and Geography of Mexico (INEGI) is used and among the main results, they show that each year Mexico could save 53.66 PJ which is 51% of annual consumption of households use of LPG for heating water, which would represent to avoid the emission of 3.74 Tg CO2 to the environment.

Palabras claves: energía, renovable, calentadores solares, México, GIS

INTRODUCCIÓN

La necesidad de utilizar fuentes de energía renovable es cada vez más importante; con el fin de disminuir el uso de fuentes de combustibles fósiles, así como las consecuencias para el medio ambiente de la minería y la quema de ellos.
En México, 80% de los hogares utilizan gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural, como combustible principal para cocinar y calentar agua.[1]
Esta alta dependencia de los hidrocarburos puede ser revertida con el uso de energías renovables, como la energía solar.
El más grande y fácil uso de la energía solar es la directa conversión de la luz solar en calor a baja temperatura.
La tecnología de calentamiento solar de agua no es nuevo en México, todo lo contrario: se trata de una tecnología madura, después de más de treinta años de desarrollo de la tecnología industrial, durante la cual los diseñadores y fabricantes mexicanos han acumulado una valiosa experiencia.
En cincuenta años de presencia comercial, un millón de metros cuadrado de calentadores solares de agua a través del país han sido instalados, incluyendo el trabajo de muchos pequeños constructores. A pesar de que los resultados documentados datan sólo de 9 años atrás, y sólo reflejan una porción de la superficie total construida (Fig. 1).

[1] Instituto Nacional de Estadistica y Geografía . Censo de población y vivienda 1990–2010. http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpvsh/Series_historicas.aspx

Hay principalmente cuatro tipos de colectores en México: tubo colector evacuado, tubo colector evacuado con tubos calóricos, tubo colector plano y tubo el colector de plástico. El mercado de los tubos colectores planos representó el 36% en 2009, ocupando la posición dominante en el mercado de calentadores solares de agua de México; el colector de plástico representó el 33%, el colector de tubos evacuados 30% y el tubo colector evacuado con tubos calóricos sólo el 2.3%. 67% de la tecnología de calentadores solares de agua utilizado en México es importado y el restante 33% proviene de la fabricación nacional[1]

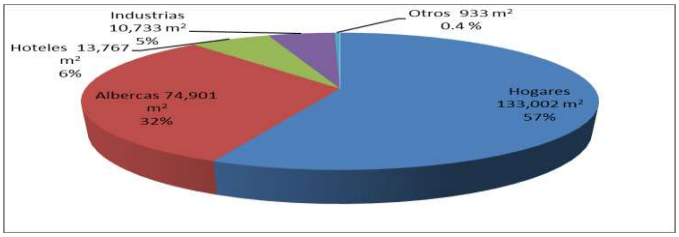


Figura 1. Área de calentadores solares de agua instalados en México por sector en 2009

Se estima que cada metro cuadrado de calentador solar de agua convierte alrededor de 7 kWh cada día, por lo que no contribuye ampliamente a los 116 kWh en México que se utilizan a diario en su totalidad[2]
La experiencia mundial demuestra que en Alemania[2] sólo en 1998, se instalaron 470,000 m2 de calentadores solares de agua[3], mientras en México hasta el año 2000, un total de 373,000 m2 habían sido instalados. Otro ejemplo es Israel. Debido a la falta de combustible a inicios de la década de los años 1950, el gobierno determinó restricciones en el uso de los calentadores de agua convencionales, las cuales eran básicamente, para asignar horario limitado de uso[4].

Como alternativa, gran parte de la población israelí, adquirido calentadores solares de agua. Antes de 1983, el 60% de la población tenía éstos sistemas, para el año 2009, el CSA alcanzaron el 90% del total de hogares.
Esto sugiere que México no está utilizando correctamente la energía solar y es importante determinar por qué ha sido así hasta hoy, así como determinar el uso potencial y aprender de las experiencias en otros países con similar oportunidades de desarrollo.

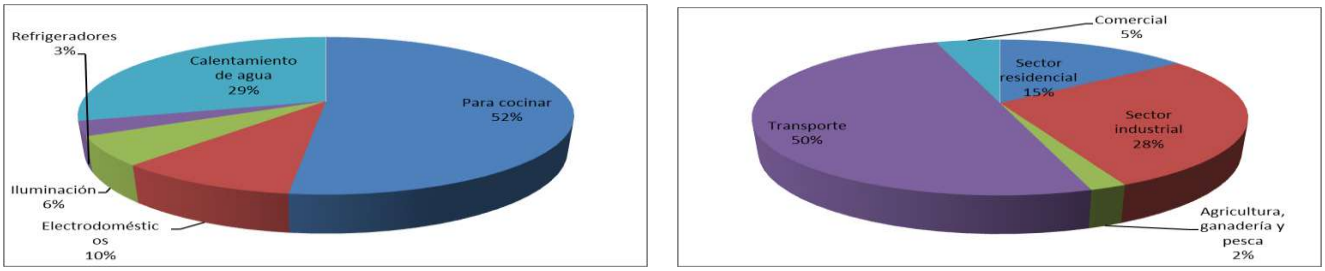
El consumo comercial de calor a baja temperatura en el mundo se estima en 10 EJ por año para calentar el agua, lo que equivale a 6,000 millones de m2 de superficie de captación [5]. En 2001, había casi 58 millones de m^2 de superficie de captación solar térmica en torno a la operación de los países miembros de la Agencia Internacional de Energía (AIE) que es sólo el 2.5% de su potencial global[6].
Hay muchos estudios en literatura que se concentran en la operación de calentamiento de agua por energía solar [7] [8], simulación de calentamiento solar de agua con los sistemas de termosifón[9] [10] [11], la operación térmica de termosifón de dos fases CSA[12], la configuración de Sistema de calefacción Solar del Agua [13] [14]. Hay algunos estudios que tratan de valores de la radiación solar obtenida en diversas áreas geográficas [15] [16]. Simulación, modelo numérico y análisis para predecir la operación térmica del sistema solar [17] [18] [19]. Un estudio actual demuestra el problema de evaluar el funcionamiento a largo plazo de los sistemas de energía solar térmica (sistemas de enfriamiento solar y cogeneración de energía solar), y otro artículo demuestra cuantitativamente el posible efecto de la difusión de luz celestial en la mejora de la energía ganada en colectores térmicos solares.

Como se ha visto anteriormente, pocos estudios se han centrado en la obtención económica y los beneficios ambientales a través de la utilización de políticas de mercado en el uso de CSA, la cual es la idea principal desarrollada en este documento.
El objetivo es mostrar las acciones que se pueden realizar en México, a transformar la enorme oportunidad que representa el valor de calentamiento solar de agua y la riqueza nacional.

El consumo residencial de energía

El consumo final de energía en México en el 2008 ascendió a 4.814 PJ, de los cuales el 50% corresponde al sector del transporte, el sector industrial representó el 28% y el sector residencial, sector gubernamental y comercial consumen el 20% del total. Esta información se muestra en la fig. 2. Así que el sector residencial representa 15% del consumo total de energía en México, dentro de este, 19% es el consumo de electricidad para la iluminación, aire acondicionado y accesorios. El uso de la energía restante se atribuye a cocinar 52% y 29% para el calentamiento de agua.

[2] Wagner & Co, tecnología solar . http://www.wagner-solartechnik.com/wag nerEN/index.php?navid¼207&ref¼/wagnerEN/SW/index.php.



a. b.

Figura 2 .(a) Desglose del uso de la energía residencial. (b) el consumo de energía en México.

El calentamiento de agua residencial representa el 6% del total nacional de consumo de energía,[20] para el año 2008 fue equivalente al 10.2 GJ/hogar para calentar el agua. El gas licuado de petróleo (GLP) en hogares mexicanos se utiliza casi exclusivamente para cocinar y calentar agua. La saturación[3] de calentadores de gas ha crecido del 24% en 1984 a 46% en 2008. Los calentadores de gas están disponibles en dos diseños básicos: Calentadores de almacenamiento y de paso, estos segundos son más comunes en pequeños apartamentos. Los calentadores de agua eléctricos son raramente utilizados en México. El gas natural también se utiliza muy poco en los hogares. El gas licuado de petróleo (GLP) es el combustible más utilizado y almacenado de dos maneras: en los cilindros 10, 20 y 30 kg, además de los tanques estacionarios en los edificios. Así, el consumo de energía para calentamiento de agua ha crecido en un 6% entre 1984 y 2006. En las áreas de zonas rurales, la leña es el principal combustible para calentar el agua.

Actualmente el uso de gas ha aumentado en las zonas urbanas, por ejemplo, 3.8 millones de los calentadores de agua se vendieron entre 1996 y de 2006, en el sector urbano, la saturación de los calentadores de gas creció de 0.29 por hogar en 1984 a 0.44 en el 2006. Además, las estufas se utilizan comúnmente para calentar el agua para el baño y en ocasiones para servicios como lavandería o lavavajillas.

Ahorro de energía mediante la implementación de csa del país.

La metodología utilizada en este trabajo se basa en el uso final de obras anteriores [8] [9] esta metodología se centra en la puesta en práctica de calentadores solares de agua en los nuevos hogares a nivel nacional.
Los usos finales en los hogares en México son identificados y clasificados sobre la base del sector de aplicación (cocina, calefacción de agua, electrodomésticos e iluminación); los usos finales son sub-clasificado en base de diferentes factores que afectan el tamaño y la economía de calentadores solares de agua. En el sector residencial, los factores que se utilizan para la clasificación son:
el tamaño del hogar, ya sean casas de dos plantas individuales o edificios multifamiliares, la disponibilidad del área del techo, los ingresos anuales de la familia, ocupación de los miembros del hogar, etc. La técnica, económica y el potencial de mercado se calculan para cada clase de uso final
El potencial de diferente uso final es agregado y extrapolado para obtener el potencial de los calentadores solares de agua para los hogares en México. Dos enfoques se hicieron y se complementan, la primera con la metodología de top-down o botton-up y la segunda en el gasto monetario de energía para determinar el consumo para el calentamiento de agua en el sector residencial. De acuerdo con las características y necesidades de la familia, que estiman el total de la demanda de energía térmica para el calentamiento de agua en viviendas (Ers).

$$E_{rs} = \sum_i \left[N_p \, N_d \, V_w \, \rho \, C_p \, (T_w - T_m) \right] k_i \qquad (1)$$

Donde Ers es el consumo de energía para calentar el agua, Np= número de personas por hogar, Nd= número de días por mes, Vw =consumo promedio diario de agua caliente por persona (40 l), ρ= densidad de agua, Cp= el calor especifico, Tw= temperatura de agua caliente requerida (50 ° C)[4] y Tm= la red de distribución de agua promedio, ki es el número de hogares por categoría i.

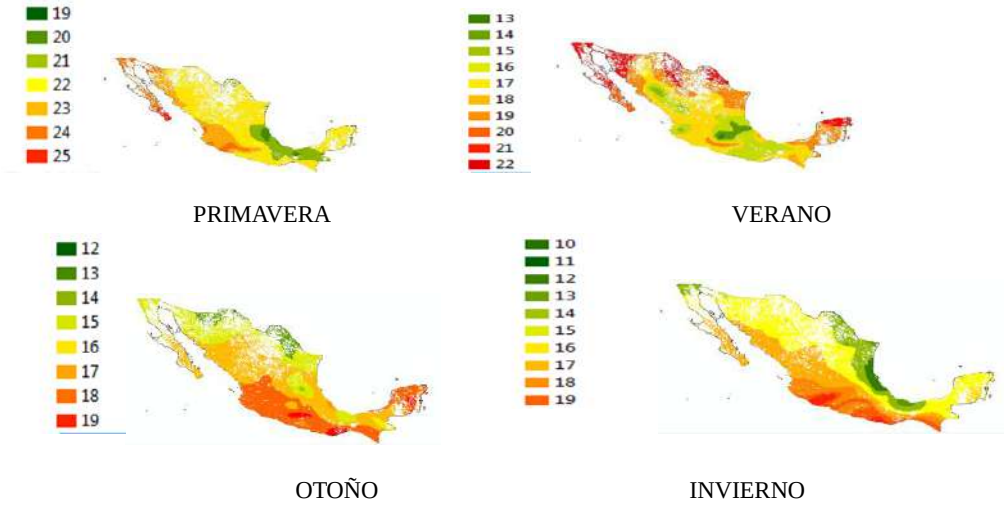
La radiación solar por área usando SIG.

Los mapas de radiación solar global promedio asignados a 187,719 y 4,525 localidades rurales y urbanas, respectivamente, son presentados; la información se consultó en la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO (siglas en español), donde se utilizó ARGIS 10 para realizar un análisis geoestadístico con el fin asignar a cada población el valor de la radiación resultante de cada temporada (Primavera, verano, otoño, invierno) (Fig. 3).

[3] Para los propósitos de este ensayo, saturación significa el número de aparatos eléctricos por hogar..

[4] Para este documento se utiliza una temperatura de salida de 50°C con base en los estandares de calentadores solares, ciudad de México NADF-008-AMT-2005 http://www.modulosolar.com. me/Certificados/NADF-008-AMBT-2005.pdf, y el nivel de eficiencia de calentadores de GAS LP .http://www.energia.gob.mx/res/Acerca_de/nom003ener2011.pdf con estos valores tendremos la cantidad de energía ahorrada (%) por calentadores solares en todas las localidades de México por estación.

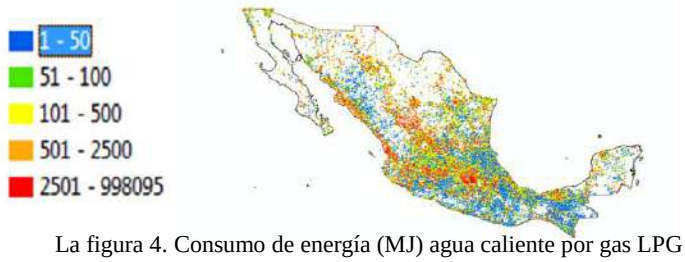
Los valores más altos de radiación se producen en primavera y verano en el norte, noroeste y la península de Yucatán en México. Donde los valores promedio son de entre 22 y 25 MJ / m2/día que es un factor clave para la utilización de calentadores solares de agua para ahorrar energía evitando LPG quema.



Nota: Elaboración propia con los datos de la CONABIO, dibujados en ArcGIS 10.
Figura 3. La radiación global promedio por localidad (MJ / m2 / día)

Resultados

En 2010, de acuerdo a la información del Censo Nacional de Población y la Encuesta de ingresos y gastos de los hogares en México se aprecia que eran más de 21 millones de hogares, 4.5 millones rurales y 16.6 millones en las zonas urbanas.
Por otra parte el 42% de los hogares rurales utilizan gas LP que representa 1.9 millones de hogares, además de 92% de los hogares urbanos utilizan gas LP, que representa 16.3 millones de hogares.
De acuerdo con los cálculos anteriores [21] en 2010, el sector residencial consumió 10 millones de litros de GLP, que 3.8 millones de litros de GLP se asignaron a calentar el agua, esto representa un per cápita consumo de 0.1412 litros de GLP/día para el agua caliente sanitaria (véase fig.4).
Usando las ecuaciones. (1) y (2) con los datos de radiación solar por temporada se puede conseguir el ahorro de energía por hogar en áreas urbanas y rurales en las diferentes estaciones como se muestra a continuación.



La figura 4. Consumo de energía (MJ) agua caliente por gas LPG por localidad

Primavera

En la Fig. 5 se puede observar que el rango de ahorro de energía es entre el 56 y el 73%; siendo la región de Baja California donde se consigue un mayor ahorro, en los hogares rurales fue de 1.82 PJ, mientras que los hogares urbanos se ahorró 14.61, para el uso de calentadores solares de agua durante esta temporada.

La Figura 5 (%) ahorro de energía para el uso de CSA durante la primavera

Verano

En verano, la gama de ahorro de energía varía de un 38 a un 64% de su consumo para calentar el agua, con la parte norte de México que tiene un mayor ahorro; en los hogares rurales fue de 1.41 PJ y en los hogares urbanos 11.62 PJ, para el uso de CSA (Fig. 6).

La Figura 6 (%) ahorro de energía para el uso de CSA durante el verano

Otoño

En el otoño la gama de ahorro de energía varía desde 32 hasta 56% de su consumo para calentar el agua, con la parte sur de México que tiene un mayor ahorro; el ahorro de energía en los hogares rurales fue 1.4 PJ, mientras que en los hogares urbanos 11.1 PJ debido a la utilización de la energía solar para calentamiento de agua (Fig. 7).

…

La Figura 7 (%) ahorro de energía para el uso de CSA durante el otoño

Invierno

En invierno, el ahorro de energía es entre el 29 y el 56% del consumo para calentamiento de agua, con el área del Golfo de México, que tiene mayores ahorros potenciales; el ahorro en los hogares rurales fue de 1.3 PJ y en los hogares urbanos 10.4 PJ para el uso de CSA (Fig. 8).

En 2010 con la información del BNE, el sector residencial consumió 292.52 PJ de GLP y estimada en [21] 104.72 PJ que son utilizados para calentar el agua, y en virtud de estos resultados, el sector residencial urbano podría ahorrar 47.73 PJ y el sector residencial rural podría ahorrar 5.93 PJ, que en total representa 53.66 PJ que es el 51% del GLP el consumo para calentar el agua utilizada anualmente en México.

La Figura 8 (%) ahorro de energía para el uso de CSA

CONCLUSIONES

En este trabajo se demuestra la importancia de calentamiento de agua en el uso final de la energía en México y muestra que el calentamiento de agua por energía solar puede conducir a beneficios económicos, sociales y ambientales para el país.

Entre los principales resultados obtenidos en el sector residencial urbano podría ahorrar 47.73 PJ y el sector residencial rural podría ahorrar 5.93 PJ, que en total representa 53.66 PJ y un 51% del consumo de GLP para calentar el agua utilizada anualmente en México.

Los esfuerzos de México para combatir el cambio climático a nivel nacional y federal con una serie de estrategias y programas de acción que se han aplicado sucesivamente en la última década. Probablemente, la Ley General de Cambio Climático (LGSM), aprobada en 2012

es hasta ahora el marco jurídico más importante que trata de forma integral el cambio climático. Como una ley general que especifica el compromiso del país a un objetivo de reducción de emisiones del 30% debajo de lo habitual (BAU) en 2020. En la misma línea, el GLCC propuso que la política nacional de mitigación debe incluir el diagnóstico, la planificación, medición, presentación, la verificación y evaluación de las emisiones nacionales de GEI.

En este trabajo se muestra que se puede obtener una reducción de las emisiones de CO2 de 3.74 Tg anualmente que puede ser un buen punto de partida para alcanzar los objetivos fijados por el gobierno de México.

La energía solar para el caliente de agua hoy en día es una tecnología muy fiable y madura. Sin embargo, el principal obstáculo para la aplicación de los calentadores solares es de carácter financiero. Esto se demuestra por la comparación de los instrumentos de financiación en México con otros países.

Las consideraciones adicionales sobre el impacto en los estándares del medio ambiente y calidad de los equipos están sujetos a consideraciones financieras. Este argumento es más válido cuando se observa que la clase media de la sociedad moderna está cada vez más inclinada a gastar en los beneficios de sus servicios. Por lo que la decisión sobre la compra o alquiler de una propiedad, cuando varias opciones son iguales, se basan en las condiciones financieras.

Por lo tanto, se puede prever la aparición de un nuevo actor económico en el mercado para el calentamiento de agua por medio de energía solar: los intermediarios técnicos y financieros que cobran una tarifa mensual a cambio de mantener el flujo de agua caliente para el usuario. Este esquema, por ejemplo, permitiría ofrecer sistemas solares multifamiliares.

El calentador solar de agua no es el futuro, es el presente del consumo de energía para calentar el agua, dado el potencial evaluado en este trabajo, es evidente que la CSA puede desempeñar un papel importante en la solución de los problemas energéticos en México.

NOTA 1: Tipo de cambio en 2014: 1 EE.UU. $ = $ 13.10 Pesos Mexicanos (enero)
Fuente:http://www.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/Paginas/tipo_cambio.aspx

REFERENCIAS

[1] ANES. Asociación Nacional de Energía Solar. Revista de Energías Renovables 2010; 1(6). pp. 33–36. (Mexico ISSN en trámite 00000359) ⟨http://www.anes.org.mx⟩.

[2] ANES 2005 Asociación Nacional de Energía Solar. La revista Solar 2005; 54, pp. 4–8. ⟨http://www.anes.org/anes/index.php?option¼com_wrapper&view¼wrapper&Itemid¼8⟩.

[3] Wagner & Co, Solar Technology. ⟨http://www.wagner solartechnik.com/wagnerEN/index.php?navid¼207&ref¼/wagnerEN/SW/index.php⟩.

[4] Israel Ministry of Foreign Affairs, Solar Energy in Israel ⟨http://www.mfa.gov.il/ MFA/FactsþAboutþIsrael/Scienceþ þTechnology/SolarþEnergyþinþIsrael.htm⟩.

[5] WEA. Renewable Energy Technologies, World Energy Assessment; 2001. Available from: ⟨http://www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame. html⟩ [Chapter 7].

[6] Weiss W, Bergmann I, Stelzer R. Solar Heat Worldwide, markets and Con-tribution to the Energy supply 2009. Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency, Austria; 2011. ⟨http://www.ieashc.org/publications/downloads/Solar_Heat_Worldwide-2011.pdf⟩.

[7] Mills D. Assessing hot water system performance with GIS. Sol Energy 2004;76:153–7.

[8] Nahar NM. Year round performance and potential of a natural circulation type of solar water heater in India. Energy Build 2003;35:239–47.

[9] Joudi KA, Al-tabbakh AA. Computer simulation of a two-phase thermosyphon solar domestic hot water heating system. Energy Convers Manag 1999;40:775–93.

[10] Bojie M, Kalogirou S, Petronijevic K. Simulation of a solar domestic water heating system using a time marching model. Renew Energy 2002;27:441–52.

[11] Kalogirou SA, Papamarcou C. Modelling of thermosyphon solar water heating system and simple model validation. Renew Energy 2000;21:471–93.

[12] Bo-Ren Chen, Yu-Wei Chang, Wen-Shing Lee, Sih-Li Chen. Long-term thermal performance of a two-phase thermosyphon solar water heater. Sol energy 2009;83:1048–55.

[13] Hasan A. Thermosyphon solar water heaters: Effect of storage tank volume and configuration on efficiency. Energy Conserv Manag 1997;38(9):847–54.

[14] Tully N. The influence of electrical backup element size on the performance of a solar thermosyphon DHW system. Energy 1995;20(3):209–17.

[15] Sen Z, Sahin AD. Spatial interpolation and estimation of solar irradiation by cumulative semivariograms. Sol Energy 2001;171(11):11–21.

[16] Rylatt M, Gadsden S, Lomas K. GIS-based decision support for solar energy planning in urban environment. Comput Environ Urban Syst 2001;25:579– 603.

[17] Elasfouri AS, Hawas MM. A simplified model for simulating solar thermal systems. Energy Convers Manag 1987;27(1):1–10.

[18] Cadafalch J. Adetailed numerical model for flat-plate solar thermal devices. Sol Energy 2009;83:2157–64.

[19] Kang Myeong-Cheol, Kang Yong-Heack, Lim Sang-Hoon, Chun Wongee. Numerical analysis on the thermal performance of a roof-integrated flat-plate solar collector assembly. Int Commun Heat Mass Transf 2006;33:976–84.

[20] CONAE. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Programa para la pro-moción de Calentadores solares de Agua, México; 2007. ISBN: 9789709983203 ⟨http://www.conae.gob.mx/work/images/Procalsol.pdf⟩.

[21] Rosas-Flores JA, Morillón GD. What goes up: recent trends in Mexican resi-dential energy use. Energy 2010;35(6):2596–602.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE VEGETAL USADO, ANALIZANDO DOS OPCIONES: RECOLECCIÓN DE RESTAURANTES O ADQUISICIÓN A TERCEROS.

José F. Piñón Rizo y José E. Cortés Leonel de Cervantes
Facultad de Ingeniería, Universidad La Salle, Benjamín Franklin 47, Del. Cuauhtémoc, Ciudad de México, CP 06140, México,
Tel. 52789537, **francisco.pinon@ulsa.mx.**

RESUMEN

La utilización de biocombustibles, sobre todo el biodiesel, hoy en día es una actividad que está tomando mucha fuerza sobre todo en México, por los beneficios que tiene para con el medio ambiente. El proyecto que se presenta, en un principio sólo consideraba la recolección de aceite vegetal usado en restaurantes cercanos a la zona donde se lleva a cabo la producción del biodiesel, de hecho, al ser una zona donde existen gran cantidad de ellos, hacía que la obtención de la materia prima fuera una de las principales fortalezas del proyecto.

Debido a que este proyecto es universitario, la participación de estudiantes en su realización ha sido inevitable y de mucho impacto. Derivado de esa colaboración y como consecuencia de una investigación sobre la materia prima para la producción del biodiesel y su posible implementación futura como una pequeña empresa, se hizo un estudio en donde se obtiene información valiosa sobre lo costeable que sería adquirir a ciertas empresas la materia prima, cuyo negocio es la recolección del aceite vegetal usado en gran cantidad. Esta actividad ya es común que se haga en restaurantes de la zona metropolitana de la ciudad de México, como consecuencia de lo que significa el biodiesel en la actualidad.

La investigación y el análisis dejan ver que vale la pena replantear la adquisición de la materia prima para la producción del biodiesel y eso es lo que se presenta en este trabajo.

ABSTRACT

The use of biofuels, especially biodiesel today is an activity that is taking very strong especially in Mexico, for the benefits it has for the environment. The project presented, initially only considered collecting used vegetable oil in near area restaurants where carried out the production of biodiesel, in fact, being an area where there are plenty of them, made the obtaining raw materials was one of the main strengths of the project.

Because this project is university, student participation in their implementation has been inevitable and much impact. Derived from this collaboration as a result of an investigation into the raw material for the production of biodiesel and its possible future implementation as a small business, a study where valuable information is obtained about how affordable it would acquire certain businesses the matter was raw, whose business is the collection of used vegetable oil in large amount. This activity is already commonly done in restaurants in the metropolitan area of Mexico City, as a result of what the biodiesel today.

Research and analysis reveal that worth rethinking the acquisition of raw material for the production of biodiesel and that is what is presented in this paper.

Palabras claves: Biodiesel, biocombustibles, aceite vegetal usado, recolección aceite, venta aceite vegetal.

ANTECEDENTES

Como se comentaba en el resumen, este proyecto da continuidad a una primera etapa, la cual consistió en diseñar, fabricar el reactor, capacitar a los participantes y obtener las mejores prácticas para la producción de biodiesel como parte de un grupo de investigación dentro de la Universidad La Salle, Campus Ciudad de México y cuyo primordial objetivo era y sigue siendo, la alimentación con biodiesel de las plantas de emergencia para producir energía eléctrica en el mencionado Campus. Esta primera etapa se está concluyendo de forma satisfactoria, en cuanto a metas y objetivos fijados, sin embargo, en un contexto general, éste no es un proyecto que tenga un final, pues el reactor que se fabricó, permite producir biodiesel por tiempo indefinido, obviamente con el mantenimiento adecuado al equipo y con la capacitación necesaria a los operadores y responsables correspondientes, lo que le da otros alcances que se comentarán más adelante.

Aunque existe una segunda etapa, como parte del proyecto, el cual consiste en ir adecuando el espacio donde se produce el biodiesel, para que cuente con los requisitos de seguridad pertinentes de acuerdo a las normas vigentes, lo que se presenta en este trabajo, es el análisis de la obtención del aceite vegetal usado para la producción del biodiesel, ya que en la primera etapa, tan sólo se había considerada como opción, la recolección del aceite en los restaurantes cercanos a las instalaciones de la Universidad.

Pero el proyecto ha tomado tal importancia entre los participantes, qué dentro de las investigaciones y proyectos propios de su carrera, han encontrado otras alternativas para conseguir la materia prima utilizada en la producción del biocombustible que ocupa a este trabajo.

Metodología para la producción del biodiesel

Para poner en contexto la relevancia del trabajo, a continuación, se muestra de manera muy sintetizada, la metodología aplicada en este proyecto para la producción de biodiesel utilizando 45 litros de aceite vegetal usado.

1. Filtrar y retirar los residuos sólidos más grandes que pudiera contener el aceite recolectado y vaciarlo en el tanque de depósito correspondiente.
2. Llenar el reactor con 45 litros de aceite vegetal usado, utilizando la bomba eléctrica.
3. Por separado, preparar el metóxido en un bidón, mezclando el metanol con el hidróxido de sodio.
    a. Por cada litro de aceite vegetal, utilizar 20% de metanol. En este caso, 9 litros de metanol.
    b. Por cada litro de aceite, agregar 7 gr de hidróxido de sodio (sosa caustica, en escamas). En este caso, se utilizan 315 gr de sosa.
    c. Agitar entre 10 y 15 minutos la mezcla de metóxido. Realizar esta actividad con mucha precaución, utilizando el equipo de seguridad adecuado.
    d. Lavar adecuadamente el bidón de metanol cuando se vacíe.
4. Cerrar y abrir las válvulas adecuadas para introducir el metóxido al reactor con la bomba eléctrica.
5. Nuevamente cerrar y abrir las válvulas correspondientes para formar un circuito cerrado y agitar el contenido del reactor.
6. Encender el reactor y una vez que llega a los 60°C se apaga.
7. Se deja circular la mezcla por el reactor unos 20 minutos, monitoreando que la temperatura no baje de los 55°C y de ser necesario, volver a encender el reactor.
8. Una vez pasado este tiempo, se destapa el tubo de presión, como seguridad
9. Se abren y cierran las válvulas correspondientes para hacer el filtrado y pasar el contenido al tanque de lavado.
10. Se hace el lavado del biodiesel de manera que el agua cruce perfectamente toda la superficie del biodiesel.
11. El lavado se realiza al menos 2 veces, utilizando la misma cantidad de agua que de biodiesel a lavar.
12. Se deja reposar el biodiesel al menos por 12 horas.
13. Si la reacción fue satisfactoria, se verá la separación de glicerina y del biodiesel, debido a la diferencia de densidad.
14. Se extrae la glicerina por la válvula correspondiente.
15. Por último, se extrae el biodiesel del tanque y se almacena.

La figura 1 muestra la planta de biodiesel tal y como fue construida. Se pueden identificar todas las partes principales que se mencionan en la metodología de producción.

Figura 1. Planta de biodiesel mostrando todos sus componentes

ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DEL ACEITE VEGETAL USADO: MATERIA PRIMA PARA PRODUCIR BIODIESEL

Parte importante del proyecto, es la obtención de la materia prima, pues de esto dependerá cierto nivel de calidad del producto y pensando en convertirlo en una pequeña empresa sustentable, la obtención resulta ser primordial para ello.

La obtención puede llevarse a cabo de dos maneras, la primera, que es la idea original y que es como se ha hecho hasta la fecha, es la recolección directa de restaurantes. Una segunda opción es la compra directa del aceite usado a empresas que se están dedicando a esta actividad.

A continuación, se hace el análisis de ambos casos. Es importante mencionar que se hace de una manera cuantitativa muy simple, más adelante, como continuación de la investigación se llevará a cabo de una manera más profunda con ayuda de la ingeniería industrial. Sin embargo, como se verá, se puede visualizar la diferencia que existe para los dos casos.

Obtención del aceite por recolección

Una de las razones principales que hace que el proyecto sea factible, fue que la materia prima para la producción del biodiesel, se podría conseguir fácilmente debido a la ubicación de la Universidad, ya que es una zona donde abundan los restaurantes y ellos proporcionarían el aceite vegetal usado. Para ello, se involucró en el proyecto tan sólo a un restaurante, ya que con los 20 litros que puede proporcionar semanalmente, era más que suficiente para dar inicio a la producción y alcanzar la meta de 80 litros de biodiesel por mes.

Esta vinculación es un aspecto muy importante del proyecto, debido a que se ha involucrado a la comunidad con la Universidad y están al tanto y han comprendido el impacto que se tiene si se le da mal uso al aceite usado.

La recolección del aceite de este único restaurante se hace de manera muy sencilla, pues se encuentra a más o menos 100 metros de la ubicación de los talleres donde se encuentra la planta de biodiesel. El restaurante entrega el aceite en bidones de 20 litros y se trasladan a los talleres, ya sea cargándolo o con ayuda de un diablito transportador.

Ahora bien, llevando el proyecto a un nivel superior de producción e inclusive, pensando ya en una pequeña empresa, que ese es un objetivo final del proyecto, que sea sustentable y ayude a disminuir el impacto ambiental causado por los combustibles fósiles. ¿Cómo se vería afectado el proyecto al incrementar la cantidad de aceite por recolectar?

¿Qué implica la recolección si se escala el proyecto a recolectar 100 litros semanales? Esta cantidad, por experiencia, estaría proporcionando aproximadamente 80 litros de biodiesel.

El restaurante que proporciona el aceite actualmente, tiene una capacidad de aproximadamente 80 personas, lo cual implica que se necesitarían 5 restaurantes del mismo tamaño para obtener los 100 litros.

El llevar a cabo la recolección de los restantes 80 litros semanales, implicaría cambio en la estrategia del proyecto.

Ahora bien, para poder hacer un análisis que deje ver cuál de las dos alternativas es más conveniente, se piensa en una tercera opción que consiste en obtener el máximo posible de biodiesel de acuerdo a la capacidad del reactor, que serían 45 litros diarios. Esto implica un total de 900 litros por mes por 20 días de recolección.

A continuación, se hace el análisis para los tres casos.

Recolección de 20 litros por semana. Esta situación es la más sencilla como se mencionó en el texto principal y es un caso que se realiza fácilmente, pues prácticamente no requiere de recursos.

Recolección de 100 litros por semana. Para esta segunda opción, las condiciones cambian debido a que ahora se necesita contactar y acordar con otros 4 restaurantes de la misma capacidad, su disponibilidad a participar y estar dispuestos a proporcionar el aceite usado que tienen como desecho. En este caso se tiene que planear la logística que involucre la ubicación de los restaurantes (inclusive hoteles). Esta logística incluye: como se transportará el aceite hasta las instalaciones, que días se puede pasar por él, en que contenedores se puede mover, que aspectos legales hay que cubrir para no infringir ninguna norma y cuantas personas son necesarias para realizar la actividad. Ya teniendo el aceite en las instalaciones se deben quitar los residuos sólidos importantes, lo que requiere tiempo, material y personal que lo haga.

Recolección de 225 litros por semana. Ahora se requiere contactar un total de 11 restaurantes de características similares al primero. Para esta última opción, la logística se vuelve más compleja y todas las actividades que se mencionaron en el segundo caso incrementan los recursos para llevarla a cabo, tanto materiales como económicos. El transporte debe ser mayor y utilizarse varios días de recorrido para completar los litros necesarios, lo que implica más combustible y más personal; eso sin contar que uno o más proveedores pudieran no cumplir la entrega y haya la necesidad de regresar otra vez. A todo esto, se suma la tarea de filtrar los residuos sólidos que contenga el aceite.

Obtención del aceite por compra a distribuidor

Existen empresas que se dedican a la recolección de aceite vegetal usado y una vez clasificado y analizado, le pueden dar al menos 2 aplicaciones, venderlo o producir biodiesel.

Con esta recolección, las empresas están garantizando todas las razones conocidas de los grandes beneficios que tiene la utilización del aceite usado para producir biodiesel: no contaminar a personas, ni al drenaje, ni al aire, ni agua, ni al suelo. Para que esto pueda ser sustentable, deben prepararse grandes cantidades de aceite, por lo que las empresas que generan esta materia prima deben de llegar a un acuerdo con los recolectores para que ambos se vean beneficiados. Los principales aportadores del aceite son los grandes restaurantes y hoteles que ofrecen alimentos.

Entonces, la obtención del aceite por compra a un distribuidor autorizado es otra opción para producir el biodiesel. Se hizo la investigación y actualmente, comprar un litro de aceite usado cuesta aproximadamente $0.12 USD, que en pesos mexicanos representa más o menos $2.30 por litro.

A continuación, se hará un análisis similar al anterior, pero ahora, que sucede en cada caso dependiendo de la cantidad de aceite a procesar para producir biodiesel.

Compra de 20 litros por semana. Para este caso, no existe duda que la compra no sería conveniente, pues es la forma más sencilla de obtener el aceite por recolección y seguramente la entrega por parte de cualquier empresa distribuidora de aceite saldría muy cara por tan pequeña cantidad. Si acaso la entrega corriera por parte del comprador, esto vendría a ser mayormente caro.

Compra de 100 litros por semana. Esta cantidad ya puede ser conveniente, por el trabajo que representa la recolección de 100 litros, aunque seguramente el margen de ganancia que se podría tener al comercializarlo sería mínima.

Compra de 225 litros por semana. Con esta cantidad, que representa la producción máxima del reactor, el costo por entrega se vuelve más pequeño por cada litro comprado y el beneficio es más impactante.

Comparación y análisis de las dos alternativas

En la tabla No. 1 se muestra el análisis para los dos casos, el de recolección y el de compra de aceite de cocina usado. La comparación se hace considerando cuantas personas intervienen para cada caso, cuánto tiempo se invierte en recolectar y limpiar el aceite, si se requiere un vehículo y el combustible del mismo. Para realizar el análisis se considera el salario mínimo de la Ciudad de México, el costo por renta

de un automóvil de carga, el costo del combustible. Aunque la persona que haga la labor no complete un día de trabajo, se le tiene que pagar completo, al igual que la renta del vehículo.

Tablas 1.- Análisis de la diferencia entre la recolección y compra de aceite vegetal usado

Actividad	Litros por semana	Impacto						
		Personas	Recolección/ horas	Vehículo/ día ($1404.00/día)	Combustible Litro ($14.03)	Limpieza / horas	Total horas/ turno ($73.04)	Costo
Recolección de aceite	20	1	0.25	N/A	N/A	0.5	0.75	$ 73.04
	100	1	1.5	Si (5 km)	Si (1 litro)	2	3.5	$ 1,491.07
	225	1	5	Si (20 km)	Si (4 litros)	5	10	$ 1,606.20
Compra de aceite	20	---	---	---	---	---	---	$ 46.00
	100	---	---	---	---	---	---	$ 230.00
	225	---	---	---	---	---	---	$ 517.50

Tomando en cuenta los datos de la Tabla 1 se puede condensar la información de la siguiente manera, en la Tabla 2:

Tabla 2.- Comparación de costos entre la recolección y compra de aceite vegetal usado

Litros por Semana	Costos de Recolección	Costos de Compra
20	$ 73.04	$ 46.00
100	$ 1,491.07	$ 230.00
225	$ 1,606.20	$ 517.50

Como puede observarse, de esta manera resulta más fácil la comparación entre los costos de las dos opciones que se están evaluando para adquirir la materia prima requerida para la producción del biocombustible. Si se toman los litros obtenidos por semana como el beneficio, entonces se puede visualizar la información como un cociente. La ecuación 1 muestra este cálculo:

$$\text{Beneficio} = \frac{\text{Litros por semana}}{\text{Método de obtención}} = \qquad (1)$$

Esta relación de Costo-Beneficio permite observar que opción es más viable y los resultados se ven claramente en la Tabla 3.

Tabla 3.- Costo – Beneficio

Recolección de aceite	Compra de aceite
0.27	0.43
0.07	0.43
0.14	0.43

Cabe mencionar que para el arrendamiento del vehículo de transporte se consideró la opción más económica que cumple con los permisos y licencias necesarias para el transporte de materiales riesgosos. Si se quisiera rentar un vehículo de carga hasta 20% más económico, sería necesario tramitar un permiso emitido por la SERMARNAT en el que se autoriza el manejo de residuos peligrosos en la modalidad de transporte, el cual tiene un costo de $3,818 y cuenta con una vigencia de diez años.

Tabla 4.- Comparación de vehículos de carga

Vehículo	Costo/día	Diferencia
Con permisos de carga	$ 1,404.00	$ 304.00
Sin permisos de carga	$ 1,100.00	

En caso de que se decida hacer la inversión para obtener el permiso para poder hacer uso de un servicio de arrendamiento más económico entonces el beneficio de dicha inversión se podría comenzar a apreciar aproximadamente después de las doce semanas que viene siendo aproximadamente después de los tres meses, que es el momento en el que la reducción de costos por motivo de la renta del vehículo de carga compensa y justifica la inversión del permiso emitido, que además como ya se mencionó, se va a poder seguir beneficiando del mismo por diez años.

CONCLUSIONES

El primer punto importante, es que a diferencia de lo que hasta hoy se había considerado para la producción de biodiesel, que era la recolección del aceite como materia prima, ahora se encuentra una segunda opción que es la de comprar la materia prima. En lugar de tener que elaborar acuerdos con los proveedores y una logística de recolección, la compra de la materia prima se vuelve una opción muy viable.

La compra del aceite a un proveedor también motiva a las empresas (restaurantes principalmente) a proporcionar su aceite a estas recolectoras, pues están obteniendo una pequeña remuneración por cada litro que aportan.

Como puede verse en la tabla 1, para una pequeña producción de biodiesel, la compra del aceite usado no es opción, sin embargo, lo importante de la de compra se empieza a notar cuando la cantidad de aceite va incrementando. Entre más aceite se compre para procesarlo y obtener biodiesel, el beneficio se vuelve más impactante. El problema de recolectar grandes cantidades de aceite son los costos indirectos de la logística.

Una situación que no debe perderse de vista, es que la comunidad, en este caso la de restaurantes, ya sea en una u otra alternativa, están aportando la materia prima para producir el biodiesel y así evitan la contaminación del agua y problemas de salud pública. Además, con el uso que se le da al biodiesel, ayudan a disminuir el impacto al medio ambiente.

REFERENCIAS

Piñón Rizo, J.F. (2014). Energías Renovables, la única solución, p. 84. De la Salle Ediciones, Ciudad de México, México.
Pater, Amal (2013). Biodiesel Basics: A simple biodiesel handbook. Bull City Publishing.
Reoil México (2010), ¿Qué es el residuo usado aceite de cocina?, consultado junio 20 del 2016 desde http://www.reoil.net/rauc.html.
Tabla de salarios mínimos generales (2016), Comisión Nacional de Salarios Mínimos, consultado junio 27 del 2016 desde http://www.conasami.gob.mx/pdf/tabla_salarios_minimos/2016/01_01_2016.pdf
Gasolina premium (2016), consultado junio 27 de 2016 desde http://eleconomista.com.mx/finanzas-publicas/2016/05/27/gasolina-premium-ocho-centavos-mas-cara-junio
Renta de autos y camionetas de carga (2016), recuperado el 27 de junio desde http://www.royalrent.com.mx/Planes-De-Renta.php
Baca Urbina Gabriel (2013). Evaluación de Proyectos. McGraw Hill
Ready to Rent, Camiones extra para tu negocio. Consultado junio 28 del 2016 desde http://readytorent.force.com/Cotizador
Autorización para transporte de residuos peligrosos. Consultado junio 28 del 2016 desde http://www.gob.mx/cntse-rfts/tramite/ficha/563b90f38217e6aef5002e7c
Secretaría de Economía, Comisión Federal de Mejora Regulatoria. Consultado junio 28 del 2016 desde http://187.191.71.208/BuscadorTramites/BuscadorGeneralHomoclave.asp
Autorización para el manejo de residuos peligrosos, SERMARNAT-07-033 Modalidad I. Recolección y transporte. Consultado junio 28 del 2016 desde http://www.gob.mx/semarnat

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL DE BAJA POTENCIA CON MECANISMO DE ABATIMIENTO DE PALAS

J.L. Gordillo, J.O. Aguilar*, R. Barbosa, J. Ortegón
División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019
Tel 01 (983) 83 5 03 89
***ovidio@uqroo.edu.mx**

R. Campos*, O. Jaramillo
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México
Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos 62580, México
***rca@ier.unam.mx**

RESUMEN

Se presenta el diseño y modelado por dinámica de fluidos computacional, un aerogenerador de eje vertical de baja potencia para las condiciones climatológicas de Chetumal Quintana Roo. El diámetro del aerogenerador es de 6m, cuenta con 3 palas de perfil NACA 0012 de sección transversal constante con una longitud de 3m y 1m de cuerda. La altura del aerogenerador es de 6 m. Lo novedoso de este diseño es el mecanismo de abatimiento de las palas, las cuales se pliegan durante ráfagas de viento superiores a 80 km/h, la estructura del mástil es de acero estructural así como los brazos que sostienen las palas, estas palas están hechas de fibra de vidrio con un centro de madera de alta densidad. La simulación numérica por dinámica de fluidos computacional considero un túnel de viento equivalente a 2h altura X 3h ancho X 6 h longitud, dónde h es la altura del aerogenerador. Se utilizó un modelo de turbulencia κ-ω RNG, las condiciones de frontera fueron no deslizamiento en las paredes superior e inferior y una velocidad de viento de 15 m/s a la entrada. Los resultados mostraron que bajo las condiciones iniciales, el aerogenerador presenta mayor deflexión en la posición plegada, respecto a la desplegada, debido a la mayor altura que alcanza el sistema durante el plegado de álabes. La distribución de esfuerzos presenta un comportamiento inverso, es decir, menores valores de esfuerzo en la base del mástil en la posición plegada respecto a la desplegada, dentro del rango del esfuerzo permisible del acero estructural.

ABSTRACT

Computational dynamic fluids analysis was conducted to design and modelling a vertical axis wind turbine (VAWT) acccording to climatological conditions of Chetumal, Quintana Roo, México. The VAWT has 6 m diameter, 3 m lenght of blades (3) and 6 m height. The airfoil used to construct the blade was a NACA 0012 with a cord lenght of 1 m. The folding blade mechanism ot the VAWT is the novelty, which is folded during gusts above 80 km/h. All structural parts of VAWT are considered to be of structural steel and blades with fiber glass and high density wood core. The CFD simulation was conducted take into acount a wind tunnel with dimensions of 2 *h* heigth X 3 *h* width X 6 *h* length, where *h* is the heigh of wind turbine. The turbulence model used was κ-ω RNG with non-slip conditions on top and bottom walls and wind velocity inlet of 15 m/s. The results shown that under que initial conditions, the folded VAWT presents a higher deflection that unfolded VAWT due the greater height reached during the folding process. The equivalent stress distrubution along the pole height presents a inverse behaviour that deflection, lower stress values in the pole base in the folding position, always within the range of permissible stress of structural steel.

Palabras claves: Energía eólica, análisis computacional, VAWT, aerogenerador de baja potencia, protección estructural.

INTRODUCCIÓN

Frente a la problemática energética actual, es indispensable integrar nuevas alternativas de generación energética con características más sustentables y amigables con el medio ambiente. Las energías renovables han demostrado que pueden aportar buena parte del recurso energético que se necesita para satisfacer la demanda actual, de tal manera que se vislumbra la descentralización de la llamada energía fósil. En 2014 las energías renovables representaron aproximadamente el 59% de las adiciones netas en la capacidad mundial de generación de energía. La energía hidráulica, eólica y solar Fotovoltaica (FV), dominaron el mercado. Hacia el final del año, las energías renovables constituyeron un estimado del 27.7% de la capacidad generadora de energía del planeta, misma que es suficiente para abastecer cerca del 22.8% de la electricidad mundial. Para inicios del 2015, al menos 164 países ya contaban con metas de energía renovable, mientras que un estimado de 145 países ya tenían políticas de apoyo a la energía renovable en (Foley, 2015).

Entre 2006 y 2011, la capacidad de producción global de energías renovables, incluyendo grandes hidroeléctricas, creció a tasas promedio anuales muy altas (entre 17% y 58%). La energía solar fotovoltaica registró el crecimiento más acelerado, con un aumento en la capacidad instalada de 58% anual promedio durante el período citado. Por primera vez, en 2011 la energía solar fotovoltaica representó la mayor cantidad de nueva capacidad eléctrica instalada en la Unión Europea, más que ninguna otra tecnología. Por otra parte, la energía solar termoeléctrica aumentó casi 37%, considerando que existía una pequeña cantidad de plantas instaladas al inicio del período. Puntualmente la energía eólica ha tenido una contribución considerable en el suministro energético mundial. En (Beltrán, 2013) menciona que la generación mediante energía eólica en 2011 se acercó a 2% a nivel global, aunque entre los miembros de la OCDE la participación superó el 3%. En España la participación se acerca al 15% y en Alemania en 2011 ya se encontraba cerca de superar el 10%.

La generación de energía por medios más amigables con el medio ambiente (energía fotovoltaica, fototérmica, celdas de combustible o eólica), es una solución que ha demostrado resultados positivos en el ámbito económico, ambiental y social.

Si el consumidor de energía eléctrica pudiese generar su propio recurso, por medio de un aerogenerador instalado en su vivienda, este hecho no solo tendría un beneficio para su economía sino que generará un impacto positivo en el medio ambiente

Puntualmente en la ciudad de Chetumal Quintana Roo el recurso eólico es aprovechable con una velocidad media del viento de 3.1 m/s, con máxima de 7.6 m/s (Medina-Quej et al., 2009), sin embargo es una zona en la que se presentan algunos huracanes durante el año, de aquí la necesidad de que el sistema de generación pliegue sus palas para que éstas no se dañen.

El objetivo del trabajo es diseñar y modelar por dinámica de fluidos computacional un aerogenerador de baja potencia (~1 kW) que cuente con la capacidad de desplegar las palas o álabes, con la finalidad de proteger su integridad estructural durante vientos mayores a los 80 km/h. Esto permitirá que el usuario del aerogenerador pueda utilizar al máximo su equipo de generación, sin necesidad de desmontarlo o poner en riesgo su inversión y suministro.

DESARROLLO

Se presenta una propuesta del diseño de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia para uso doméstico, de acuerdo a las condiciones climáticas de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo, lugar sujeto a fenómenos climatológicos como huracanes o tormentas tropicales. Las dimensiones del aerogenerador son: tres álabes igualmente espaciados con altura de 3 m, cuerda de 1 m, altura total de 10 m y radio de 3m. El álabe tiene sección transversal constante de acuerdo al perfil aerodinámico NACA 0012. A continuación la descripción del aerogenerador y el mecanismo de pliege de palas.

Diseño del aerogenerador

El mástil es un tubo de acero estructural de 10 pulgadas de diámetro cédula 100, 6 m de longitud y un peso aproximado de 960 kg, el cual soportará las cargas dinámicas a las que estará sujeto el aerogenerador. En la parte superior del mástil está la corona, la cual cuenta en su parte central con una perforación para que la barra de elevación pueda correr libremente para plegar o desplegar los alabes. La corona y la barra de elevación cuentan con bisagras que permiten conectar, mediante unos brazos, a los tres álabes que conforman el aerogenerador. En la Fig.1 se presenta una imagen en explosión del aerogenerador propuesto. Por su parte, la Fig. 2a muestra el aerogenerador con los álabes desplegados y la Fig. 2b con los álabes plegados. Ambas configuraciones se utilizaron en el modelo de interación fluido estructura para determinar los esfuerzos y deformaciones máximos a los que estará sujeto el aerogenerador durante su funcionamiento.

Fig.1. Partes componentes del aerogenerador de eje vertical.

Fig. 2. Configuraciones del aerogenerador de eje vertical, a) desplegado; b) plegado.

Análisis de interacción dinámica de fluidos computacional-estructura.

Para determinar los esfuerzos mecánicos a los que estará sometido el aerogenerador durante su funcionamiento, es necesario realizar un análisis de dinámica de fluidos computacional, el cual permite determinar la distribución de presiones en este. Posteriormente, esta distribución de presiones se acopla a un modelo estructural para determinar los esfuerzos y deformaciones a las que estará sometido el sistema. Al análisis anterior se le denomina FSI (Fluid Structure Interaction en inglés) y se realizó con el software comercial ANSYS-Fluent. Debido a la complejidad del modelo y las restricciones en capacidad de cómputo se tuvieron que hacer las siguientes consideraciones.

Análisis en estado estable. Debido a la restricción de recursos de cómputo, el modelo sólo consideró análisis en estado estable.

Simplificación de la geometría. Como se mencionó anteriormente, debido a la restricción de recursos de cómputo, fue necesario simplificar el modelo diseñado en un CAD comercial. Se omitieron los elementos de fijación como tornillos, tuercas y orificios con el objetivo de no aumentar el número de elementos de malla. La experiencia previa dicta que la simplificación realizada no afecta significativamente los resultados finales.

Comparación del modelo numérico. Para determinar si un modelo numérico es confiable es necesario validarlo con un experimento, en el que ambos tengan las mismas condiciones de operación. Otra opción es comparar el modelo con otro que esté validado. Para esto, fue necesario comparar el modelo realizado con uno reportado por Howell (Howell at al., 2010). Se realizaron simulaciones del modelo CFD con tres velocidades angulares diferentes, con el objetivo de comparar el coeficiente de potencia y el tip speed ratio (TSR). La Fig. 3 muestra resultados similares a los reportados por Howell, por tanto, el modelo propuesto es confiable.

Análisis de independencia de malla. Debido a que se utilizaron condiciones similares a las reportadas por Howell, no fue necesario realizar un análisis de independencia de malla. Sin embargo, para optimizar recursos de cómputo, es un trabajo que se tiene que realizar a corto plazo.

Distribución de presiones en las palas del VAWT. Aunque la distribución de presiones en las dos posiciones del VAWT son diferentes, como primera aproximación se utilizó la misma distribución para ambos casos (VAWT desplegado) para determinar la distribución de esfuerzos en la estructura del mástil. La diferencia en resultados estaría solo en función del radio del VAWT, es decir, la posición de las palas respecto al mástil.

Dinámica de fluidos computacional

Las condiciones de frontera que se utilizaron fueron las siguientes; v = 5.81 m/s (velocidad para comparación con el modelo de Howell) y 15 m/s, presión = 101325 pascales, densidad del fluido = 1,225kg/m^3, viscosidad=1.7894x10^{-5}, radio = 0.30 m, modelo de turbulencia k-ε RNG para la velocidad de 5.81m/s y k-ω para 15 m/s. Howell y colaboradores (Howell, Qin, Edwards, & Durrani, 2010) recomiendan utilizar este modelo por predecir campos de flujo que involucran grandes separaciones de flujo, como en esta investigación. Sin embargo, al aumentar la velocidad en el modelo a 15 m/s se tiene una separación del flujo mayor y el modelo k-ε no tiene buena exactitud por lo que se utilizó el modelo k-ω.

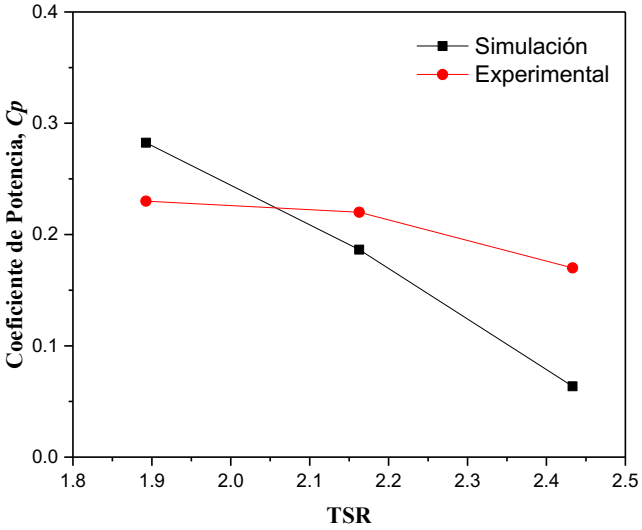


Fig. 3. Comparación de la señal experimental realizado por (Howell et al., 2010) y la señal obtenida por la simulación computacional.

En la Fig 4 se presentan las distribuciones de presiones en las palas del VAWT a una velocidad de 5.81 m/s. Se puede observar que la mayor presión se ejerce en la entrada del perfil aerodinámico

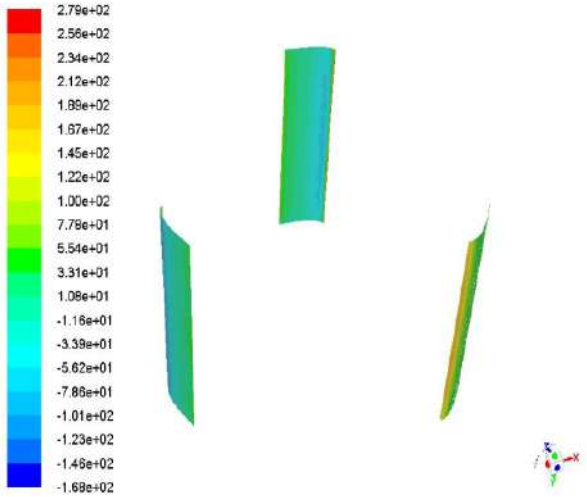


Fig. 4. Distribución de presión en el área de externa de los alabes, 5.81m/s

Los resultados anteriores se acoplaron al modelo de análisis estructural del aerogenerador, el análisis se realizó en estado estable y las condiciones utilizadas en el modelo se describen a continuación.

Análisis estructural del aerogenerador.

Las condiciones de frontera utilizadas en el modelo fueron las siguientes: restricción total de movimiento en la base del mástil y distribución de presiones en la parte externa de las palas del VAWT. Cabe mencionar que la distribución de presiones se acoplo a este modelo a partir de los resultados CFD presentados previamente. El número de elementos de malla fue de $8x10^6$ y la calidad promedio de los elementos fue de 8.5. El material de todo el sistema a excepción de las palas fue acero estructural. Las palas se modelaron con fibra de vidrio en la parte exterior y un núcleo de madera de alta densidad. Las propiedades de los materiales se obtuvieron de la base de datos del software. En la Fig 5a se muestra el VAWT con palas desplegadas, es decir, cuando está en operación y se indica con una flecha la zona en donde se aplica la distribución de presiones. En la Fig 5b se muestra el VAWT en su posición de reposo, es decir, plegado y de igual forma se indica la zona donde se aplica la distribución de presiones.

RESULTADOS

En la Fig 6 se presenta el esfuerzo equivalente a lo largo del mástil, desde la base hasta su punto más alto, es decir, a 6 m sobre el nivel del suelo. Es importante mencionar que durante el pegado del VAWT, una barra de elevación hace que los brazos, que conectan las palas con el mástil, pivoten y acerquen de forma paralela las palas al mástil, como se puede observar en la Fig. 5b. Lo anterior hace que el VAWT en posición plegada tenga mayor altitud que el desplegado. En este caso, en la parte superior del VAWT en posición desplegada

se tendrán las mayores deflexiones. Para evitar esta comparación erronea, se optó por comparar esfuerzos y deflexiones en el mástil solamente.

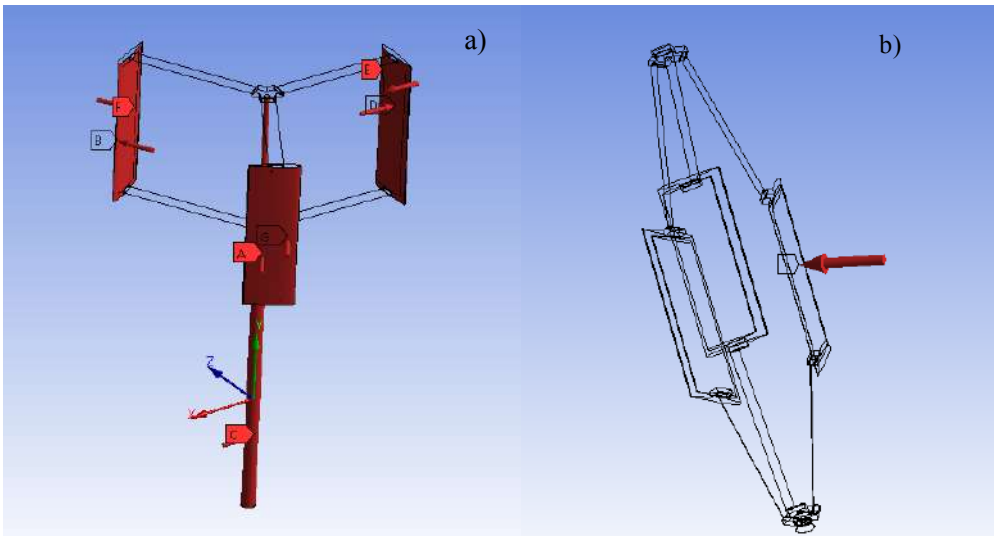


Fig. 5. Aplicación de distribución de presiones a los alabes del VAWT: a) desplegado y b) plegado.

En la Fig. 6 se puede observarq que VAWT en la posición plegada presenta esfuerzos menores en la base, de casi la mitad. Sin embargo, a una altura de ~4.5 m, los esfuerzos son similares y a partir de ahí los valores de esfuerzo se hacen menores para el desplegado. Lo anterior se explica por la mayor altura que alcanza el VAWT en la posición plegada. El resultado anterior muestra que la posición plegada proporciona valores de esfuerzo menores y por tanto se reducen los riesgos de daño estructural.

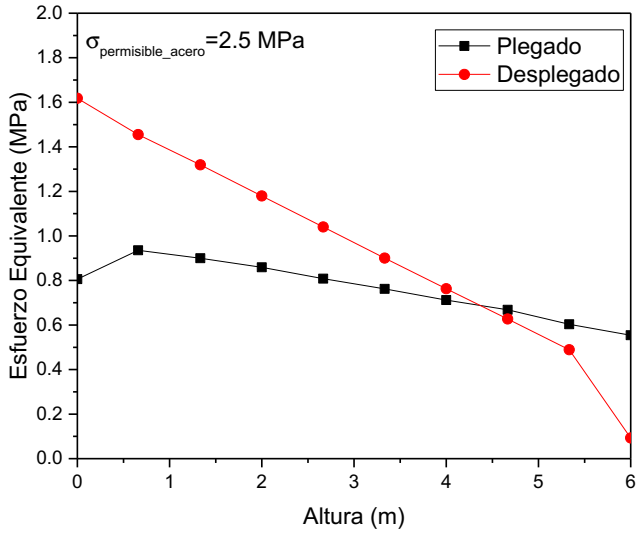


Fig. 6. Esfuerzo equivalente de von Misses en el mástil del VAWT para ambas posiciones, plegado y desplegado.

La Fig 7 presenta la deflexión máxima en el mástil del VAWT para las dos posiciones analizadas. Se puede observar que la configuración desplegada tiene mayores deformaciones a partir de 1 m de altura, esto debido a la mayor altura que presenta respecto al plegado. Sin embargo, como se muestra en la Fig. 6, los esfuerzos mecánicos a los que está sometido son menores. Además, la deflexión máxima es del orden de 0.0025 m, lo cual no es significativo para el correcto funcionmiento del VAWT.

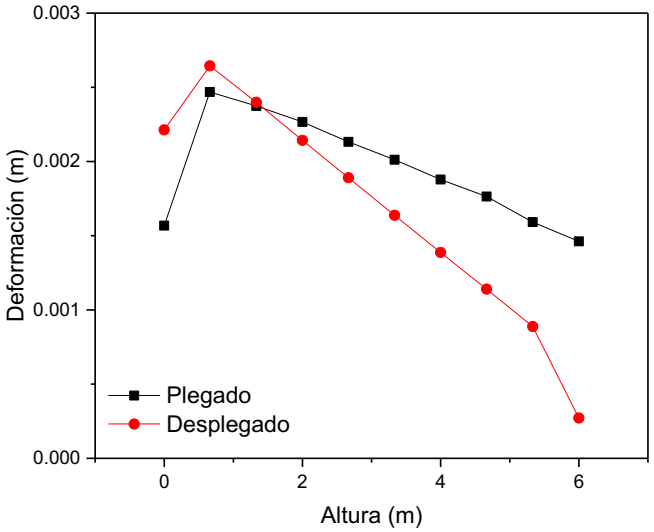


Fig. 6. Deformación máxima en el mástil del VAWT para ambas posiciones, plegado y desplegado.

CONCLUSIONES

Se presentan los primeros resultados del diseño de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia. Estos resultados forman parte de una colaboración entre el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Quintana Roo. Aunque los resultados no son conluyentes debido a lo complejo del modelo, proporcionan un aprendizaje significativo en el estudio del comportamiento estrucural de aerogeneradores de baja potencia sujetos a vientos mayores a las condiciones seguras de operación de cualquier aerogenerador disponible comercialmente.

Se encontró que, con las restricciones mencionadas en el apartado del análisis FSI, el VAWT en la posición plegada presenta menores esfuerzos en el mástil (~50% menos en la base del mástil) lo cual hace que el riesgo de sufrir daño estructural sea menor respecto al VAWT en la posición desplegada.

REFERENCIAS

Foley, T., Thornton, K., Hinrichs-rahlwes, R., Sawyer, S., Sander, M., Taylor, R., … Hales, D. (2015). *Renewables 2015 global status report*.

Beltrán, L. (2013). Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027. Gobierno de México.

Medina-Quej, A., Arce-Ibarra, A. M., Herrera-Pavón, R., Caballero-Pinzón, P., Ortiz-León, H., & Rosas-Correa, C. (2009). El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe. El Colegio de la Frontera Sur.

Duffie J.A. and Beckman W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes, p. 137. Wiley Interscience, New York, USA.

Mandal N.K. and Mandal T. (1994). Analysis of a steam generating system using linear concentrator, Energy, Vol 14, No. 9, p. 999-1003.

Ray R. (1981). Nonlinear dynamics model of a solar steam generator, Solar Energy, Vol. 26, No. 4, p. 297-306.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

KIT DIDÁCTICO PARA EL APRENDIZAJE SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE HORIZONTAL

Víctor M. Romero Medina, Gabriel A. Franco Mena, Miguel A. Olivera Alcocer, Estela Cerezo Acevedo
Departamento de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad del Caribe, S.M. 78, Mza. 1, Lote 1, Esquina Fraccionamiento Tabachines, Cancún, Quintana Roo, C.P. 77509, México, Tel: (998) 881 44 00, Ext, Correos: vromero@ucaribe.edu.mx, 130300225@ucaribe.edu.mx, 130300220@ucaribe.edu.mx, ecerezo@ucaribe.edu.mx

RESUMEN

En la actualidad, la energía eólica es usada principalmente para producir electricidad mediante aerogeneradores. El impacto ambiental que genera dicha energía es menos problemático en comparación con otras fuentes de energía, además, se trata de un recurso abundante y renovable que ayuda a disminuir la dependencia hacia los combustibles fósiles y a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, es de gran interés diseñar y construir material didáctico para que estudiantes de diferentes niveles académicos puedan comprender la importancia del aprovechamiento de energía a través de dicho recurso. Con lo anterior, se hace notoria la necesidad de concientizar y fomentar el aprendizaje del comportamiento del recurso eólico y del funcionamiento de los aerogeneradores. Por esto, se elaboró un kit didáctico que proporcionará un método fácil e interactivo para identificar las partes de un aerogenerador de eje horizontal, al igual que el funcionamiento del mismo.

El kit está compuesto por un aerogenerador a escala, las aspas de éste fueron elaboradas usando el perfil aerodinámico NACA-4412 empleando la herramienta CAD de Solidworks y elaboradas mediante impresiones 3D, un ventilador con velocidades variables que simulan un túnel de viento y dos LED que serán encendidos al hacer girar el rotor con la corriente de aire generada por un ventilador. Además, se incluye un manual con una serie de prácticas que abarcan temas que van desde el funcionamiento y reconocimiento del equipo hasta cálculos del potencial eólico, cálculo de potencia generada y el coeficiente de potencia, entre otros. Se espera que el kit didáctico eólico llegue a escuelas públicas y privadas con la finalidad de ayudar a desarrollar las capacidades de los estudiantes y orientarlos a seguir una cultura ambiental con conocimientos acerca de fuentes de energía renovables y limpias.

ABSTRACT

Today, wind energy is mainly used to produce electricity by wind turbines. The environmental impact of this energy is less problematic compared to other energy sources, in addition, it is an abundant and renewable resource that helps to reduce dependence on fossil fuels and reduce emissions of greenhouse gases. So It is therefore of great interest to design so it is of great interest to design and build teaching materials for students of different academic levels to understand the importance of harnessing energy through this resource. With the above, it becomes evident the need to raise awareness and promote learning the behavior of wind resource and operation of wind turbines. Therefore, a teaching kit that will provide an easy and interactive method to identify parts of a horizontal axis wind turbine, like the operation thereof was prepared.

The kit consists of a wind turbine scale, the blades thereof were prepared using the airfoil NACA-4412 using the CAD tool Solidworks and produced by 3D printing, a fan with variable speeds that simulate a wind tunnel and two LEDs that will be turned on by rotating the rotor with the air stream generated by a fan. In addition, a manual is included with a number of practices that cover topics ranging from equipment operation and recognition to calculations of wind potential, calculating generated power and the power coefficient, among others. The kit is expected to reach public and private schools in order to help develop the capabilities of students and guide them to follow an environmental culture with knowledge about renewable and clean energy.

Palabras clave: energía eólica, aerogeneradores, kit didáctico, potencial eólico, potencia, energía renovable.

INTRODUCCIÓN

Con el creciente incremento de conciencia hacia el cuidado por el medio ambiente y sus recursos, así como por la preocupación por el inevitable agotamiento de los combustibles fósiles, las energías alternativas han tomado un papel principal a nivel global. La enseñanza del funcionamiento de estas fuentes de energía alternativas es muy importante para el desarrollo de los estudiantes.

El problema con la enseñanza es que en algunas veces hace falta un material didáctico que refuerce los conocimientos aprendidos.

Tomando dicha idea, se diseñó un generador eólico funcional a escala, con el cual los estudiantes de educación media – superior y superior puedan aprender sobre la energía eólica de una manera más palpable, utilizando prácticas de laboratorio que refuerzan su aprendizaje en el tema.

METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología que se siguió para diseñar y fabricar las aspas del aerogenerador a escala.

Selección de Generador Eléctrico

Se ha optado por un motor eléctrico DC marca JOHNSON PC357XLG para que cumpla la función de generador. El voltaje oscila entre 3-15 V y su amperaje es de 30 mA. Los LED a encender requieren de aproximadamente 20mA y 1.5 V, estos serán puestos mediante una conexión en serie.

Diseño del Rotor

El dispositivo que hará girar el motor eléctrico JOHNSON PC357XLG es el rotor. Para su diseño, se parte de la potencia promedio del motor eléctrico y de la velocidad promedio del viento del ventilador, cuyo valor es de aproximadamente 3 m/s. Para los cálculos, se considera una densidad del aire estándar de 1.225 kg/m^3 (densidad de aire a 1 atm de presión y a T=15°C).

Perfil Aerodinámico y Características de Diseño. Existe una gran variedad de perfiles aerodinámicos. Los más conocidos son los perfiles NACA. Éstos han sufrido una gran cantidad de cambios y ahora los nuevos perfiles se indican con más de 5 dígitos. Además de los perfiles NACA, existen otro tipo de perfiles normalizados como los americanos de la serie SERI o LS, diseñados específicamente para Aero turbinas, o los del Instituto Aeronáutico de Suecia (FFA).

Los perfiles convencionales utilizados en generación eólica son los de la serie NACA230XX y NACA44XX que tienen valores de rendimiento aerodinámico *L/D* entre 100 y 120, con coeficientes de sustentación de operación de 1.0 a 1.1 (Funes Ruiz, 2009). El perfil seleccionado para las palas del rotor es el NACA-4412 (Figura 1).

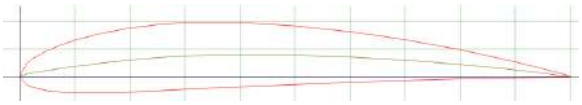


Figura 1. Perfil aerodinámico NACA-4412

Para definir las características de diseño del perfil aerodinámico, es importante definir las fuerzas que actúan en él. La fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre están en función del número de Reynolds, definida en la ecuación (1) como

$$Re = \frac{c_{prom} \mathrm{v} \rho}{\mu} = \frac{C_{prom} \mathrm{v}}{v} \quad (1)$$

donde c_{prom} es la longitud de la cuerda promedio, v es la velocidad del viento, ρ es densidad, μ es la viscosidad dinámica y ν es la viscosidad cinemática.

Considerando que la viscosidad cinemática del aire a 15°C es de 1.47x10^{-5} m^2/s y suponiendo una cuerda promedio de 0.012 m, tendremos que el número de Reynolds será aproximadamente de 2448.98. Los siguientes valores fueron extraídos del sitio web "Airfoil Tools". El número de Reynolds a tomar en consideración para las características de diseño será de 50 000 debido a los intervalos proporcionados por dicho sitio web. Con base en lo anterior, se encontró que a *Re* = 50 000, la relación mínima C_D/C_L=0.03 y la relación máxima C_L/C_D= 33.45 se obtienen cuando el ángulo de ataque α es igual a 9.75°. Para dicho ángulo, C_L es igual a 1.32.

Número de palas y coeficiente de potencia de diseño. Para definir el número de aspas *B* que tendrá el rotor se debe tener en cuenta que la relación entre la velocidad en la punta del aspa y la velocidad del viento λ_0 se encuentre entre 5 y 8, pues de esta zona se obtienen los mejores valores para el coeficiente de potencia C_p (Lysen, 1983). Con base en ello, se definieron los parámetros λ_0 y *B*. Se optó por elegir λ_0=6 y un número de palas *B*=3.

Posteriormente, procederemos a determinar el coeficiente de potencia C_p en función de λ_0 con base en gráficas que muestran el efecto de la relación C_D/C_L en rotores de 3 álabes. Para λ_0=6, el coeficiente de potencia máximo $C_{P\ máx}$ es de aproximadamente 0.41 y, considerando una eficiencia del 80% el C_P de diseño resulto ser de 0.328.

Diámetro y Velocidad Angular del Rotor. La fórmula para calcular el R del rotor viene dada por la ecuación (2) como

$$R = \sqrt{\frac{2P}{\pi \rho v^3 C_P}} \quad (2)$$

donde:
P = Potencia nominal del alternador.
ρ = Densidad estándar del viento.
v = Velocidad promedio del viento.
C_p = Coeficiente de potencia de diseño.

Al sustituir los datos en la ecuación (2), encontraremos que el radio será de 0.051 m, por lo que el diámetro del rotor será de 0.102 m y el área A será de 0.033 m^2. Ahora se procede a calcular la velocidad angular del rotor partiendo de la ecuación (3)

$$\lambda_0 = \frac{\Omega R}{\mathrm{v}} \quad (3)$$

Donde:
λ_0 = Razón entre la velocidad tangencial en la punta de la pala y la velocidad del viento.
Ω = Velocidad angular del rotor en rad/s.
R = Radio del rotor en metros.
v = Velocidad promedio del viento en m/s.

Al despejar Ω de la ecuación (3) y sustituyendo los datos conocidos, tendremos que éste fue de 352.941 rad/s. Por conveniencia, se realizará la conversión de rad/s a rpm, resultando entonces 3 370.34 rpm.

Geometría de Palas. Para la geometría de las aspas del rotor se usan las expresiones de 4 a 6 (Lysen, 1983) y la relaciones ϕ - λ_r para el diseño de rotores.

$$\lambda_r = \lambda_0 \frac{r}{R} \tag{4}$$

$$c = \frac{8\pi r}{BC_L}(1 - cos\emptyset) \tag{5}$$

$$\beta = \emptyset - \alpha \tag{6}$$

Donde:
λ_r = Relación local.
r = Distancia del centro del rotor a un radio "*r*" en metros.
R = Radio del rotor en metros.
c = Cuerda de la sección del alabe.
ϕ = Ángulo aparente del viento.
β = Ángulo formado por la pala con el plano de giro.

Se partió de los datos mencionados anteriormente para elaborar la tabla 1, que contiene los valores que se usarán en el diseño de las palas.

Tabla 1. Parámetros de diseño

r(m)	λ_r	ϕ	1-cos(ϕ)	α	C_L	β	*c*(m)	1/4*c*(m)
0.0051	0.60	39.5420	0.2302	9.7500	1.3200	29.7920	0.0075	0.0019
0.0102	1.20	26.6184	0.1064	9.7500	1.3200	16.8684	0.0069	0.0017
0.0153	1.80	19.4060	0.0569	9.7500	1.3200	9.6560	0.0055	0.0014
0.0204	2.40	15.1104	0.0346	9.7500	1.3200	5.3604	0.0045	0.0011
0.0255	3.00	12.2900	0.0229	9.7500	1.3200	2.5400	0.0037	0.0009
0.0306	3.60	10.3596	0.0163	9.7500	1.3200	0.6096	0.0032	0.0008
0.0357	4.20	8.9330	0.0121	9.7500	1.3200	-0.8170	0.0028	0.0007
0.0408	4.80	7.8488	0.0094	9.7500	1.3200	-1.9012	0.0024	0.0006
0.0459	5.40	6.9980	0.0075	9.7500	1.3200	-2.7520	0.0022	0.0005
0.0510	6.00	6.3080	0.0061	9.7500	1.3200	-3.4420	0.0020	0.0005

Diseño Geométrico de las Palas

Con base en la información del apartado anterior se establecieron los valores geométricos en diferentes puntos a lo largo del radio de la pala que definieron su forma física. Para ello se estableció que el radio *R* del rotor será de 0.051 m, potencia promedio de 270 mW.

Se usó la herramienta CAD de Soliworks para definir la geometría de cada una de las diez secciones anteriores y así poder desarrollar el modelo 3D (Figura 2). El ángulo de ataque α se mide respecto a un eje ubicado a un cuarto de cuerda "1/4*c*(m)", medido desde el borde de ataque.

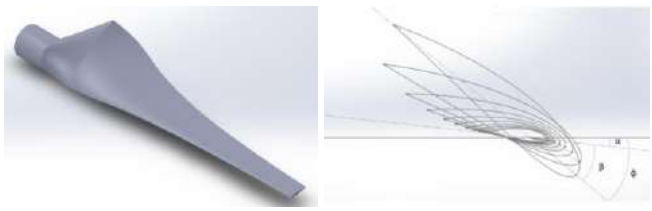


Figura 2. Diseño 3D: vista isometrica y ángulos del perfil aerodinámico para cada sección de pala.

Rotor y Buje

El rotor de una turbina eólica se conforma ubicando las aspas alrededor de un eje común que recibe el nombre de buje. El diseño del buje deberá oponer menor resistencia al flujo de aire generado por el ventilador. Según Wang (2003), comprueba experimentalmente que la curva elíptica es la que mayor eficiencia presenta en el diseño de pequeñas turbinas, por lo que se ha seleccionado dicha curva para el diseño del buje.

Fabricación de Palas

Las palas fueron fabricadas con ayuda de una impresora 3D que opera mediante la fundición de filamentos de ABS para formar capas sobrepuestas cuyo resultado final es la figura deseada.

CONCLUSIÓNES

El tener un material didáctico para apoyar la enseñanza de los principios de la energía eólica es de gran ayuda para captar la atención de los estudiantes. El prototipo del kit se presentó en el cierre de la materia de Mecánica de Fluidos frente al alumnado, las reacciones de dichos alumnos mostraron interés en el tema una vez que se mostró el kit. Los alumnos comenzaron a hacer preguntas de su funcionamiento y de los principios de la energía eólica, logrando así el objetivo planteado de que el kit ayudaría al aprendizaje de la materia de Energía Eólica

En el apartado de funcionamiento el kit funciono, aunque de manera no planeada. El tiempo no nos permitió el hacer un motor-generador, por lo que se tuvo que comprar uno del mercado, y las especificaciones de revolución de dicho motor no permitió que un ventilador pudiese vencer la inercia de las palas y el rotor, por lo que se tuvo que utilizar una aspiradora.

REFERENCIAS

Fernández-Peña Mollá, L. (2012). XFLR5 V4. 17 software de análisis de perfiles, planos y aviones: estudio y diseño de un CN-235.

Funes Ruiz, J. (2009). ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA PALA DE AEROGENERADOR (1st ed.). Madrid.

NACA 4412. (2016). Airfoiltools. Consultado el 12 abril de 2016, de: http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-50000.

Gómez-Rivera, W., Aperador-Chaparro, W., & Delgado-Tobón, E. (2011). Desarrollo de rotores para turbina eólica de 200 vatios mediante la implementación de tecnología local. Ingenieria y Universidad, 15(2), 303.

LYSEN, E. H. Introduction to wind energy. CWD. Consultancy services wind energy developing countries. Amersfoort: s. e., 1983.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.

SOUCA, E. S., & CIUPAN, C. (2014). AIRFOIL SELECTION FOR AERODYNAMIC PERFORMANCE CRITERION ON SMALL WIND TURBINES. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING, 57(2).

WANG, F.; BAIA, L.; FLETCHERB, J.; WHITEFORDC J. y CULLENC, D. Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output. Renewable Energy. 2008, núm. 33, pp. 1637-1651.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

METODOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA ENERGÍA SOLAR EN LOS EDIFICIOS

Hernández H. A. y Morillón G. D.*
Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, México D.F.
Tel. (55) 40 34 15 98
Correo electrónico: AHernandezH@iingen.unam.mx, *damg@pumas.iingen.unam.mx
*Instituto de Ingeniería - UNAM

RESUMEN

Por la capacidad de generar energía con la radiación solar, la cual se considera como fuente renovable, se puede satisfacer gran parte de las necesidades energéticas del mundo actual, incluidos los requerimientos energéticos de los edificios, tema que se desarrolla en este artículo.

La utilización de las energías renovables puede ser en forma activa o pasiva, aprovechamiento que difiere en utilizar o no algún tipo de tecnología.

La metodología propuesta parte de la información del entorno, como temperatura del aire, humedad relativa, viento y radiación solar, así como información de los requerimientos energéticos de los edificios, del usuario e información geográfica (latitud, longitud y altitud), posteriormente se realiza un diagnóstico con dicha información, consiste en dos estudios: el del bioclima y el de disponibilidad y potencial del recurso solar, con los resultados de dichos estudios se proponen estrategias y recomendaciones para el diseño del edificio y el aprovechando de la energía solar, en forma pasiva y activa, como la climatización (control solar y la selección adecuada de materiales y sistemas constructivos), iluminación natural, el calentamiento solar de agua, además de la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos. Consideradas las estrategias y recomendaciones anteriores en un caso de estudio, permite realizar un balance energético, donde se resta la cantidad de energía generada mediante el aprovechamiento integral de la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica, a la demanda de energía que requiere en el edificio del caso.

Como resultado se puede conocer el nivel de sustentabilidad energética logrado al utilizar la energía solar en forma integral, que puede ser de eficiencia, sustentabilidad o plus, además de evaluar la mitigación del impacto ambiental, en específico CO_2, los beneficios dependerán de las características del bioclima y potencial solar del lugar.

ABSTRACT

With the capability of the Sun to generate solar radiation, is considered as a renewable source that can meet much of current energy needs of the present world, including the energy needs of the buildings, topic that is develop in this article.

The use of renewable energy sources can be as active or passive way, take advantage that differs in use some kind of technology or do not use.

The proposed methodology is based on information from the environment such as the air temperature, relative humidity, wind and solar radiation, as well as information of the energetic requirements of the buildings, of the user and geographic (latitude, longitude and height), then performs a diagnosis with that information, consist in two studies: of the bioclimate and of the availability and potential of the solar resource, according to the information provided in these studies are proposed recommendations and strategies for the building design and taking advantage of the solar energy, in passive and active form, using air conditioning (solar control and the selection of suitable materials and constructive systems), natural lighting, solar water heating, also of the generation of electricity with photovoltaic systems.

Considered the previous strategies and recommendations in a study case, allows performed an energetic balance, where is subtracted the amount of energy generated by integrated use of solar energy in thermal, photovoltaic, and light way, to the energy demand required in building of the selected case.

As result you can meet the level of achieved energetic sustainability using solar energy in an integrated manner that can be of efficiency, sustainability or plus, beside to evaluate the mitigate greenhouse gas in specific CO_2, the benefits will depend on the characteristics of the bioclimate and solar potential of the place.

Palabras claves: Energía solar, bioclima, sustentabilidad energética, edificios, impacto ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

Para lograr la sensación de confort térmico y lumínico de manera parcial o total, sí se cuenta con los recursos económicos, se recurre al uso de sistemas de aire acondicionado, calefacción, ventilación mecánica e iluminación artificial, para hacer funcionar estos sistemas activos se requiere energía convencional, energía no renovable y altamente contaminante en el caso de México.

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología que permita aprovechar integralmente la energía solar, desde el diseño mismo, para la climatización pasiva de los edificios, la iluminación natural y la selección de materiales y sistemas constructivos acordes al tipo de clima, hasta su operación, a través de la generación de electricidad mediante la energía solar fotovoltaica y calentamiento de agua utilizando energía solar térmica, satisfaciendo los requerimientos energéticos del edificio de manera parcial, total o plus.

Mediante el aprovechamiento integral de la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica en los edificios, se puede lograr la sustentabilidad energética según el tipo de clima, es la hipótesis del trabajo. Debido a que el potencial del recurso solar es abundante en gran parte del mundo, mediante su aprovechamiento con un correcto diseño bioclimático, hasta la adaptación de tecnología solar como son paneles fotovoltaicos y calentadores solares, pueden llegar a reducir los consumos energéticos de electricidad y gas hasta el 100% en los edificios.

En 2010 el Consejo Estadounidense de Edificación Sustentable calcula que en promedio, la edificación eficiente reduce 30% el uso de energía, 35% las emisiones de carbono y de 30 a 50% el consumo de agua, además de que genera ahorros de 50 a 90% en el costo del manejo de los desechos[1], reafirmando la importancia de buscar alternativas para el abastecimiento de energía limpia a edificios de tipo no residencial y residencial, apoyándose de información del entorno, de una línea base de consumo de energía, usos finales de energía, etc.

2. ANTECEDENTES

Las metodologías desarrolladas para el aprovechamiento lumínico, fotovoltaico y térmico de la energía solar, se encuentran disponibles en gran cantidad de estudios, pero solo consideran una o máximo dos formas de aprovechamiento de la energía solar, algunas de las metodologías citadas en este apartado serán punto de partida para el desarrollo de este trabajo.

El término de diseño bioclimático surge en el año de 1963, expresión creada por los hermanos Olgyay donde exponen un método a través del cual el diseño arquitectónico se desarrolla respondiendo a los requerimientos climáticos específicos.

En los años 70, Everardo Hernández trabajaba sobre la factibilidad del aprovechamiento en México de la energía solar, para satisfacer requerimientos habitacionales, preocupado principalmente por la climatización pasiva de viviendas de interés social, algunos de sus proyectos se llevaron a cabo en varias partes de la República Mexicana, aunque solo enfocándose en el aprovechamiento de la energía solar en forma térmica. A través de las últimas décadas, en México se ha desarrollado una cantidad considerable de trabajos enfocados al diseño bioclimático, que se han publicado en las memorias de la Semana Nacional de Energía Solar que organiza la Asociación Nacional de Energía Solar con el objetivo general de divulgar y promover el uso de las energías renovables.

(Mueller y Kleine, 2003) mediante un proyecto para beneficiar a dos pueblos en Jujuy, Argentina, es puesto en práctica el concepto de manejo integrado de tecnologías solares térmicas, con aplicaciones en calefacción, agua caliente y cocción de alimentos, para un clima extremoso que puede variar hasta 30°C entre el día y la noche, simulan la energía para calefacción y cantidad de agua necesaria para cada edificio, utilizando el concepto de losa radiante para la climatización, colectores solares para generar agua caliente sanitaria y cocina solares con concentrador de foco fijo para cocción de alimentos. Su trabajo se limita a la integración de una aplicación para aprovechar la energía solar en forma térmica.

Unos años más tarde, (Mesa y Morillón, 2010) desarrollan metodologías para evaluar el potencial y aprovechamiento pasivo de la energía solar en entornos urbanos, tomando como caso de estudio la ciudad de Mendoza, Argentina, a través de un modelo gráfico computacional que permite calcular las áreas de las fachadas asoleadas en secciones normales a la dirección de los rayos solares incidentes sobre las mismas, para cualquier hora y día del año, calculan las superficies potencialmente captadoras del edificio, este modelo es comparado con un método analítico con una variación de resultado de 0.0002% entre el modelo gráfico y el método analítico, otra metodología que utilizan es el cálculo de una magnitud de cada componente de la radiación solar incidente directa, difusa y reflejada.

Establecen la estrecha relación que existe entre la morfología urbana con el posible aprovechamiento pasivo de la energía solar, para cubrir las necesidades en los entornos urbanos según el clima de la región, con valores de hasta el 80% en el aspecto térmico y 100% en lumínico de ahorro energético, además de cubrir el 100% de CSA, considerando el aprovechamiento de la energía solar en forma térmica y lumínica.

En 2011 en el XIX Congreso Internacional Ambiental, mediante la conferencia Casas Cero Energía (ZEH) Tecnologías verdes en la vivienda de interés social en México, expuesta por Arturo Echeverría muestra una metodología a seguir para tener casas que produzcan la misma energía que consumen, sean altamente eficientes, hagan uso de energías renovables, para lograr estos objetivos de deben considerar algunos criterios de sustentabilidad como el uso de calentadores solares, sistemas fotovoltaicos, aislamiento térmico, aparatos electrónicos eficientes y un diseño bioclimático, mejorando el confort del usuario y la reducción de uso de gas, agua y electricidad, mostrando solo dos formas de aprovechamiento de la energía solar en forma térmica y fotovoltaica. Un año más tarde Ceballos y Morillón (2012), presentan una metodología para lograr la sustentabilidad energética en una vivienda, donde consideran igualmente el aprovechamiento de la energía solar en forma térmica y fotovoltaica, el estudio expone la factibilidad que tiene lograr una vivienda de tipo net zero energy en los tres bioclimas representativos de México, bioclima cálido-húmedo, cálido-seco y templado, mostrando que al no tener un buen diseño bioclimático en un edificio se puede no alcanzar la sustentabilidad energética, además de mostrar que aunque el clima templado es el más factible para lograr la vivienda net zero energy aunque no es el que mayor ahorro puede provocar sino que el clima cálido-seco puede inclusive llegar a ser net plus energy esto porque además de autosatisfacer sus necesidades energéticas tiene excedentes de energía que pueden inyectarse a la red eléctrica nacional, además dentro del estudio muestra medidas para el uso de CSA ayudado de tecnología eficiente.

3. METODOLOGÍA

En la metodología que se desarrolla en este trabajo, se propone el uso integral de la energía solar en el edificio desde su diseño con la climatizando pasiva (control solar), selección adecuada de los materiales de construcción y un diseño lumínico correcto (iluminación natural), hasta su operación con el calentamiento de agua utilizando energía solar térmica y generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos, se espera lograr una sustentabilidad energética, es decir, que la energía necesaria para el funcionamiento de un edificio sea mayor o igual a la generada con la integración de la energía solar aprovechada en forma pasiva y activa, conservando recursos

[1] Green Building Research, US Green Building Council, USGBC, EUA, 2010

naturales como petróleo, gas, carbón, etc., que a su vez se convierte en mitigación de gases de efecto invernadero (CO_2), el nivel de sustentabilidad puede variar según los requerimientos climáticos específicos.

Figura 1. Metodología para el aprovechamiento integral de la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica en edificios

3.1 Entorno

En esta etapa se debe obtener la información general específica para cada lugar como es del tipo de usuario, del tipo y uso del edificio (línea base de consumo energético), clima y localización geográfica, con este contexto específico para cada lugar se puede realizar un diagnóstico, mediante un estudio del bioclima, y, del potencial del recurso solar, con el fin de presentar la información requerida que se propone utilizar en este trabajo para aprovechar la energía solar integrada al edificio, posteriormente se proporcionan recomendaciones y estrategias que a través de sistemas pasivos como la climatización pasiva (control solar), iluminación natural, selección adecuada de los materiales de construcción y calentamiento solar de agua CSA, así como el uso de sistemas activos para la generación de energía eléctrica mediante los sistemas fotovoltaicos SFV, se puede lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo eficiente, sustentable o plus.

3.1.1 Información general. La recopilación de información climática, geográfica, del usuario y tipo de uso del edificio de una región, proporcionan algunas de las bases de la que parte la presente metodología.

Para conocer el clima de un lugar, se deben considerar los principales parametros que intervienen: temperatura del aire, humedad, viento y radiación solar. Los datos geográficos a considerar son latitud, longitud y altura.

El usuario (seres humanos, plantas y/o animales) y tipo de uso que se le da al edificio son parametros importantes que deben tomarse en cuenta, algunos factores que pueden intervenir referente al usuario es su edad, masa, estatura, tasa metabólica y aislamiento térmico proporcionado por la ropa. El tipo de edificio se puede clasificar según las actividades que se desarrollan durante el día, además de que se puede clasificar en edificio de uso residencial y no residencial.

Figura 2. Información general y específica del entorno

3.1.2 Diagnóstico. Se realiza un diagnóstico de la información general, proporcionando un análisis de la temperatura del aire y humedad relativa mediante el estudio del bioclima y un análisis del recurso solar, dando como resultado el conocimiento del potencial del recurso solar así como de la trayectoria solar, y un diagrama de isorrequerimientos que indica las condiciones horarias de frío, calor y confort de la región.

Figura 3. Esquema del diagnóstico: diseño bioclimático y radiación solar

3.1.2.1 Diseño bioclimático. El diseño bioclimático es el conocimiento que indica cuando aprovechar o evitar las condiciones del clima de una región ayudándose del uso de materiales de construcción, orientación, vegetación, etc., que constituyen los edificios y sus alrededores, con el objetivo de mantener o provocar confort higrotérmico en sus ocupantes con la menor cantidad de energía convencional utilizada posible. El estudio del bioclima es una herramienta del diseño bioclimático, que analiza las temperaturas y humedades horarias de una región, información que permite elaborar un diagrama de isorrequerimientos, donde se pueden identificar las sensaciones de confort, calor o frío que presenta el usuario, dando oportunidad de establecer estrategias de climatización para mantener o lograr el confort higrotérmico con el menor uso posible de energía convencional, como por ejemplo cuando se presentan condiciones de calor y confort utilizar control solar así como aprovechar el uso de la iluminación natural indirecta, en los periodos de frío es conveniente la iluminación natural directa que además sirve como sistema pasivo de climatización, y, con la utilización de los materiales de construcción que dependiendo de las necesidades de climatizar mediante sus características específicas como inercia térmica pueden provocar condiciones de comodidad higrotérmica en los usuarios.

Figura 4. Diagrama con las etapas del estudio del bioclima

3.1.2.2 Radiación solar.

Figura 5. Esquema de la radiación solar: análisis de la trayectoria solar y evaluación del recurso solar

La energía solar aprovechada en forma activa como generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos y en forma pasiva mediante climatización (control solar), iluminación natural, calentamiento solar de agua, selección de materiales de construcción, etc., dependen de la disponibilidad de la radiación solar que varía según el tipo de clima, localización geográfica, etc.

Primeramente se debe realizar un estudio del comportamiento solar para elaborar un análisis de la trayectoria solar, posteriormente realizar una evaluación del recurso solar que permitirá conocer el potencial del recurso.

3.1.3 Estrategias y recomendaciones (climatización y diseño). En la actualidad existen diversas tecnologías solares que pueden ser aprovechadas para diferentes aplicaciones como el calentamiento solar del agua, generación de electricidad, tratamiento de aguas residuales, estufas solares, refrigeración, etc., es posible utilizar cada una de las tecnologías solares aunque dependerá del espacio disponible, recursos económicos, disponibilidad del recurso solar, necesidades a cubrir, entre otros factores. Se selecciona para este trabajo la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos para el aprovechamiento de la energía solar en forma activa, así como se elige el calentamiento solar de agua aprovechando la energía solar en forma pasiva integrando además la iluminación natural, climatización pasiva (control solar) y el uso de materiales de contrucción que favorezcan al confort higrotérmico de sus ocupantes dentro de las estrategias y recomendaciones.

Figura 6. Estrategias y recomendaciones para climatización y diseño de los edificios

Figura 7. Esquema con algunas de las principales aplicaciones de la tecnología solar

3.1.3.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva.

1.0 Climatización pasiva. Una de las estrategias para captar o proteger de la energía solar en forma pasiva es mediante el control solar. Para diseñar dispositivos de control solar se requiere conocer las sensaciones higrotérmicas de confort, calor y frío proporcionadas por el diagrama de isorrequerimientos, así como calcular la ruta solar a lo largo del día que se puede determinar mediante la gráfica solar.

2.0 La iluminación natural. Tiene como objetivo principal el uso racional de la energía en los edificios provocando un ahorro en el consumo de energía eléctrica. Para conocer la distribución de la luz natural exterior en los edificios, se requiere información medida o estimada de la iluminancia del Sol, que muestra la disponibilidad de ese recurso en un determinado lugar, y vinculado al conocimiento de las sensaciones horarias de frío, calor y confort proporcionados por el diagrama de isorrequerimientos, es posible definir como aprovechar la iluminación natural.

3.0 Calentamiento solar de agua. El calentamiento de agua con energía solar permite conservar recursos naturales no renovables como el gas natural, carbón, leña, etc., dependiendo del tipo de clima por ejemplo en un cálido húmedo o cálido seco puede no llegar a ser necesario en determinados horarios y meses, pero en climas como los semi fríos, fríos, templados, etc., puede reducir el consumo de fuentes naturales no renovables. Se requiere conocer el potencial del recurso solar así como la línea base por consumo final de gas, donde el calentamiento de agua representa un porcentaje de ese consumo final.

4.0 Materiales de construcción. Las ganancias y perdidas de calor a través de los materiales de construcción que conforman los edificios, como techos, muros, ventanas y puertas, pueden representar los mayores consumos de energía para cubrir las necesidades por frío o calor dentro del edificio con el uso de aire acondicionado, ventilación y calefacción, debido a ello la importancia de realizar una selección apropiada de los materiales de construcción y realizar una evaluación del comportamiento térmico del edificio para conocer como se comportan dichos materiales.

3.1.3.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa.

5.0 Sistemas Fotovoltaicos. Se propone aprovechar la energía solar en forma activa mediante los sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, dependiendo de factores especificos del clima como la cantidad de radiación solar en la región,

condiciones del cielo, etc., con el fin de cubrir la línea base por consumo final de energía eléctrica mediante los SFV pero antes considerando medidas de ahorro que pueden llevarse a cabo mediante el uso de tecnología eficiente además de las medidas mencionadas en el apartado de aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva.

3.2 Balance de energía

Para esta fase del trabajo se efectúa un balance de energía en el que interactúan por un lado los ahorros de energía utilizando la iluminación natural, calentamiento solar de agua, climatización pasiva (control solar), correcta selección de materiales de construcción del edificio y generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos ***(generación de energía)*** contra la ***demanda de energía*** provocada por el uso de aparatos eléctricos, luminarias y gas para el calentamiento de agua, información que se obtiene de una línea base de consumo final de energía. Mediante la expresión de Sartori et al. (2010), se tiene que la diferencia de la demanda de energía menos la energía generada es mayor o igual a cero:

$$\text{Grado de Sust. Energética} = \text{Demanda de Energía} - \text{Generación de Energía} \geq 0 \quad (1)$$

Con un valor negativo en el resultado se tiene que las medidas de generación de energía térmica, lumínica y fotovoltaica propuestas, no son lo suficientes como para alcanzar la sustentabilidad energética, se recomienda realizar ajustes en la generación de energía solar con sistemas pasivos y activos, con un resultado igual a cero es aprobatoria la sustentabilidad energética alcanzando un Net Zero Energy mientras que con un resultado mayor a cero se medirá el excedente que se logra de energía (Plus Energy).

3.2.1 Beneficios ambientales. Para esta etapa, a partir del conocimiento del consumo final de energía promedio de esa región según el tipo de uso que se le dé al edificio se pueden calcular las emisiones de CO_2 (Gas de efecto invernadero) mitigadas al aprovechar integralmente la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica en un edificio, considerando un factor de conversión para generación de electricidad de 0.385 $KgCO_2$ equivalentes por kWh así como se considera un factor de conversión por el uso de GLP de 0.234 $KgCO_2$ por kWh/Kg[2].

4. RESULTADOS

Se llevó a cabo la aplicación de la metodología en un caso de estudio para el aprovechamiento integral de la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica en una vivienda de interés social ubicada en Texcoco, Estado de México, clima templado, con latitud de 19°30´20" Norte, longitud de -98°52´55" Oeste y una altura de 2250 metros sobre el nivel del mar, obteniendo los siguientes resultados:

1.0 Climatización pasiva: se obtuvieron los ángulos óptimos para control solar.

Tabla 1. Ángulos óptimos para control solar en Texcoco de Mora

Dispositivo / Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Alero	76°	60°	49°	10°
Partesol	10°	20°	10°	0°

Fuente: Método de modelo de diseño y evaluación solar (Mejía y Morillón, 2004)

2.0 Iluminación natural. Para mostrar algunos de los beneficios que provoca el uso adecuado de la iluminación natural, se propone su utilización en un horario de 6:00 a 9:00 horas cuando se disponga del recurso solar, evitando las ganancias solares. Las horas en las que se dispone irradiancia solar en ese horario para Texcoco da un total de 1251 horas, se multiplican por 60 W de potencia correspondiente al utilizar un foco incandescente, dando como resultado 75.06 kWh/anual que podrían ahorrarse al aprovechar la iluminación natural al 100 % en el horario seleccionado.

3.0 Calentamiento solar de agua (CSA). Al utilizar un calentador solar de agua se dejan de consumir 440.65 lt. GLP/año equivalente a 238 Kg GLP considerando un factor de conversión de 1 lt. GLP igual a 0.54Kg GLP, se toma como línea base de consumo final por gas para la Ciudad de México de 388 Kg/año (Morillón, 2009), por tanto, con el colector solar plano propuesto para este trabajo de 2 m^2 y un termotanque de almacenamiento de 180lt, es posible cubrir gran parte de energía requerida para calentamiento de agua. Adicional a la medida del CSA, si se utiliza un boiler instantáneo termostático con una eficiencia de hasta el 92% (NOM-003-ENER-2011), que al sumarlo con el ahorro energético del CSA tendríamos una disminución de consumo de gas de 351 Kg/año GLP, dejando solo 29 Kg/año para cubrir con gas equivalentes a 398.7 kWh/año, mostrando un ahorro de hasta el 92.36% de consumo de gas tomando como referencia la línea base de consumo final por gas de 388 Kg/año.

4.0 Materiales de construcción. Se realiza una evaluación de las ganancias térmicas por radiación y conducción de la envolvente de la vivienda, dando como resultado que la ganancia de calor total de la vivienda proyectada es de 819.87 W, por lo tanto es 520.26 W más eficiente respecto a la vivienda de referencia que consume 1340.13 W según la NOM-020-ENER-2011, la disminución de las ganancias por radiación en la vivienda proyectada fue del 100% por tanto quedo en 0 W debido a la consideración de los aleros de protección en las ventanas con los ángulos óptimos calculados en el apartado de Climatización pasiva: diseño de dispositivos para control solar para las fachadas norte y sur de 76° y 49° respectivamente, para Texcoco.

Tabla 2. Ahorro de energía eléctrica anual mostrado en la vivienda proyectada respecto a la de referencia*, por la disminución del uso de aire acondicionado, para Texcoco

Diferencia entre la vivienda proyectada (+) y la vivienda de referencia (kWh eléctricos)	Total de horas de calor anual (se requiere aire acondicionado)	Consumo de kWh/anual eléctricos evitados en la vivienda proyectada
0.1665	183	**30.47**

Fuente: Elaboración propia con datos de la evaluación térmica y del diagrama de isorrequerimientos;*Vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011

[2] Fondo Europeo de Desarrollo Regional

5.0 Sistemas fotovoltaicos. El consumo diario de energía óptimo para la ciudad de México es de 2278.68 Wh/día (Ceballos y Morillón, 2012), adicional a eso se conoce el potencial del recurso solar existente en Texcoco. Se selecciona un método para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (Sánchez, 2015), que se basa en el cálculo del número de módulos necesarios en relación al consumo eléctrico del mes menos favorable, como resultado de la suma de la energía generada cada mes se obtiene la energía neta generada anualmente por el sistema fotovoltaico, para Texcoco se generan 1410.18 kWh/año.

Tabla 3. Balance de energía que se obtiene al restar la demanda energética anual eléctrica y de gas dé la energía generada aprovechando la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica, para el caso de estudio en Texcoco

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	**-831.72**
Gas para el calentamiento de agua**	**-398.7**
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	**+1410.18**
Energía por la envolvente del edificio (+/-)******	**+30.47**
Energía ahorrada con iluminación natural*******	**+75.06**
Balance de Energía	**+285.29**

Fuente:*Considerando consumo final óptimo para la ciudad de México del trabajo Metodología para la sustentabilidad energética (Ceballos y Morillón, 2012); **Aplicando el uso de CSA y boiler eficiente quedando a cubrir con gas 29Kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388 Kg/año para la ciudad de México (Morillón, 2009); ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Texcoco (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011 *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Como se obtuvo un balance energético con resultados positivos para Texcoco (Tabla 3), los 285.29 kWh/anuales generados excedentes a lo requerido por la vivienda para funcionar normalmente, se considera su equivalencia en Kg de CO_2 para sumarse a la mitigación de CO_2, con factor de conversión de 0.385 que da como resultado 109.8 que al sumar a los 1710.24 Kg de CO_2 evitados tomando como referencia la línea base para la ciudad de México con 1200 kWh/anual por consumo eléctrico y 388 Kg de gas por calentamiento de agua (Morillón, 2009), da como resultado 1820 Kg de CO_2 anuales mitigados por vivienda en Texcoco con las medidas propuestas en este trabajo.

5. CONCLUSIONES

El aprovechamiento de las energías renovables, como puede ser mediante el uso de la energía solar en forma pasiva y activa, deben ser recursos imprescindibles a considerarse actualmente desde la construcción hasta la operación de los edificios, para reducir de manera parcial o total el uso de recursos naturales no renovables para la generación de energía que abastezca las necesidades energéticas del edificio.

Algunos de los beneficios que se pueden obtener al utilizar la energía solar se muestran en el caso de estudio de Texcoco, Estado de México, donde al considerar las estrategias y recomendaciones propuestas en este trabajo para aprovechar la energía solar en forma térmica, lumínica y fotovoltaica se logra conseguir la sustentabilidad energética de nivel plus cubriendo así el 100% de las necesidades energéticas en una vivienda de interés social y generando 23% más energía de la requerida para su funcionamiento en condiciones normales.

El presente trabajo se encuentra en desarrollo, así como se considera que el nivel de sustentabilidad energética puede variar según las condiciones climáticas específicas, por tanto se recomienda aplicar la metodología propuesta en casos de estudio con otros tipos de climas para conocer un panorama específico por región climática que puede lograrse considerando el aprovechamiento integral de la energía solar de forma térmica, lumínica y fotovoltaica en los edificios.

Agradecimientos a CONACYT por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Mueller C. y Kleine H. (2003), Aprovechamiento integrado de energía solar para calefacción de ambientes, agua caliente y cocción comunitaria en el altiplano argentino, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 7, Nº 1, 2003.

Morillón G. (2004). Atlas del bioclima de México, Serie investigación y desarrollo, UNAM, SID/644, p.11 - 30.

Mejía D. y Morillón D. (2004), Modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios, Tesis UNAM.

Andrade A. y Morillón D. (2008), Diagnóstico del comportamiento térmico, energético y ambiental de la vivienda de interés social en México: retrospectiva y prospectiva (2000-2012), CYTED e INETI, ISBN 978-972-676-209-6, Portugal.

Morillón D. (2009), Línea base para la vivienda sustentable en México: GEI, Informe Técnico, Banco Mundial, México.

Mesa A. y Morillón (2010), Métodos para evaluar el potencial y aprovechamiento pasivo de la energía solar en entornos urbanos. Caso de estudio: Área metropolitana de Mendoza, Argentina, Serie investigación y desarrollo, UNAM, SID/665, p.75 107.

Preciado O. y Morillón D. (2010), Metodologías para la evaluación del potencial de iluminación natural y su aprovechamiento en los edificios: caso de estudio, Pachuca, Hidalgo, Memorias de la XXXIV Semana Nacional de la Energía Solar organizada por la Asociación Nacional de Energía Solar, 2010.

Ceballos F. y Morillón D. (2012), Metodología para la sustentabilidad energética: la vivienda Net Zero Energy, Tesis UNAM, México.

Duffie J. and Beckman W. (2013), Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley Interscience, New York, USA.

Berge M. and Matishen H. (2015), The suitability of air-heating in residential passive house buildings from the occupants' point of view – a review, Advances in Building Energy Research, ISSN 1751-2549, Vol. 9, No. 2, p.175–189.

NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.

NOM-020-ENER-2011, Eficiencia Energética en Edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL GRADIENTE TÉRMICO DEL CARIBE MEXICANO

Estela Cerezo Acevedo, Marcelo H. Sánchez Núñez, Víctor M. Romero Medina, Juan F. Bárcenas Graniel
Departamento de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad del Caribe,
S.M. 78, Mza. 1, Lote 1, Esq. Fracc. Tabachines,
Cancún, Quintana Roo, C.P. 77509, México,
Tel. (998) 881 44 23,
ecerezo@ucaribe.edu.mx

Francisco Ruiz Rentería, Edgar Escalante Mancera, Miguel Gómez Reali
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
Universidad Autónoma de México, Prolongación Av. Niños Héroes s/n
Domicilio conocido, Puerto Morelos, Q Roo, C.P. 77580, México
Tel. (998) 8710009,
renteria@cmarl.unam.mx

RESUMEN

Actualmente son pocos los países que utilizan la energía térmica de sus mares, por lo que este proyecto forma parte de un esfuerzo, conjunto llevado a cabo por el grupo de Energía Térmica del Océano del Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano (CEMIE-O) para aprovechar esta energía.

Los océanos cubren un poco más del 70% de la superficie de la tierra. Esto los hace el colector y sistema de almacenamiento de energía solar más grande del mundo. En la región de los océanos tropicales entre 15° de latitud norte y 15° de latitud sur la temperatura promedio en la superficie es de 28°C en un espesor de 35 a 100 m durante todo el año y a profundidades de 700 m a 1000 m se encuentran temperaturas de 4.4 °C, en la figura 1 se observan las diferencias de temperaturas entre la superficie y 1000 m de profundidad en los océanos. Los sistemas de Conversión de Energía Térmica del Océano (CETO o de sus siglas en inglés OTEC) aprovechan estas diferencias de temperaturas para generar electricidad. Las estimaciones del potencial energético señalan que la energía aprovechable debida el gradiente térmico marino es de 10,000 TWh/año siendo la potencia técnicamente disponible en el Caribe Mexicano de 2,000 MWe.

En este trabajo se presentan las consideraciones llevadas a cabo para la selección de: tipo de planta, componentes de la planta y fluido de trabajo así como también las primeras evaluaciones termodinámicas para la realización de la ingeniería básica de un prototipo del sistema OTEC que aproveche el gradiente térmico del mar Caribe para producir 100We.

ABSTRACT

Nowadays few countries make use of the thermal energy contained in their Oceans. This project is part of an effort carried out by the OTEC group of the Mexican Center of Innovation in Ocean-Energy to make the most of this energy.

Oceans cover little more than 70% of the surface of the earth. This makes them the world´s largest collector and storage system of solar energy. Within the tropical oceans, between 15° north latitude and 15° south latitude the average surface temperature is 28°C in a layer of 35 - 100 m thick throughout the year. At depths of 700 to 1000 m the temperature is about 4.4°C. Figure 1 shows the temperature gradient between surface and 1000m depth in the world ocean. Ocean Thermal Energy Conversion systems use these temperature differences to produce electricity. Estimates indicate that the potential energy due to marine thermal gradient is 10,000 TWh/y and in the Mexican Caribbean there are 2,000 MWe.

This paper discusses the considerations used to select the type of generating plant, it´s components and working fluid as well as the first thermodynamic evaluations to conduct basic engineering of an OTEC prototype for the Mexican Caribbean thermal gradient to produce 100We.

Palabras claves: OTEC, CETO, Energía Térmica del Océano, Rankine, Prototipo.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Vega, la distribución vertical de la temperatura del Océano se puede representar como dos capas separadas por una interfaz. La capa superior es calentada por el sol y se mezcla hasta una profundidad de unos 100 m por el movimiento de las olas. La capa inferior se compone de agua fría formada en altitudes altas. La termoclina o interfaz a veces es marcada por un cambio brusco de temperatura pero generalmente el cambio es gradual. Esto implica que hay dos depósitos que proporcionan una fuente y un sumidero de calor requeridos para el funcionamiento de un motor térmico.

Evaluaciones muestran que las plantas OTEC instaladas en los océanos tropicales pueden ser operadas continuamente, sin efectos medioambientales, si la energía generada es limitada a 0.19 MWe/km^2. Esta cantidad de energía corresponde a un 0.07% de la energía solar absorbida convertida en electricidad. La idea de explotar la energía térmica de los mares la conceptualizó el físico francés Arsène d'Arsonval desde 1881 y los trabajos de George Claude que se llevaron a cabo de 1925 a 1940, la materializaron. Actualmente existen plantas de 100 kWe en operación, entre las cuales podemos mencionar las plantas OTEC de Okinawa en Japón y Makai ubicada en Hawaii, la cual provee electricidad a 120 familias.

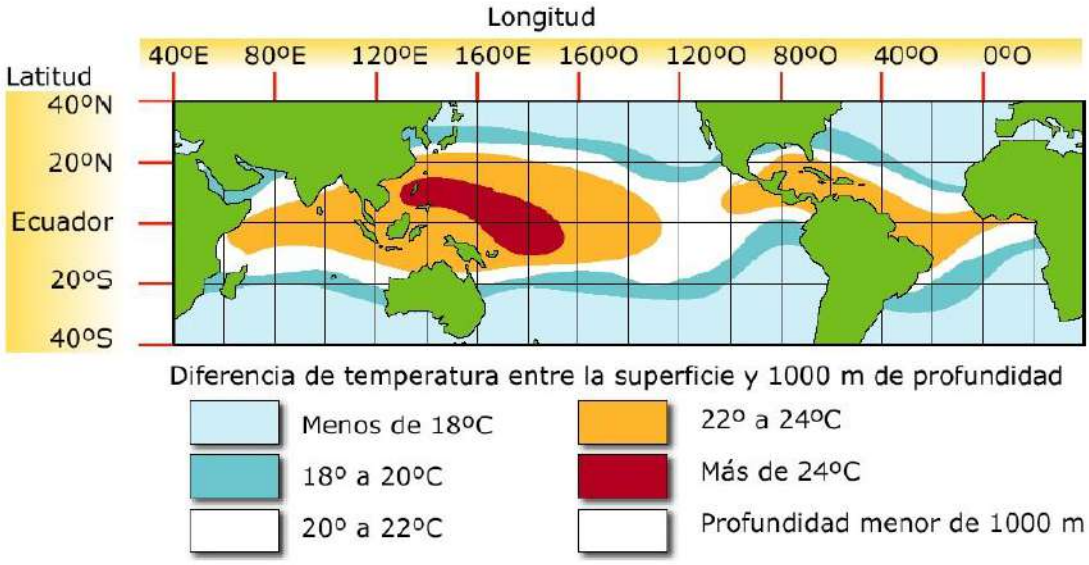


Figura.1. Mapa de gradientes térmicos marinos.

SELECCIÓN DEL TIPO DE PLANTA.

Existen, en general dos tipos de plantas, ambos funcionan con el ciclo termodinámico Rankine pero se diferencian si el ciclo es cerrado o abierto. En el ciclo abierto (OTEC-CA) el fluido de trabajo es el agua de mar, esta es bombeada a una cámara en la cual la presión se reduce mediante una bomba de vacío o eyectores hasta un valor suficientemente bajo para causar evaporación (5.63 kPa, 0.06 atm). El vapor a baja presión, después de pasar por la turbina, puede en principio ser descargado directamente en el océano como se observa en la figura 2. Sin embargo también puede ser enviado a un condensador enfriado por agua de mar profunda, generando una fuente de agua desalinizada.

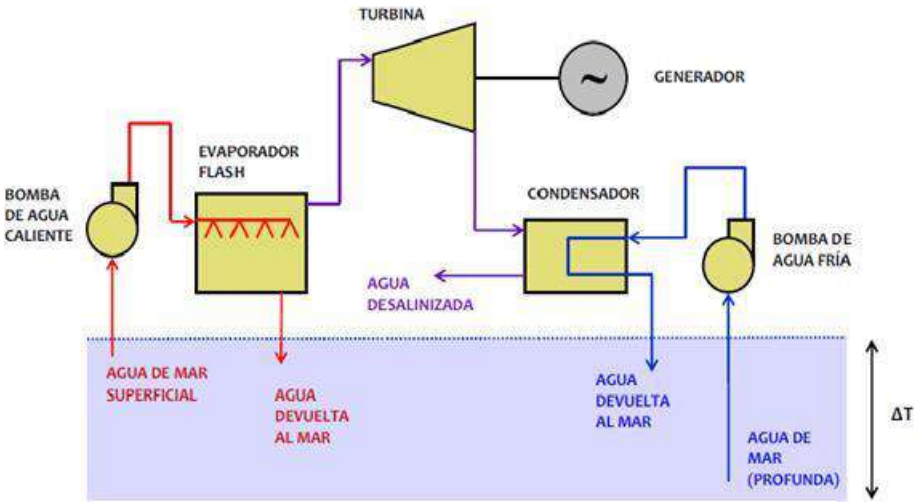


Figura 2. Planta OTEC ciclo Abierto. Fuente: Soto, A. R. A. (2012)

El Ciclo OTEC Cerrado (OTEC-CC) es básicamente igual al ciclo Rankine empleado en las plantas termoeléctricas, en estas el vapor condensado regresa a la caldera después de mover los álabes de la turbina. La diferencia recae en que el OTEC-CC trabaja con fluidos de bajo punto de ebullición, como el amoníaco (-33.34 °C), propano (-42 °C) o refrigerantes con presiones de trabajo del orden de 0.5 a 1 MPa.

Para seleccionar el tipo de planta OTEC adecuado para nuestro prototipo, se analizaron las ventajas y desventajas de ambos ciclos. Se seleccionó el ciclo OTEC-CC por: las bajas diferencias de presiones del ciclo abierto para operar la turbina (2.8 kPa) comparadas con 270 kPa para el ciclo cerrado usando amoniaco como fluido de trabajo, la baja eficiencia del ciclo y los grandes volúmenes específicos hacen que se requieran turbinas muy grandes, lo que es una limitación constructiva en plantas de tamaño comercial, además, el vacío necesario para evaporar y eliminar los gases reducen la potencia neta de salida del ciclo. Cabe señalar también que económicamente presenta mayores beneficios ya que el agua del mar profundo mantiene su baja temperatura (10-12°C) y sus propiedades minerales únicas después de usarse en la generación de energía, esta agua puede ser utilizada en la agricultura, la industria, la refrigeración y otros campos. Lo cual generará también un beneficio social y económico. La investigación continúa en múltiples usos de esta agua, abriendo nuevas formas de aprovechar los recursos y la energía del mar. Actualmente las plantas de mayor potencia funcionan con ciclo cerrado.

De esta selección se tiene que los componentes principales que conformarán el prototipo a construir son: 2 Intercambiadores de calor, 1 turbina-generador y 1 bomba.

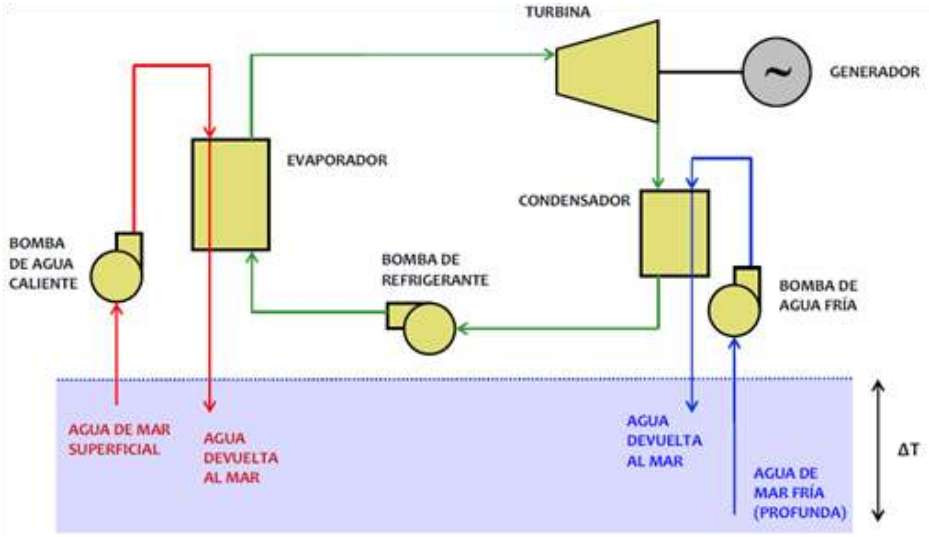


Figura 3. Planta OTEC ciclo cerrado. Fuente: Soto, A. R. A. (2012)

GRADIENTE TÉRMICO DEL CARIBE MEXICANO

En 2014, J. Bárcenas obtiene 2,000 MWe de potencia disponible en el Caribe Mexicano, siendo los lugares OTEC potenciales: Isla de Cozumel, Punta Allen, Tulum, Sian Ka'an, Xcalac, Mahahual y Banco Chinchorro. Todas estas zonas cumplen con los gradientes térmicos mayores o igual a los 20°C y se encuentran a una distancia de la costa menor o igual a los 10 km. Así mismo se tiene un promedio anual para la temperatura mínima a 700 m de 7.69°C y la máxima superficial de 27.46°C.

SELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO.

La selección del fluido de trabajo es muy importante porque condiciona directamente las dimensiones de los intercambiadores y de la turbina. Los criterios de selección varían de acuerdo a los intereses de cada grupo de investigación. Sin embargo, de acuerdo a Marchand (1985), el fluido, por el bajo ΔT debe tener una presión de vaporización y de condensación aceptable resultado de un compromiso entre: una presión lo suficientemente alta para que los flujos volumétricos en circulación permanezcan dentro de un rango aceptable y una presión moderada para no penalizar el dimensionamiento mecánico de los aparatos. De esta forma la selección del fluido de trabajo resulta de las consideraciones relativas a sus propiedades termodinámicas y térmicas que afectan a la turbina y los intercambiadores de calor y de consideraciones relativas a la facilidad de empleo y a la seguridad (toxicidad y flamabilidad). Todo esto se traducirá evidentemente en los costos del ciclo cerrado. Los fluidos que han sido más utilizados son: Los refrigerantes de masa molecular elevada como son: R-12, R-114, R-22, R-32, R-134a, R-152a, R-410a, entre otros. Hidrocarburos con masa molecular media: propano, butano y el amoniaco.

Para el dimensionamiento de la turbina se busca minimizar el flujo volumétrico para reducir la sección de los álabes y de la tubería de admisión [Marchand, 1985]. Este debe ser inversamente proporcional al producto de la presión (P_v), entalpía de vaporación, (h_{lg}) y el peso molecular (M). Un valor máximo de este producto B, le corresponde el mínimo volumen requerido para la turbina, ductos y válvulas asociadas [Avery 1994].

$$B = P_v \Delta h_{lg} M \quad (1)$$

Para el dimensionamiento de los intercambiadores, se busca disminuir su superficie de intercambio, que se obtiene de la fórmula siguiente:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U_o \Delta T_m} \quad (2)$$

Donde: $\dot{Q}$ = flujo de calor (W). U_o = Coeficiente global del intercambiador (W/m^2 °C). A = Área del intercambiador (m^2).

Por lo que se debe disminuir la resistencia térmica R_o ($1/U_o$) entre la pared y el fluido. Para la condensación del vapor en tubos verticales u horizontales de diámetro D, el coeficiente de calor h puede ser expresado por la relación de Nusselt [Avery, 1994].

$$h = \left[\frac{k^3 \rho^2 h_{lg}}{D\mu\Delta T}\right]^{1/4} \quad (3)$$

Donde k es la conductividad térmica (W/m°C), ρ densidad del líquido (kg/m^3) y μ viscosidad dinámica. Para una temperatura dada y diámetro de tubo se tiene,

$$h = constante \left(\frac{k^3 \rho^2 H_{lg}}{\mu}\right)^{1/4} = constante\ x\ \varphi \quad (4)$$

Un máximo valor de φ está asociado con una mínima área de intercambiador de calor.

Se realizó una tabla de valor, para los refrigerantes ecológicos: R-134a y R-152a, y R-410a considerando los factores: GWP (Global-Warming Potencial), φ, β y costos.

Tabla 1. Propiedades de fluidos de trabajo.

PROPIEDAD	R-134a	R-152a	R-410a
β	9,448,719.00	8,557,000.00	16,970,000.00
ϕ	172.6	200.00	198.00
GWP	1430	140	2088
Flamabilidad	2	2	1
Toxicidad	A	A	A
Costos [$/kg]	128.01	93.5	132.15

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 podemos observar que, de acuerdo a las ponderaciones asignadas, el mejor refrigerante para este estudio es el R-152a.

Tabla 2. Calificaciones.

Factor	**Calificación**		
	R-134a	R-152a	R-410a
β	10.60	0.00	100.00
ϕ	0.00	100.00	92.70
GWP	33.78	100.00	0.00
Costos [$/kg]	10.71	100.00	0.00
TOTAL	12.78	55.00	48.18

Fuente: Elaboración propia.

EVALUACIONES TÉRMICAS.

A partir del conocimiento del fluido de trabajo se realizaron las primeras evaluaciones del ciclo termodinámico OTEC-CC considerando las siguientes suposiciones: Condiciones estacionarias de operación. Los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes. Se consideran la turbina y la bomba isentrópicas. El agua de mar a la entrada del evaporador tiene una temperatura de 25°C por lo cual consideramos que vapor saturado de 152a sale del evaporador a T =20°C. El agua de mar a la entrada del condensador tiene una temperatura de 5°C por lo cual consideramos que a esta temperatura el fluido de trabajo entra al condensador a T =10°C.

Las evaluaciones térmicas se realizaron con el programa Engineering Equation Solver (EES), en la tabla 4 y figura 4 se muestran los resultados obtenidos para producir 100 We más el 2% que se le suministrará a la bomba.

CONCLUSIONES.

Existen 10,000 TWh/año de energía térmica en los océanos que podrían ser utilizados; en el Caribe Mexicano específicamente se cuentan con de 2,000 MWe, siendo los lugares OTEC potenciales: Zonas en la Isla de Cozumel, Punta Allen y Tulum, Sian Ka'an, Xcalac, Mahahual y Banco Chinchorro. De acuerdo al perfil de temperatura del Caribe Mexicano se determinó que las condiciones iniciales de temperaturas son: 25°C para el agua de mar superficial y 5°C a 700 m de profundidad

En este trabajo se seleccionó un sistema OTEC de ciclo cerrado por las dimensiones esperadas de la turbina y de acuerdo a las ponderaciones asignadas el mejor fluido de trabajo resultó ser el R-152a además de ser compatible con el cobre, material de la tubería y equipo que se tiene planeado utilizar.

El análisis de los fluidos para la selección del fluido de trabajo y las evaluaciones termodinámicas se llevaron a cabo con el programa EES ya que cuenta con una gran base de datos de fluidos y sus propiedades termofísicas.

Como era de esperarse la eficiencia máxima es muy baja (η = 6.7%) para este tipo de plantas ya que la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero de calor es muy pequeña (20°C), por lo tanto su eficiencia térmica será mucho menor (η = 3.3%) en comparación con otras plantas que utilizan el ciclo Rankine, como son las termoeléctricas; sin embargo, cabe resaltar que no se consumen combustibles fósiles y la fuente de calor es gratuita e inagotable. Así mismo se observó que se utilizaría solamente el 2% de la potencia producida por el generador para alimentar a la bomba.

Con los datos obtenidos en este trabajo se llevará a cabo el diseño y construcción de los componentes del prototipo OTEC-CC seleccionado.

Tabla 3. Resultados del ciclo OTEC-CC.

Eficiencia de Carnot (%)	6.7
Eficiencia térmica (%)	3.3
P2 (kPa)	513.6
P1 (kPa)	373.3
x	0.987
flujo másico (kg/s)	0.01568

Fuente: Elaboración propia.

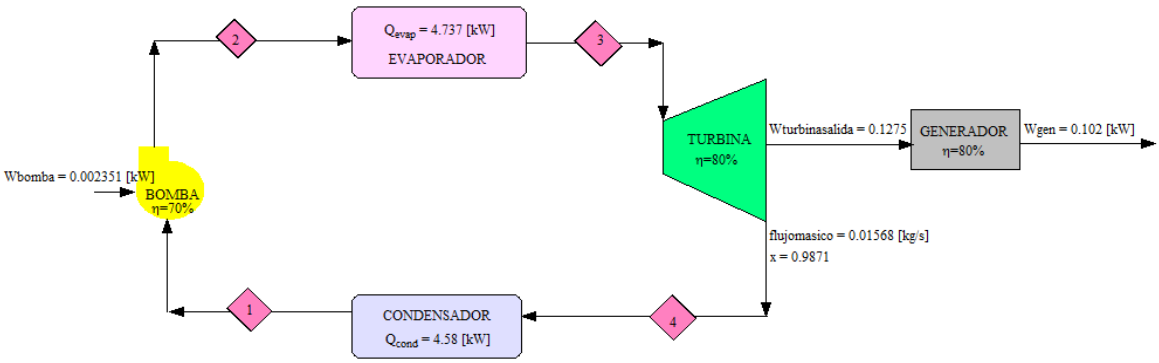


Figura 4. Diagrama del Ciclo OTEC cerrado.
Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS.

Avery, William H. y Wu, Chin. (1994). Renewable energy from the ocean: a guide to OTEC. U.S.A.: Oxford University Press. Research Triangle Institute.

Bárcenas, G. J. F. (2014). Evaluación del potencial energético renovable del Caribe Mexicano. Tesis de maestría no publicada, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México, D.F. México.

Çengel, Y. A. (2012). Termodinámica. (7° ed.). Mc Graw Hill. México, D.F. México.

Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Consultado en http://www.energy.gov/eere/energybasics/articles/ocean-thermal-energy-conversion-basics

Kempener R. & Neumann F. (2014). Ocean Thermal Energy Conversion-Technology Brief. International Renewable Energy Agency

Marchand. P. (1985). L'énergie thermique des mer. Francia. Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la mer IFREMER. ISBN 2905434.05.8

Masatsugu A & Tadayosi T. (2006). Open-Cycle OTEC Systems with Freshwater Product: Effects of Noncondensable Gases on Performance of Condenser. *Electrical Engineering in Japan 154*(1), 1021–1026.

Mc Gowan, J. G. (1976), Ocean thermal energy conversion—A significant solar resource. *Solar Energy 18*(2), 81-92.

Soto, A. R. A. (2012). Aumento de eficiencia de Centrales termoeléctricas y nucleares usando energía océano térmica. Tesis de maestría no publicada, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica De Chile, Santiago de Chile, Chile.

S.A. Klein and F.L. Alvarado. (1992). Engineering Equation Solver EES Manual. Chart Software. Middleton, USA.

Twidell John y Weir, Tony (2006) Renewable Energy Resources, (2a ed.). Taylor and Francis. USA

Vega L. A. (2012). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

COMPARACIÓN DE UN MODELO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN VERTEDORES.

Román García Nava y Apolonio Corona Ramos
División de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de Puebla, Antiguo camino a la resurrección 1002-A, Puebla, Puebla, 72300, México,
0442221189273, romangarcianava@yahoo.com.mx

Rafael Albavera Salgado
División de Energías Renovables, Universidad Tecnológica de Puebla, Antiguo camino a la resurrección 1002-A, Puebla, Puebla, 72300, México,
0442227325158, albaverar@hotmail.com

RESUMEN.

En el siguiente trabajo se presenta la solución numérica de las ecuaciones de balance de masa y momentum que modelan el comportamiento de flujos con superficie libre, las características del fluido en movimiento se determinan mediante el modelo de turbulencia conocido como k-ε. Los resultados obtenidos se comparan con ciertos datos publicados en la literatura. En particular con el modelo de la presa de Aguamilpa, cabe mencionar que para calibrar los resultados numéricos nos basamos en un modelo experimental ubicado en la ciudad de Cuernavaca.

La simulación se lleva a cabo, utilizando como base el enfoque numérico originalmente propuesto por B. Shoenung. Ref. /tesis /. El dominio de estudio en este trabajo, tiene una malla rectangular de 30x60 nodos.

ABSTRACT

This work gives the numerical solution of elliptic partial differential equations of mass and momentum balance for two phase flows with free surface, in this work the mean characteristics are find using a two equations turbulence model (k-ε), the discretization of equations is through finite volume formulation in order to solve them for this flow. The results obtained are compared with some data published in the literature . In particular the model of the dam Aguamilpa worth mentioning that to calibrate the numerical results we rely on an experimental model located in the city of Cuernavaca.

The simulation is carried out , using as a basis the numerical approach originally proposed by B. Shoenung . Ref . / Thesis / . The domain of study in this paper, has a 30x60 rectangular mesh nodes.

Introducción.

Los problemas que actualmente se presentan en las presas hidráulicas son enormes, siendo uno de los principales la erosión por cavitación en sus avenidas, ya que cuando este fenómeno aparece provoca la destrucción de grandes presas ocasionando grandes gastos, por lo que se hace necesario tener un conocimiento más profundo sobre los fluidos en movimiento y sus efectos en este tipo de equipos.

Para efectuar un análisis adecuado de la incorporación de aire, en flujos con superficie libre como es el caso de los vertedores de las presas hidráulicas, es necesario tener presente la interacción existente entre el flujo líquido y la masa de aire, así como también los diferentes mecanismos de incorporación por efecto turbulento en la interfase. No obstante que el aereador del vertedor de la presa hidráulica Aguamilpa fué estudiado en 1993, ref./7/, se consideró oportuno estudiarlo nuevamente, pero ahora con un modelo numérico, con el objeto de tener un marco de comparación con los registros del modelo físico de la presa mencionada, para así poder establecer ciertas bases computacionales para el análisis de este tipo de dispositivos.

El método numérico que se utiliza en este trabajo para resolver las ecuaciones bidimensionales de flujos bifásicos es el método de los volúmenes de control y el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales será resuelto utilizando el algoritmo SIMPLE, el cual es explicado en detalle por S. Patankar, ref./11/.

Fig. 1 modelo de la presa de Aguamilpa

Debido a la información de simulaciones numéricas de este tipo de flujos es escasa, y la problemática actual de los daños a grandes presas por efectos erosivos son muy fuertes, es por tanto alentador realizar estudios que pretendan comprender más a fondo estos flujos, e intentar establecer ciertas bases computacionales, que aunados a la experimentación en modelos específicos conduzcan a una solución más viable a situaciones reales que involucren este tipo de flujos en aereadores (Fig. 2).

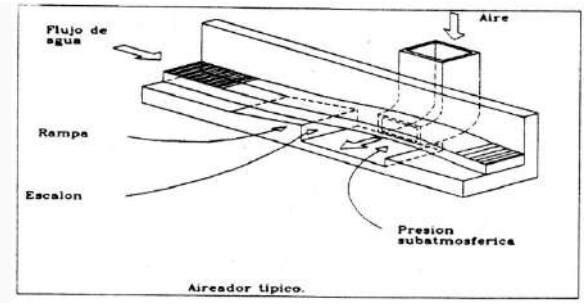


Fig. 2 Aereador típico.

En este trabajo se presenta la problemática de flujos bifásicos en su formas más simple, por lo que se presenta un modelo matemático y su adaptación a un esquema numérico el cual ayude a simular el comportamiento de flujos turbulentos con burbujas inmersas dentro de un flujo en un canal abierto, resolviendo para ello las ecuaciones de la fase dispersa así como para la fase contínua mediante un enfoque numérico conocido como enfoque Euleriano o método de los dos fluidos. Este método fué propuesto originalmente por B. Shoenung, el cual ahora es modificado para adaptarlo a equipos conocidos comúnmente como aereadores(Fig. 2), los cuales sirven principalmente para introducir aire de manera artificial dentro del vertedor de una presa hidráulica, finalmente compararlo con un modelo lagrangiano.

La aplicación de este tipo de flujos se puede llevar a cabo para diferentes inclinaciones del vertedor, además de que se pueden simular diferentes diámetros de burbuja y para diferentes concentraciones de las mismas. Este trabajo presenta solamente el caso de un flujo bifásico a través de una pendiente de 20 grados y para diferentes diámetros de burbujas, los datos experimentales con los que se compara finalmente el trabajo, corresponden a datos del modelo de la presa hidráulica de Aguamilpa, mismos que fueron tomados de un modelo a escala de 1:30 y cuyos valores de concentración corresponden a los obtenidos el 21 de abril de 1995, siendo tomados en una sección ubicada a 0.8971 m corriente abajo del aereador y corresponden a un caudal de 3000 m^3/s . (Aproximadamente una cuarta parte del máximo presentado *el 18 de enero de 1992 en la presa real).*

Por lo tanto este trabajo se limita a la aplicación de un caso específico, es decir, se presenta la solución numérica para el caso de vertedores de seguridad, simulando la introducción artificial de aire a través de equipos aereadores, los cuales se simulan en este caso mediante la inserción de una nube inicial de burbujas para el modelo euleriano, que corresponde al perfil de concentraciones corriente abajo del aereador del modelo de la presa antes mencionada. Este tipo de estudios se justifica ya que los costos que se requieren en la experimentación son sumamente elevados comparados con los numéricos.

En este tipo de estructuras hidráulicas, el acceso de aire es para mantener presiones moderadas y la cantidad de aire requerida por lo general se puede estimar si se conoce la velocidad del agua. El acceso o introducción de aire en vertedores de seguridad actualmente se lleva a cabo a través de equipos aereadores. En los vertedores conforme aumenta la velocidad hasta ciertos límites, el acabado requerido para prevenir la cavitación llega a costos inaccesibles para su construcción práctica, por lo que para casos en los cuales las

velocidades sean mayores de 22 a 26 m/s (aprox. 93 km/hr), la protección de las fronteras de los vertedores es más viable con la introducción artificial de aire, esto se logra colocando equipos aereadores cerca del piso del vertedor.

Modelo Matemático.

Las ecuaciones empleadas para describir el comportamiento en cada una de las fases, así como las condiciones de frontera y la determinación de las constantes utilizadas en el modelo k-∈ de turbulencia el cual es utilizado para cerrar las ecuaciones (número de ecuaciones = al número de incógnitas). Es bien sabido que las Ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido son las ecuaciones de conservación, las cuales se presentan a continuación; tanto para la fase contínua como para la fase dispersa.

Ecuación de conservación de masa (ecuación de continuidad).

Para esta ecuación, se hace necesaria la definición de una concentración de vacío, la cual es la fracción de volumen que ocupa la fase gaseosa, en un volumen de control.

Para el caso de la fase dispersa (burbujas) se tiene ec 1.

$$\alpha = \frac{\forall_p}{\forall} \tag{1}$$

Donde:

$\forall_p$ es el volumen ocupado por las burbujas en el volumen de control, y $\forall$ es el volumen del fluido dentro del volumen de control.

Como no existe intercambio de masa entre las dos fases, hay dos ecuaciones de continuidad separadas:

Para la fase contínua ec. (2)

$$\frac{\partial}{\partial x}(\alpha u_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha v_p) = 0 \tag{2}$$

y para la fase dispersa ec. (3)

$$\frac{\partial}{\partial x}(\alpha \rho_p u_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha \rho_p v_p) = 0 \tag{3}$$

Ecuación de cantidad de movimiento:

La ecuación de momentum para la fase contínua, tiene que ser ponderada por la concentración de volumen β del fluido.

Para la fase contínua:

En la dirección x ec. (4):

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta\rho uv) = -\beta\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}\left((\beta\mu)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\beta\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) - \beta\rho g - \frac{3}{4}\alpha\beta C_D \frac{\mu}{d^2} Re_p(u - u_p) \tag{4}$$

En la dirección y ec. (5):

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta\rho v^2) = -\beta\frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\left((\beta\mu)\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) + 2\beta\mu\left(\frac{\partial v}{\partial y} - v\right) - \frac{3}{4}\alpha\beta C_D \frac{\mu}{d^2} Re_p(v - v_p) \tag{5}$$

En las ecuaciones anteriores, puede observarse que existe un término adicional, el cual incluye el término de arrastre de las burbujas C_D, el cual es introducido como término fuente en las ecuaciones de cantidad de movimiento, y que está dado por la siguiente expresión ec. (6):

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.15 {Re_p}^{0.687}\right) \tag{6}$$

Para la fase dispersa ec. (7) :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\alpha\rho_p {u_p}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha\rho_p u_p v_p) = -\alpha\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\alpha\frac{\mu}{\sigma}\right)\left(\frac{\partial u_p}{\partial x}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha\frac{\mu}{\sigma\left(\frac{\partial v_p}{\partial y} + \frac{\partial v_p}{\partial x}\right)}\right) - \alpha\rho_p g + \frac{3}{4}\alpha\beta C_D \frac{\mu}{d^2} Re_p(u - u_p) \tag{7}$$

La ecuación de momentum para la fase dispersa en la dirección "y" es ec.(8) :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\alpha\rho_p u_p v_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha\rho_p {v_p}^2) = -\alpha\frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\alpha\frac{\mu}{\sigma}\right)\left(\frac{\partial v_p}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha\frac{\mu}{\sigma\left(\frac{\partial v_p}{\partial x} + \frac{\partial u_p}{\partial y}\right)}\right) + \frac{2\alpha\mu}{\sigma}\left(\frac{\partial v_p}{\partial y} - v_p\right) + \frac{3}{4}\alpha\beta C_D \frac{\mu}{d^2} Re_p(v - v_p) \tag{8}$$

Al igual que la fase contínua, en la fase dispersa se cuenta con el término de arrastre o término fuente.

El coeficiente de arrastre que se encuentra en el término de transferencia de momentum, está basado en la correlación de Shiller, la cual se aproxima bastante a la curva estándar de arrastre para una esfera, y tiene una validez de aplicación en el rango de números de Reynolds menores de 800 ref./13/.

Siendo la correlación ec. (9) :

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.15{Re_p}^{0.687}\right) \quad (9)$$

Válida para para $Re_p < 800$ Schiller and Naumann (1933).

El sistema de ecuaciones diferenciales parciales es resuelto junto con la ecuación (10) :

$$\beta \equiv 1 - \alpha \quad (10)$$

Donde β es la fracción de vacío de la fase contínua o fase líquida. De esta manera se tienen siete variables independientes: ($u, v, u_p, v_p, \alpha, \beta, p$). Para este estudio, los términos turbulentos se modelan recurriendo al modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, el cual se discute a detalle en ref./2/.

Condiciones de frontera de las ecuaciones de conservación y determinación de las constantes del modelo $\mathbf{k - \varepsilon}$

En lo que atañe a problemas que involucren flujos con superficie libre no permanente, no está en su totalidad resuelto, ref./14/. En este caso es necesario, especificar las condiciones de frontera para las componentes de velocidades medias, cantidades escalares y parámetros de turbulencia.

Condiciones de frontera (paredes sólidas).

El modelo $k - \varepsilon$ expuesto en ref./2/, es válido sólo para flujos completamente turbulentos, por lo que en las cercanías de la pared sólida, el número de Reynolds es pequeño, de tal suerte que los efectos de viscosidad predominan sobre el flujo turbulento, en esta región (subcapa viscosa).

Debido al problema anterior, en este trabajo la solución numérica de flujos turbulentos para regiones muy cercanas a la pared, se realiza utilizando el método de la función de pared (The Wall-Function Method). Con éste, la integración de las ecuaciones de balance, se llevan a cabo hasta una región donde es válida la ley logarítmica de la pared; para la distribución de velocidad media y para la distribución de concentración media, en zonas adyacentes a paredes sólidas, ref. /2/. Donde la ecuación que representa la condición de frontera en la dirección x, es la siguiente ec. (11) ref./2/.

$$\overline{u_c} = \overline{u_t}\left(\frac{1}{K} ln\left(\frac{y_c \overline{u_\tau}}{\vartheta}\right) + B\right) \quad (11)$$

Donde: B = 5.2 Constante empírica; K=0.41=constante de von Karman (empírica); Las condiciones de frontera en la pared o piso del vertedor, tienen velocidad cero, debido a la condición de no deslizamiento. Por tanto, los gradientes de energía cinética turbulenta, disipación de energía cinética turbulenta, fracción de vacío, etc. Presentan gradientes cero.

Condiciones de frontera (entrada).

$u = v = \alpha$ conocidos, al igual que otras variables dependientes. En la entrada, se parte de velocidades conocidas, las cuales corresponden a las del modelo experimental de la presa, para el gasto especificado, al igual que la fracción de vacío es conocida, ya que parte de un perfil inicial de concentraciones.

Condiciones de frontera (salida).

En la salida se tienen gradientes de velocidades y otras propiedades igual a cero ecs. (12,13).

$$\frac{\partial v_p}{\partial y} \neq 0, \frac{\partial u_p}{\partial x} \neq 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

Condiciones de frontera (superficie libre).

Por otra parte se tiene que las condiciones de frontera en la superficie libre son las correspondientes a gradientes cero. En tanto que para la velocidad de la partícula, en la dirección "x", se considera como la velocidad inicial de ella y que la velocidad inicial de la partícula en la dirección "y" se estima igual a cero. Esto con el fin de tener conservación de masa. Cabe mencionar ahora que los valores utilizados en el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$.

$C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon_1} = 1.44$, $C_{\varepsilon_2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Estas constantes se obtienen a partir de relaciones matemáticas y de la optimización por computadora, en donde para números de Reynolds grandes adquieren los valores dados anteriormente ref./2/.

El conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de un flujo bifásico (ecuaciones de conservación), puede ser resuelto de diferentes formas, entre las cuales se tienen las siguientes:

Diferencias finitas, volúmenes finitos y elemento finito. En este trabajo se utiliza el método de volúmenes finitos, el cual consiste principalmente, en dividir el campo de flujo en un número finito de subregiones. La idea esencial de este método, es aplicar los principios de continuidad y cantidad de movimiento, a cada uno de los volúmenes de control, dentro de un campo de flujo.

En este método se emplea una malla uniforme y volúmenes del mismo tamaño. Para ello se empleó el programa originalmente propuesto por B. Shoenung, ref./5/., el cual fue modificado para simular un flujo bifásico y parte de la idea de volúmenes finitos, que resuelven las ecuaciones diferenciales parciales. En este método, el campo de flujo es dividido en una malla uniforme de volúmenes discretos, que se denominan celdas.

Resultados.

Comparación del modelo euleriano con datos experimentales.

Para la simulación numérica del presente trabajo, se han resuelto las ecuaciones diferenciales parciales del tipo elíptico (ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento), mediante la formulación de volúmenes finitos. Este programa se ha desarrollado para flujos en dos dimensiones y en estado estacionario. La simulación es para un flujo bifásico aire-agua, en el cual se ha utilizado el enfoque de los dos fluidos ref./15/. Además se considera a la fase dispersa como un contínuo y se resuelven las ecuaciones de conservación para la fase contínua y dispersa.

Una concentración de vacío se introduce en la ecuación de continuidad para la solución de ambas fases. En la simulación se han tomado en cuenta los efectos de interacción entre partícula y fluido, y viceversa, a través de unos términos fuente (que son causa de cantidad de movimiento).

A continuación se presentan los datos experimentales de C.F.E, referente al modelo de la presa de Aguamilpa(fig.1). Estos datos corresponden al punto de medición GP3 ubicado a 0.871 m aguas abajo del aereador. Es preciso hacer notar que los datos de esta tabla, no coinciden exactamente (excepto tres de ellos) debido a que se han interpolado, de acuerdo con la gráfica del modelo de la presa ref/7/. Los datos de la tabla anterior pertenecen a las concentraciones medidas a lo largo del tirante en la sección GP17, los cuales presentan un perfil inicial, como el que se muestra en la figura 3. Este perfil corresponde a un perfil inicial de concentraciones para la simulación numérica de la presa.

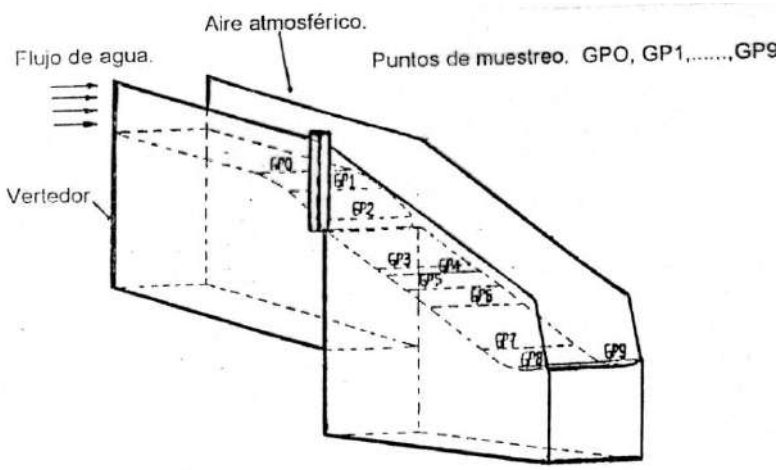


Fig. 3 Datos experimentales en el modelo.

Los datos del modelo experimental, con el cual se comparó el modelo son:

Altura / tirante)	0.0929 m
Sección transversal	0.7300 m
Longitud del vertedor	4.0650 m

La comparación se llevó a cabo con base en los siguientes datos experimentales del modelo de la presa:

Gasto	304 l/s
Tirante	0.0929 m
Velocidad del agua	5.49 m/s
Pendiente del vertedor	20°

Finalmente los datos numéricos con los cuales se comparó son:

Densidad del aire	1.17 kg/m^3
Densidad del agua	1000 kg/m^3
Viscosidad del agua	$8x10^{-4}$ kg.m/s
Ángulo del vertedor	20°
Diámetro de burbujas:	500 μm

En esta simulación se ha despreciado la disminución del tirante, a lo largo del vertedor o plantilla. De esta manera, no se toma en cuenta la aereación natural, la cual comienza cuando la capa límite alcanza la superficie libre y la turbulencia provoca la aereación natural. Ref./16/. Además se ha supuesto que las burbujas son perfectamente esféricas e indeformables, con lo que se desprecian otros efectos, como circulación interna, interacción entre partícula y partícula. Se puede así, aplicar el coeficiente de arrastre para una burbuja esférica (tabla II) Con muy buena aproximación, según lo muestran los resultados, efectos de gravedad, flotación y arrastre, los que se toman en cuenta en forma de términos fuente, en las ecuaciones de conservación.

Tabla II Coeficientes de arrastre para esferas rígidas.

Autor(es).	Rango	Relación
1) Schiller Nauman	$Re < 800$	$(^{24}/_{R_e})[1 + 0.15^{0.687}]$
2) Lapple	$Re < 1000$	$(^{24}/_{R_e})[1 + 0.125^{0.72}]$
3) Langmuir y Blodget.	$1 < Re < 100$	$(^{24}/_{R_e})[1 + 0.197^{0.63} + 2.6x10^{-4}{R_e}^{1.38}]$
4) Allen.	$2 < Re < 500$ $1 < Re < 100$	${10R_e}^{-1/2}$ ${30R_e}^{-0.625}$
5) Gilbert et al	$0.2 < Re < 2000$	$0.48 + 28{R_e}^{-0.85}$
6) Kurten et al.	$0.1 < Re < 4000$	$0.28 + \frac{6}{{R_e}^{0.5}} + \frac{21}{Re}$
7) Abraham.	$Re < 6000$	$0.2924(1 + 9.06{R_e}^{-0.5})^2$
8) Ihme et al.	$Re < 10^4$	$0.36 + 5.48/({R_e}^{0.573}) + 24/Re$
9) Rumpf.	(a) $Re < 10$ (b) $Re < 100$ (c) $Re < 10^5$	$2 + 24/Re$ $1 + 24/Re$ $0.5 + 24/Re$
10) Clift y Gauvin.	$Re < 3x10^5$	$(^{24}/_{R_e})[1 + 0.15{R_e}^{0.687} + 0.42/(1 + 4.25x10^4){R_e}^{-1.16}]$
11) Braurer.	$Re < 3x10^5$	$0.40 + {}^{4}/_{({R_e}^{0.5})} + {}^{24}/_{(Re)}$
12) Tanaka y Linoya.	$Re < 7x10^4$	$log_{10}C_D = a_1w^2 + a_2w + a_3$ Donde: $w = log_{10}R_e$ y a_1, a_2 y a_3 están dados por 7 intervalos de Re.

En este estudio, la simulación numérica de flujos turbulentos en zonas cercanas a la pared, se lleva a cabo usando el mismo método de la función de pared. Con este método, la integración de las ecuaciones de balance, no se efectúan hasta la pared, sino hasta un punto denominado y_c localizado en la región donde es válida la ley logarítmica de la pared. Esta ley describe, con buena aproximación, la distribución media adyacente a paredes sólidas.

En la figura 3, se pueden ver los datos interpolados correspondientes al perfil de concentraciones de aire, ref./7/. Estos se obtuvieron del modelo seccional de la presa Hidráulica Aguamilpa ref./7/, en la cual dichos resultados o registros se tomaron el 21 de abril de 1995 en la sección a 0.871 m del aereador.

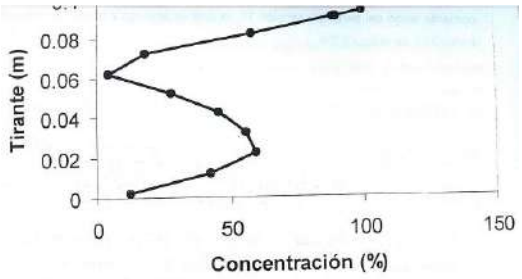


Fig. 3.1 Perfil de concentraciones.

En la gráfica del modelo(fig. 3.1) se tienen doce mediciones de concentraciones, de las cuales solo se tomaron las primeras ocho para la simulación, debido a que las cuatro restantes, ya están cerca de la superficie libre, y corresponden quizás a la aereación natural, y en este caso, no se está considerando la aereación natural de las burbujas. Además, que los valores de las concentraciones se encuentran interpolados, a excepción de los valores de concentración de 12.45% (0.1245) y de 18.15% (0.1815), ya que son los valores de concentraciones, cuyos tirantes (0.20 y 7.20 cm) corresponden a los valores de tirantes para la discretización de la malla en la simulación del flujo respectivamente. Esto también lleva consigo un error, ya que al interpolar los valores, nada asegura que esos valores puedan ser reproducidos experimentalmente. La comparación de datos experimentales del modelo con los resultados numéricos, se llevó a cabo para cuatro diámetros de burbujas, siendo estos: 0.7 mm, o.5 mm, 0.25 mmm y 0.1 mmm según se puede apreciar en las figuras 4, 5, 6 y 7 respectivamente. A continuación se muestran los resultados del modelo euleriano con datos experimentales que corresponden a la figura 4.

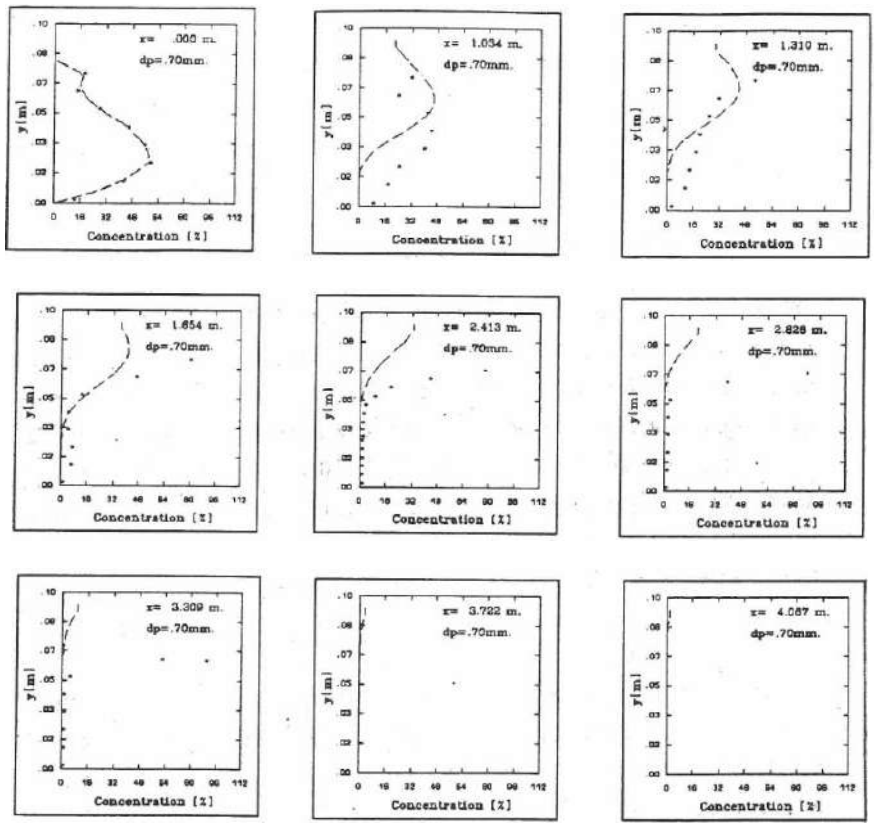


Fig. 4 comparación del modelo euleriano con datos experimentales (diámetro de burbujas de 0.7 mm).

Estos resultados se presentan, en primera instancia, para el caso de burbujas de 0.7 mm de diámetro. En la gráfica se pueden apreciar los datos experimentales los cuales corresponden a los puntos, en tanto que los resultados numéricos corresponden a la línea punteada.

En la fig. 4-a se puede ver la nube inicial en la posición x=0 con la cual se inicia la simulación. Se ve con claridad que coinciden muy bien con los resultados experimentales, debido a que la nube inicial es introducida artificialmente, y además, no se ha desarrollado el flujo. Por tal motivo, la distribución de aire es semejante, conforme se desarrolla el flujo (fig. 4-b) y a una distancia de x=1.034 m del aereador. La distribución no es muy buena aún cuando debe observarse que en forma cualitativa, tanto los resultados numéricos como los datos experimentales, poseen la misma tendencia, en cuanto a la concentración de aire. Por otro lado, se tiene que, en la fig. 4-c la similitud de la distribución de aire entre simulación y datos experimentales es mayor, y aumenta aún más en la figura 4-d. En las figuras 4-e a la 4-g se aprecian resultados mucho más alentadores por la gran semejanza en la distribución de aire, e4n ambos modelos, aún cuando debe notarse que en la parte superior, a lo largo del vertedor, la diferencia de concentraciones de aire es más notoria, esto es debido a que los resultados experimentales llevan implícita la aereación natural, en tanto que, en los resultados numéricos no se tienen

simulados tales efectos y, además, se hace uso de una simplificación adicional, que el tirante es constante a lo largo del vertedor, lo cual conlleva a ciertas diferencias entre los resultados presentados. Una observación importante es que los resultados de concentración de aire, coinciden hasta cierto rango del tirante, (aproximadamente hasta un valor de 0.05 m), que es donde se empiezan a notar los efectos de la aereación natural en los resultados experimentales.

Por último, en las figuras 4-h y 4-i, se advierte que la concentración de aire prácticamente es cero para los resultados numéricos, en tanto que los datos experimentales, las burbujas desaparecen, después de una distancia aproximadamente de 3.309 m. Esto se debe quizás , a la propia turbulencia del flujo; y por los efectos de flotación, estos mismos efectos se aprecian en los resultados numéricos, pero una concentración mínima al final del vertedor.

Los resultados para las burbujas de diámetro 0.5 mm , se muestran en las figuras 5-a a la fig 5-i: En estas gráficas se exponen condiciones similares a la anterior, con la diferencia de que la concenteración de aire en los datos numéricos es mayor a lo largo del vertedor. Esto se puede apreciar más en la comparación de las figuras 5-g, 5-h y 5-i con las figuras 4-g, 4-h y 4-i, que es donde se advierte más esta diferencia de concentraciones de aire, a lo largo del tirante, además el tiempo de residencia de las burbujas pequeñas es mayor, por lo que la simulación numérica muestra claramente estos efectos.

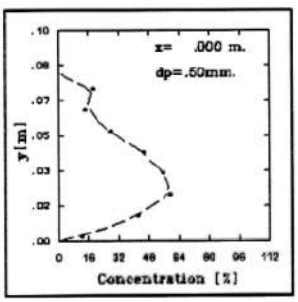


Fig. 5a

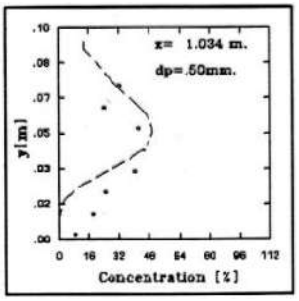


Fig. 5b

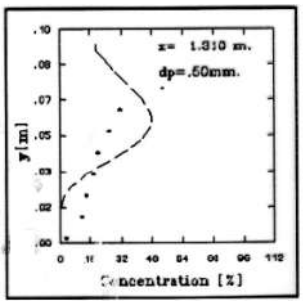


Fig. 5c

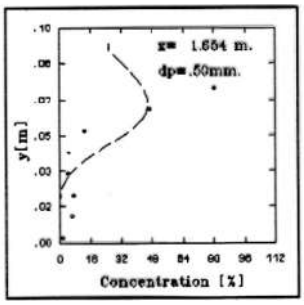


Fig. 5d

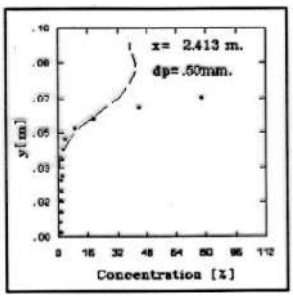


Fig. 5e

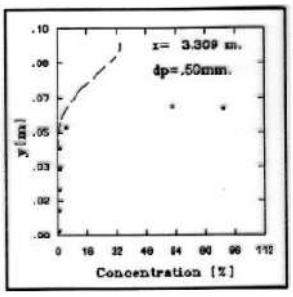


Fig. 5f

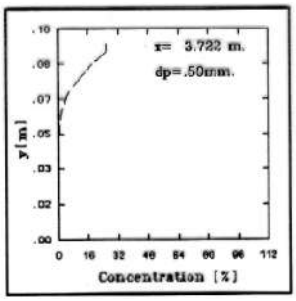


Fig. 5g

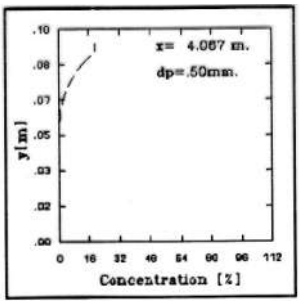


Fig. 5h

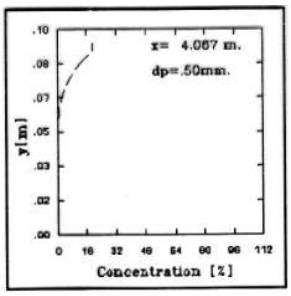


Fig. 5i

Para la comparación de los resultados usando diámetros de burbujas de 0.25 mm (fig. 6-a, …, 6-i) los efectos en la diferencia de concentraciones es mayor a lo largo del vertedor y en el tirante. Se puede ver además, que en estas últimas, la concentración va aumentando en el fondo del vertedor y a lo largo del mismo, debido a la disminución del diámetro de las burbujas.

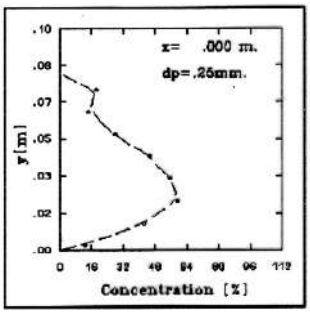


Fig. 6a

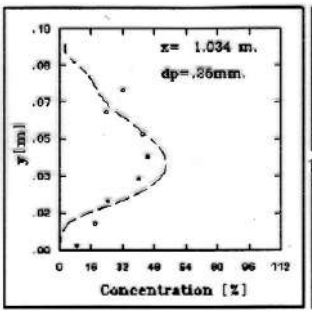


Fig. 6b

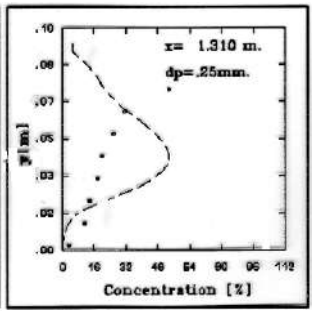


Fig. 6c

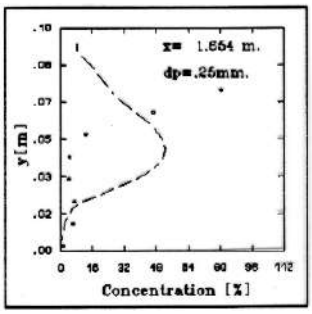


Fig. 6d

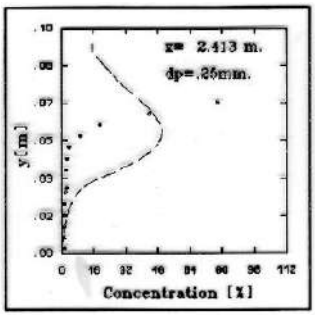


Fig. 6e

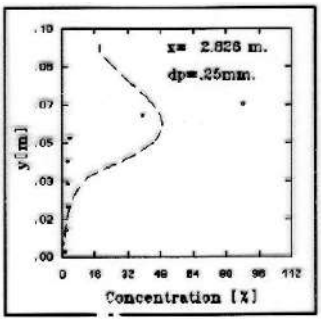


Fig. 6f

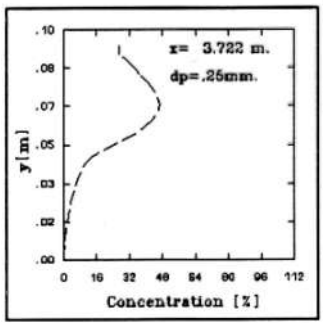


Fig. 6g

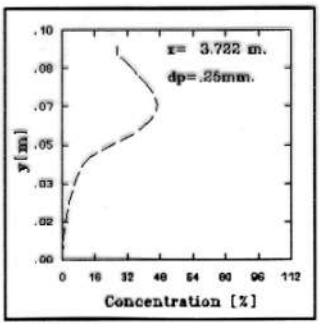


Fig. 6h

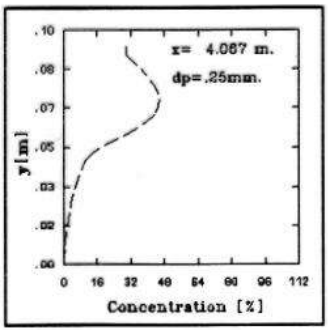


Fig. 6i

Finalmente se lleva a cabo la simulación para un diámetro de burbujas de 0.1 mm. Es importante notar la clara evidencia de que existe una concentración más grande a lo largo del vertedor, y en el fondo del mismo, es decir en las proximidades del piso del vertedor, conforme las burbujas son más pequeñas.

Por otra parte es importante advertir que se han hecho simulaciones para los distintos diámetros de burbujas mencionados. Así mismo se tiene que para las burbujas más pequeñas (0.1 mm), la concentración en el fondo del vertedor es mucho mayor que para las burbujas de 0.7 mm las más grandes(fig. 7).

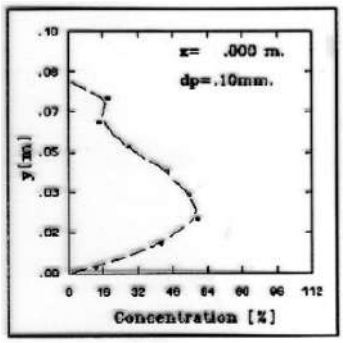


Fig. 7a

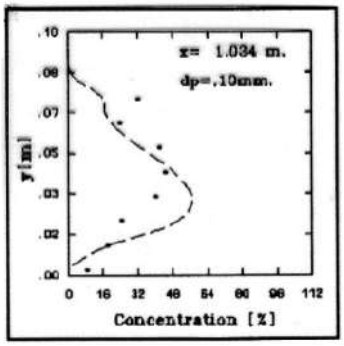


Fig. 7b

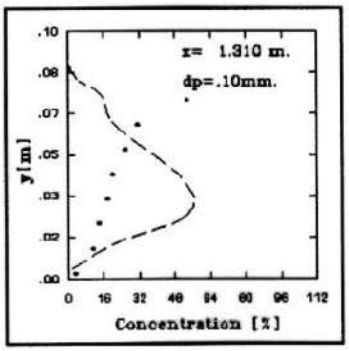


Fig. 7c

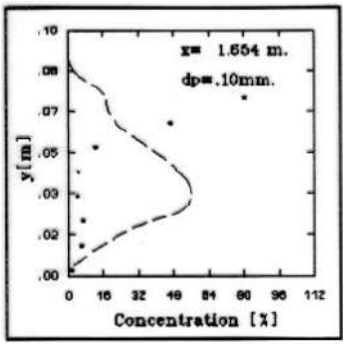


Fig. 7d

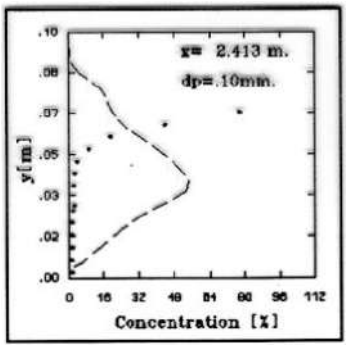


Fig. 7e

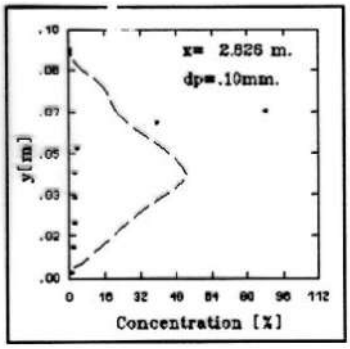


Fig. 7f

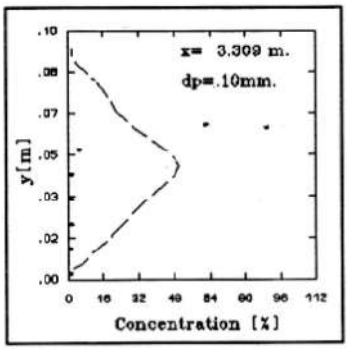


Fig. 7g

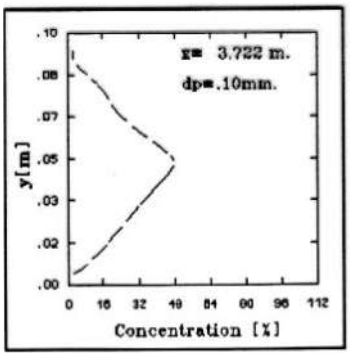


Fig. 7h

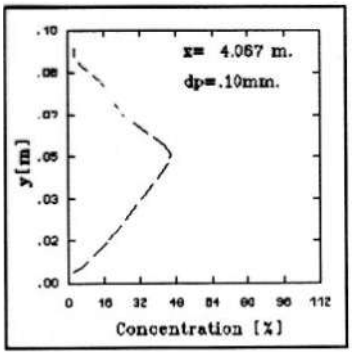


Fig. 7i

La discusión es por último, para los diámetros intermedios de burbujas(0.7 y 0.5 mm). Dentro de estos rangos se pueden considerar todavía a las burbujas como esféricas, debido a que son los valores más cercanos al diámetro equivalente de burbujas calculados en función de la velocidad de ascenso, ref./9/. Noé Estevez reprodujo ciertos valores de concentración de aire, los cuales concuerdan con los obtenidos por H. Chansion, debido a que cuando se realizaron estas pruebas, con este diámetro, los resultados fueron muy congruentes con los obtenidos por Chanson. Ref./14,16/. Por tanto, se puede decir que el modelo numérico funciona adecuadamente, no obstante que tiene limitaciones muy fuertes, como son considerar una burbuja como rígida e indeformable, esférica además de no tomar en cuenta la disminución del tirante, a lo largo del vertedor, y por otro lado, no se ha simulado el escalón.

Comparación de un modelo Euleriano con un Modelo Lagrangiano.

Para esta comparación se tiene un flujo bifásico aire-agua con las siguientes características: se hace uso de una malla de 15x3, uniforme, el tirante del vertedor es de 1 m, mientras que la longitud a lo largo de la plantilla del vertedor es de 8 m, con una pendiente de 20° e influenciado por los efectos de la gravedad, dichos efectos, al igual que la malla son idénticos para ambos enfoques.

Como es sabido, los flujos bifásicos actualmente pueden ser tratados en forma teórica y numérica, para los cuales existen dos enfoques para tratar a la fase dispersa(partícula). Los enfoques que se analizan a continuación son los enfoques lagrangiano y euleriano. El primero trata a la fase fluida como un contínuo y predice la trayectoria de una simple partícula en un campo de flujo, atendiendo a las

varias fuerzas que actúan en la partícula. La simulación del enfoque lagrangiano se lleva a cabo suponiendo diferentes posiciones de arranque para las partículas y siguiendo sus trayectorias (ref. 5). El segundo enfoque está basado en el tratamiento de la fase dispersa como un contínuo, y dado que hay dos fluidos presentes, hace necesaria la introducción de un nuevo parámetro llamado fracción de vacío la cual se define como una relación de volúmenes de la fase dispersa y contínua respectivamente. Dado que en este trabajo se trata con flujos turbulentos, la viscosidad se reemplaza por una viscosidad efectiva, la cual es el resultado de una viscosidad laminar más una viscosidad turbulenta.

La comparación de ambos enfoques se puede ver en las figuras 8a …. 8i en las cuales se puede apreciar claramente la similitud de un modelo euleriano con un modelo lagrangiano, dicha comparación se llevó a cabo en un tirante de 1 m, una plantilla de 8 m con una inclinación de 20 grados, una velocidad del fluido de 15 m/s y con un diámetro de burbujas de 0.5 mm, se puede apreciar la gran semejanza entre un modelo y otro, las pequeñas diferencias se deben al número de posiciones de arranque de las partículas en el modelo lagrangiano.

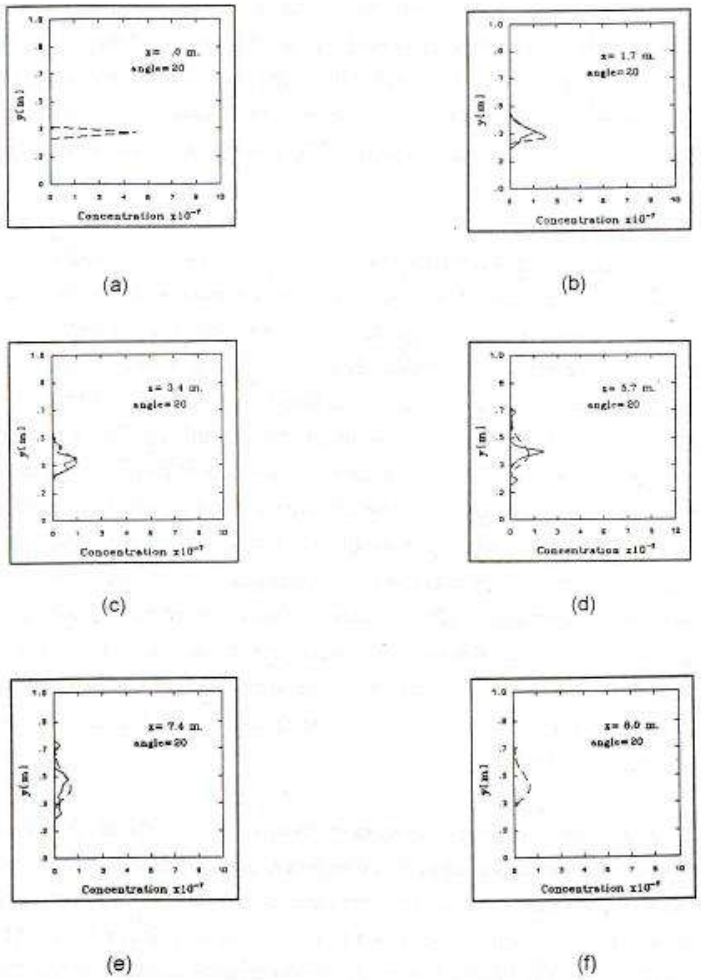


Fig 8 Comparación de un modelo Euleriano con uno Lagrangiano
---------- Modelo Euleriano.
_____ Modelo Lagrangiano.

En estas gráficas, las líneas punteadas representan al modelo euleriano, en tanto que la línea contínua representa el modelo lagrangiano.

En la figura (8-a) se puede apreciar claramente la nube inicial del modelo euleriano, en la posición (x=0), la cual corresponde a un valor de concentración de $5x10^{-7}$ en esta figura no aparece la concentración correspondiente al modelo lagrangiano, debido a que las posiciones de arranque parten de un valor posterior al inicial (x=0). Por lo cual solo se puede apreciar la nube inicial para el modelo euleriano, además debe observarse que la comparación de dichos modelos se hace para valores de concentración muy bajos, para mayor comodidad en el tiempo de cómputo, aún cuando se realizaron para diferentes valores de concentraciones de hasta 0.9 (90%).

En la figura 8b se puede observar, ya es notoria la concentración para ambos modelos, además se puede apreciar que el punto de concentración máxima es mayor en el enfoque euleriano, en las figuras subsecuentes, se puede ver son muy similares prácticamente arriba de 0.3 m, esta diferencia se debe quizás a que el enfoque euleriano se inicia con una nube de burbujas y al número de posiciones de arranque del enfoque lagrangiano, también en la figura 8b se puede observar, que existen ciertos efectos de flotación y dispersión de las burbujas, y se ve también que el valor máximo inicial del modelo euleriano es menor debido a que el flujo se empieza a desarrollar.

En las figuras 8c a la 8e la semejanza es bastante buena entre ambos enfoques, esto se debe principalmente a que el flujo se ha desarrollado lo suficiente a lo largo del vertedor y las pequeñas diferencias se deben principalmente a las posiciones de arranque en el enfoque lagrangiano, lo cual resulta muy alentador para trabajos posteriores mediante la utilización de este tipo de enfoques, en simulaciones similares, en las cuales se varía el número de posiciones de arranque en el enfoque lagrangiano. En esta figura la curva lagrangiana (linea contínua) se hace cada vez más suave y se asemeja aún más al enfoque euleriano.

En las figuras 8c, 8d y 8e el enfoque lagrangiano presenta una situación en la cual se observan varios picos, estos se suavizan con el número de posiciones de asrranque, pero la diferencia aún asía es un poco evidente, la razón principal de esta diferencia se cree que es por las condiciones de frontera en la salida, ya que esta diferencia se se evidencia en tanto que el fluido se acerca a la salida del vertedor, y también por las propias posiciones de arranque, además de las consideraciones implícitas en cada modelo. La misma razón se atribuye a la diferencia presentada entre ambos enfoques a la salida del flujo (fig. 8f), la cual presenta únicamente una nube para el enfoque euleriano, en donde las burbujas en el enfoque lagrangiano han escapado de la superficie libre, estas diferencias se deben quizás a situaciones implícitas para cada enfoque y a las condiciones de frontera establecidas previamente.

Finalmente debido a que los resultados obtenidos para flujos con burbujas, son bastante buenos para ambos enfoques, y aún cuando la situación por la que se utilizó la comparación para bajas concentraciones fue por el hecho de que para altas concentraciones el enfoque euleriano es más viable (ref 5), pero la semejanza entre ambos modelos es muy promisoria para trabajos posteriores. Cabe mencionar que en ambos modelos se han considerado a las burbujas como esféricas y rígidas, de manera que pueden ser trabajadas mediante la curva estándar de arrastre para partículas esféricas(fig. 8g).

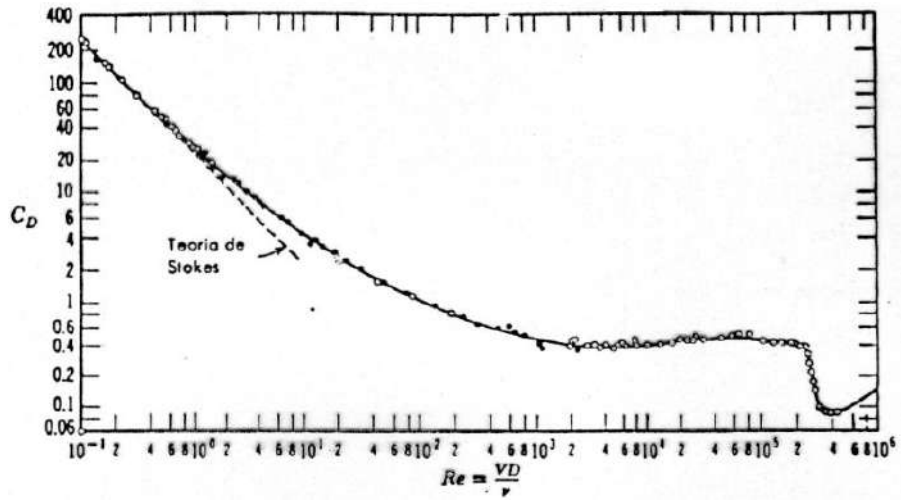


Fig. 8g curva estándar de arrastre para partículas esféricas.

Para la simulación numérica del presente trabajo, se han resuelto las ecuaciones diferenciales parciales del tipo elíptico (ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento), mediante la formulación de volúmenes finitos. Este programa se ha desarrollado para flujos en dos dimensiones y en estado estacionario. La simulación es para un flujo bifásico aire-agua, en el cual se ha utilizado el enfoque de los dos fluidos ref./5/. Además se considera a la fase dispersa como contínuo y se resuelven las ecuaciones de conservación para la fase contínua y dispersa.

Una concentración de vacío se introduce en la ecuación de continuidad para la solución de ambas fases. En la simulación se han tomado en cuenta los efectos de interacción entre partícula y fluido, y viceversa, a través de unos términos fuente (que son causa de cantidad de movimiento).

Antes de iniciar la comparación del modelo euleriano con datos experimentales, observemos la figura 9 en la cual se presenta la simulación numérica de la dispersión de burbujas con superficie libre, para un modelo lagrangiano, en la figura se ve claramente que

el tamaño de las burbujas es más grande conforme se acerca a la superficie libre, tal como lo establece Chanson. /ref 14/. En la figura 9a, se observa que entre más lejos se esté del vertedor, los efectos de flotación se hacen cada vez más pronunciados, por lo que las burbujas más grandes escaparán hacia la superficie libre. Otro aspecto importante es que este enfoque muestra que conforme se aumenta el ángulo del vertedor, aumenta el tiempo de residencia de las burbujas, además se observa que para una inclinación de cero grados los efectos de flotación son más claros y más pronunciados para las burbujas grandes, este efecto es menos visible con el aumento de la pendiente, es decir, el tiempo de residencia aumenta conforme aumentamos la pendiente. Estos mismos efectos se pueden ver si se analizan cuidadosamente cada uno de los casos ensayados con el enfoque euleriano (fig. 4, 5, 6 y 7), en donde los efectos de flotación son muy claros para los diferentes diámetros de burbujas.

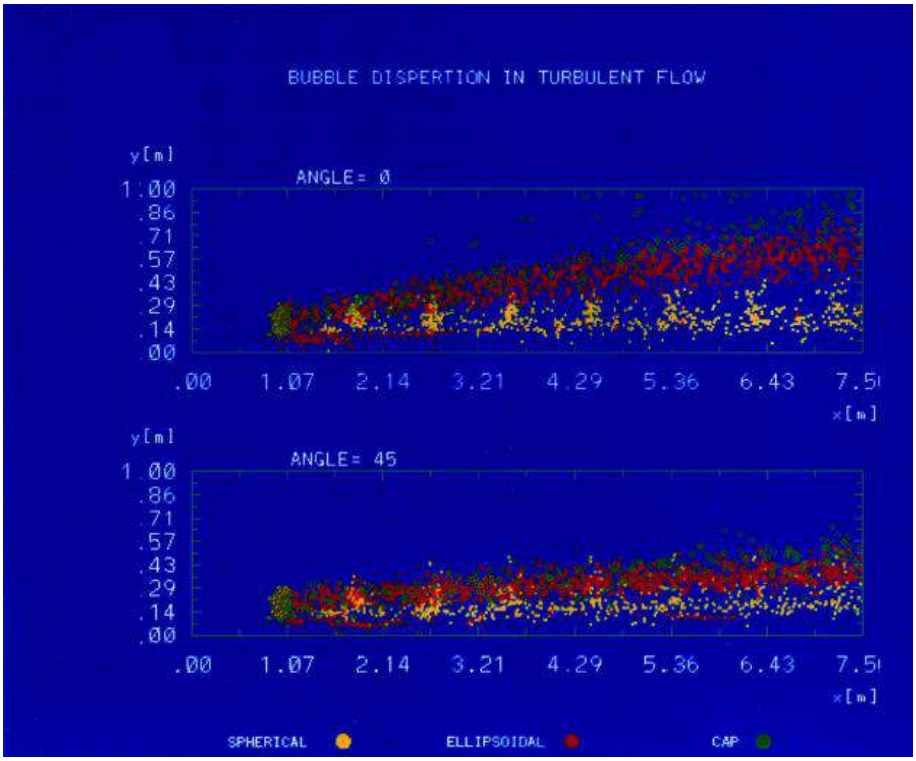


Fig. 9a, 9b Efectos de flotación de burbujas para un enfoque lagrangiano.

Conclusiones y Recomendaciones.

Los resultados de comparación con el modelo lagrangiano se llevaron a cabo para estimar en forma cualitativa si el modelo de los dos fluidos concordaba con el modelo lagrangiano y posteriormente compararlo con los datos experimentales.

El enfoque euleriano parece ser que tiene ciertas ventajas en todos los casos de flujos donde ocurren altas concentraciones de partículas y, donde las altas fracciones de vacío son un parámetro dominante en el control del flujo. El enfoque lagrangiano tiene algunas ventajas en lo que es la predicción de flujos de partículas en los cuales ocurren grandes aceleraciones de partículas, también es muy útil para manipular flujos bifásicos que contienen distribuciones polidispersas de tamaños de burbujas.

Las diferencias entre el enfoque numérico y los datos experimentales obedecen principalmente a que en la simulación no se ha tomado en cuenta la influencia de la superficie libre con el flujo, además aún cuando esas diferencias son muy grandes, son bastante buenos los resultados ya que de alguna forma sirven de base para estudios posteriores, donde se incluya la influencia de la superficie libre y otros efectos.

Finalmente con los resultados obtenidos, se pueden establecer ciertas bases teóricas computacionales, fundamentales para este tipo de flujos, sin olvidar que aún hay mucho por estudiar y que este tipo de problemas son extremadamente complejos, por los fenómenos involucrados en el modelo, los autores esperan que este tipo de estudios motiven a investigaciones más profundas para así

tener un control más preciso de este tipo de fenómenos. Por lo tanto se recomienda efectuar simulaciones posteriores, utilizando datos más realistas y con la menor cantidad de restricciones, para así tener resultados más viables y poder compararlos con los datos experimentales y, de esta manera establecer bases más sólidas sobre este tipo de fenómenos.

La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.Uno de los padres de este método de análisis fue Suhas Patankar que es actualmente profesor emérito de la Universidad de Minesota.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño, siendo la Calibración el proceso de comparar los valores obtenidos con la medida correspondiente de un patrón de referencia (o estándar).

En este caso cada uno de los enfoques tiene sus ventajas y sus inconvenientes, todo depende de lo que se desee conocer. Muchos modelos físicos son relativamente fáciles de plantear con una descripción y difíciles de plantear con la otra. Por ejemplo, los modelos de mecánica de fluidos suelen prestarse muy bien a la descripción euleriana, mientras que los de grandes deformaciones de cuerpos sólidos suelen ser más cómodos de tratar con una descripción lagrangiana.

Bibliografía.

1.- A.D. Gosman and F.J,K Ideriah, “TEACH-2E. A general computer program for two dimensional, turbulent, recirculating flows”, department of Mechanical engineering, imperial college, London, june 1976.
2.- Avila Rodríguez Rubén : Simulación de flujos turbulentos con partículas en suspensión. Tesis (1993).
3.- Avila Rodríguez Rubén: Simulación Numérica de la Dispersión de una Nube de Partículas Sólidas liberada a la atmósfera. Tesis (nov. 1997)
4.- Avila R. “Lagrangian aproach for the predictions of parabolic dispersed two phase flows”, June 25-27, 1986.
5.- B. Schoënung, F. Durst, D. Milojevic, “Eulerian and Lagrangian predictyions of particulate two phase flows: a numerical study” 1984, vol. 8
6.- Gabriel Echavez, cavitación en vertedores. Universidad Nacional Autónoma de México. Feb 1979.
7.- Jaime Camargo H. Carlos Cortés C. (CFE), presa hidraúlica Aguamilpa. Laboratorio de hidráulica (dic 1995).
8.- Julián Tercero Becerra Sagredo. Solución Numérica a las Ecuaciones de Navier Stokesw en coordenadas generalizadass(tesis UNAM), México D.F 1996.
9.- Noé Estevez Leal, “Analísis de Aereación en dos modelos experimentales de vertedores.(tesis oct. 1995).
10.- Moisés Berezowsky Verdusco (U.N.A.M) “Analísis de Flujos Turbulentos a superficie libre”
11.- Suhas V. Patankar, Spalding. D. B. “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”.
12.- Wood Ian R. “Air Entrainment in free surfaces flows” pag 85-88 IAHR Hydraulic Structures design manual., 1991.
13.- R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, “Bubbles, Drops and Particles” “academic, New York,1978.
14.- H. Chanson. Aereation of a free jet above spillway; journal of hydraulic research, vol. 29, No. 5, 1991.
15.- F. Durst, D. Milojevic, B. Schoenung, “Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two phase flows: a numerical study”, Appl. Math. Modelling, 1984 vol. 8, pp. 101-115 april 1984.
16.- H. Chanson, Air entrainment in chutes and spillways. Research report No. CE133. Departmentof Civil Engineering. The university of Queensland Feb. 1992.

HABITABILIDAD EN VIVIENDA DE CONSTRUCCIÓN EN SERIE EN MEXICALI: EXPERIENCIA DE APRENDIZAJE

Karina Contreras–Fonseca, Gonzalo Bojórquez-Morales, Ramona Romero-Moreno, Aníbal Luna-León, Josué Flores-Moreno, Daniel Castro-Sánchez
Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.
Blvd. Benito Juárez, Mexicali, Baja California, C.P. 21280, México. Tel (686) 5664250,
karina.contreras@uabc.edu.mx, **gonzalobojorquez@uabc.edu.mx**, **ramonaromero@uabc.edu.mx**, **anibal@uabc.edu.mx**, **josue.craft115@gmail.com**, **daniel.castro.sanchez@uabc.edu.mx**.

RESUMEN

La vivienda representa el sitio donde el hombre se desarrolla y aprende las bases para hacer posible la vida en sociedad. Por tanto, conocer a fondo el funcionamiento de esta tipología de construcción se convierte en una tarea importante en el campo de la Arquitectura, a fin de tener un fiable punto de partida que marque las directrices de su diseño. Es así como se llega al objetivo de obtener una base de datos que permita evaluar las características de habitabilidad ambiental de viviendas de construcción en serie de Mexicali, Baja California. Para ello se manejó un método inclusivo, donde profesores y estudiantes de Arquitectura trabajaron en conjunto en la realización de investigaciones de campo. Se obtuvo información precisa del comportamiento físico (variables térmicas, acústicas, olfativas) y social (seguridad, sentido de pertenencia) de las casas-habitación, que permiten hacer comparaciones entre sistemas constructivos, formas de emplazamiento, superficies, etc. Dichas comparaciones contribuyen también a enriquecer la formación de los estudiantes involucrados, no solamente al aumentar su acervo, sino también fortalecer su pensamiento crítico y analítico, que posteriormente se traduce en un mejor ejercicio de la profesión.

Palabras clave: Vivienda de interés social, habitabilidad ambiental, investigación de campo, comportamiento físico, comportamiento social.

ABSTRACT

The house represents the place where man develops and learns the basics to make life possible in society. Therefore, getting to know the functioning of this type of construction becomes an important task in the field of architecture, in order to have a reliable starting point to mark their design guidelines. This is how is reached the goal of obtaining a database to assess the characteristics of environmental livability of housing serial construction of Mexicali, Baja California. For this an inclusive approach, where teachers and students of Architecture worked together in conducting field investigations was handled. Information was obtained about precise physical behavior (thermal variables, acoustic, olfactory) and social behavior (security, sense of belonging) of the housing, which allows comparisons between building systems, forms of location, areas, etc. Such comparisons also contribute to enrich the education of students involved, not only by increasing their collection, but also strengthen their critical and analytical thinking, which later translates into better practice of the profession.

Key-words: Low-income dwellings, environmental habitability, field research, physical behavior, social behavior.

INTRODUCCIÓN

Partiendo del principio de que 'la vivienda de interés social es la que cumple con el espacio mínimo suficiente para albergar con calidad y dignidad las actividades sociales, privadas e íntimas del núcleo familiar, la que asegura la estabilidad social y la armonía con el entorno, cultural y social' (Aldrete, 2010), resulta más comprensible por qué representa un reto para la Arquitectura: debe dar respuesta a diversos perfiles de habitante con una misma solución formal, adecuándose a la vida cotidiana y necesidades de cada familia. Ante la premisa de llegar a prototipos versátiles y correctamente solucionados, resulta imperativo conocer a detalle cómo funcionan las viviendas de hoy en día, para así hacer posible un proceso objetivo de evaluación y posterior comparación respecto a los parámetros en que debería funcionar una vivienda para alcanzar el mayor nivel de confort en todos los aspectos. Es por ello que surge la necesidad de contar con una base de datos que dé certeza al proceso anterior, puesto que de ello pueden derivarse las decisiones que rijan el diseño de futuros prototipos de vivienda.

Ahora bien, en los programas de enseñanza de la Arquitectura continuamente se hace hincapié en la posición central del usuario respecto al espacio que habitará, siendo él, el protagonista en torno al que gira cualquier intención de diseño. Sin embargo, ya en el ámbito profesional, difícilmente se ve reflejado este principio cuando de vivienda construida en serie se trata, pues se observa una constante despersonalización de la misma. El objetivo del presente artículo es mostrar parte de los resultados obtenidos a partir del ejercicio y la experiencia de aprendizaje de los estudiantes de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), a través del trabajo de acercamiento a las condiciones de habitabilidad en la vivienda de interés social construida en serie en la ciudad de Mexicali, ubicadas en un nivel socioeconómico medio-bajo y en condiciones ambientales correspondientes a un clima cálido seco-extremoso, para lo cual se generó un programa de servicio social denominado 'Habitabilidad en la vivienda de construcción en serie de Mexicali'.

Dicho programa se desarrolló en tres etapas: la primera consistió en la aplicación de encuestas y mediciones ambientales haciendo uso de equipo especializado; la segunda, en una identificación más minuciosa del comportamiento y hábitos de los usuarios en el espacio interior y exterior de la vivienda, así como respecto al uso de electrodomésticos y sistemas de acondicionamiento ambiental; y la tercera, aún en proceso, consiste en la entrega de un diagnóstico al habitante cuyo contenido describe las condiciones de habitabilidad de su vivienda, así como una serie de recomendaciones divididas en costo cero, bajo, medio y alto para mejorarlas. Durante el proceso han participado estudiantes de distintos semestres, en quienes se observa una más clara noción de las diferentes circunstancias que se viven en la ciudad, y cómo varían de una zona a otra. Por otro lado, se adquirió una mayor sensibilización acerca de las formas de apropiación del espacio de la vivienda en particular, aspectos de seguridad, privacidad y confort, así como habilidades para la medición precisa de las condiciones ambientales en los espacios exteriores e interiores. Todo ello contribuye a forjar mejores bases para la aplicación de los conocimientos obtenidos en los proyectos escolares y futuros de los estudiantes. Como señala Barona Díaz, "el análisis detallado de la evolución y el estado actual de la VIBSE permite observar que la concepción de la problemática de la vivienda en México hasta este momento (2005), cuya importancia radica en reconocer sus aciertos y errores, son necesarios de tenerlos en cuenta para que en el presente se inicie una nueva etapa con mayores alcances" (Díaz, 2005).

1. MÉTODO

Organización de tareas y elección de casos de estudio

Para llevar a cabo el estudio de habitabilidad en la vivienda de interés social se comenzó por formar equipos de trabajo de tres a cinco integrantes, a partir de un programa de servicio social de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, y bajo la dirección de profesores del área de posgrado e investigación. Las tareas se dividieron en tres grupos: 1) Capacitación a los alumnos participantes, 2) Aplicación de encuestas en campo y 3) Captura y procesamiento de datos. Cada grupo trabajó de manera simultánea con los demás, por lo que el avance de uno dependía directamente del de los otros, con un progreso uniforme en la obtención de resultados.

La primera parte del ejercicio consistió en elegir colonias de la ciudad de Mexicali, B. C. como objeto de estudio, con características similares en cuanto a número de viviendas y sistemas constructivos, en su mayoría de interés social. Se aplicaron 150 encuestas, divididas en 6 fraccionamientos de construcción en serie: Ángeles de Puebla, Nuevo Mexicali, Valle del Pedregal, Valle de Puebla, Villa Florida y Villas del Rey, la mayoría de ellas ubicadas cerca de los bordes de la mancha urbana (Tabla 1).

Tabla 1. Fraccionamientos caso de estudio.

Nombre del fraccionamiento	***Total de viviendas***	***Número aproximado de habitantes***
Ángeles de Puebla	4574	30,296
Nuevo Mexicali	2294	9,176
Valle del Pedregal	7275	20,100

Valle de Puebla	12261	49,044
Villa Florida	727	2,908
Villas del Rey	4960	19,840

Fuente: Dirección de administración urbana, XXI Ayuntamiento de Mexicali, 2015.

Por otro lado, se capacitó a los estudiantes involucrados en el manejo del equipo de medición de temperatura, humedad, velocidad de viento, sonido, luminosidad y niveles de dióxido de carbono (CO_2), así como en lo relacionado al trato con las personas encuestadas durante las visitas, en las que se utilizó un mismo cuestionario de aproximadamente 30 datos, donde se tomaron en cuenta variables cuantitativas o numéricas (temperatura, lux, ruido, CO_2, entre otros) y psicosociales o cualitativas (seguridad, percepción de confort, sentido de pertenencia). (Fig.1).

Figura1: Estudiantes realizando encuestas sobre variables psicosociales y medición de temperatura y sonido en el espacio exterior.

La investigación de campo se llevó a cabo en dos períodos, el primero en los meses de febrero y marzo, y el segundo, en junio y julio; por lo que las mediciones en lo referente a habitabilidad térmica marcaban diferencias significativas debido a las condiciones climáticas de la ciudad.

2. RESULTADOS

Del estudio realizado en campo, los aspectos que abren mayor paso a la reflexión por parte de los estudiantes son los relativos a la *habitabilidad psicosocial* y *habitabilidad espacial*, pues en ellos se refleja toda característica física de la vivienda. Para ilustrar de forma más clara los resultados obtenidos en estos aspectos, se extrajeron algunas de las gráficas del documento *'Habitabilidad en la Vivienda de Mexicali'*, donde se muestran en valores porcentuales las opiniones de los habitantes, como se muestra a continuación:

Más de la mitad de los encuestados señalaron que su vivienda representa patrimonio para ellos, mientras que otras características de igual importancia como orgullo, seguridad y descanso, obtuvieron porcentajes notablemente menores. Lo anterior significa que las viviendas estudiadas son consideradas mayormente como un bien puramente material, pero que no logran aportar algún otro beneficio psicosocial a sus habitantes. (Fig. 2).

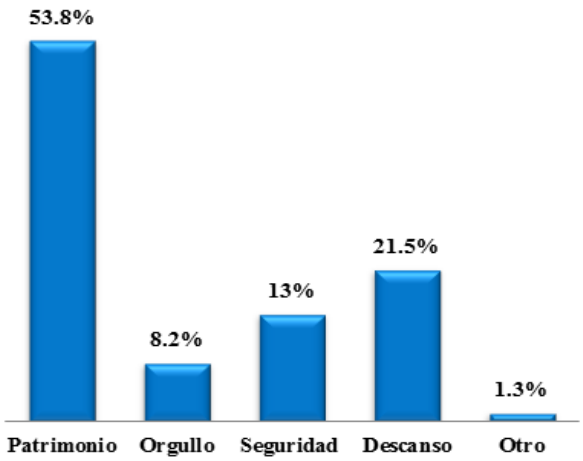


Figura 2: ¿Qué representa su vivienda para usted?

Más del 50% de los encuestados mencionaron que no siempre se sienten seguros en sus viviendas, es decir, sólo la mitad afirman tener una constante sensación de seguridad. Entre las razones más comúnmente mencionadas se encuentran el vandalismo, robo a casa habitación, robo de auto y asaltos. Como ya se ha señalado, los fraccionamientos donde se encuentra este tipo de vivienda se ubican en su mayoría en las periferias de la ciudad, lo que da paso a concentrar este tipo de situaciones adversas en esas zonas, y a su vez, marcando las diferencias entre estratos sociales. (Fig. 3).

Figura 3: *Seguridad:* ¿Se siente seguro(a) viviendo en su vivienda?

Casi el 80% de las personas encuestadas señalan que no siempre consideran que los espacios de su vivienda estén dispuestos de manera adecuada, provocando insatisfacción a lo largo de su rutina diaria. Es decir, no es posible circular de manera cómoda de un espacio a otro de la vivienda -o al menos no sin perturbar a otros miembros de la familia-. Esto muestra que el diseño del prototipo original carece de la superficie mínima necesaria (de 10 a 15% del total de la superficie construida) destinada exclusivamente para circulaciones, de manera que posibilite un desplazamiento adecuado a través de la vivienda sin interferir con las actividades de otros espacios. (Fig. 4).

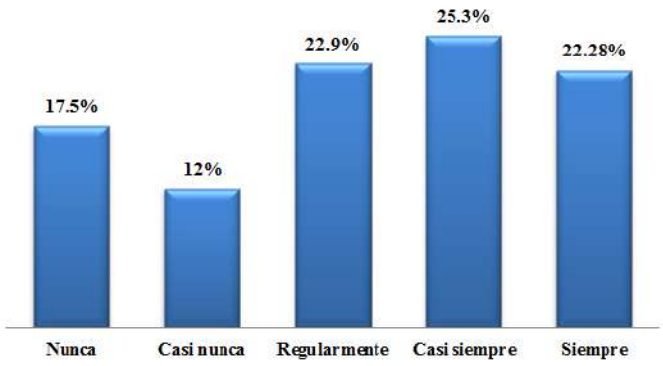


Figura 4: *Funcionalidad:* ¿Considera que los espacios de su vivienda están dispuestos de manera adecuada?

Más de la mitad de las personas encuestadas coinciden en que, de tener oportunidad de cambiar algo en su vivienda, sería respecto al aumento de espacio, seguido por mayor seguridad. Esto muestra una idea clara de las condiciones de hacinamiento que se viven actualmente en las viviendas de construcción en serie, donde el número de miembros de una familia promedio no corresponde a la superficie y cantidad de espacios en los prototipos de vivienda. (Fig. 5).

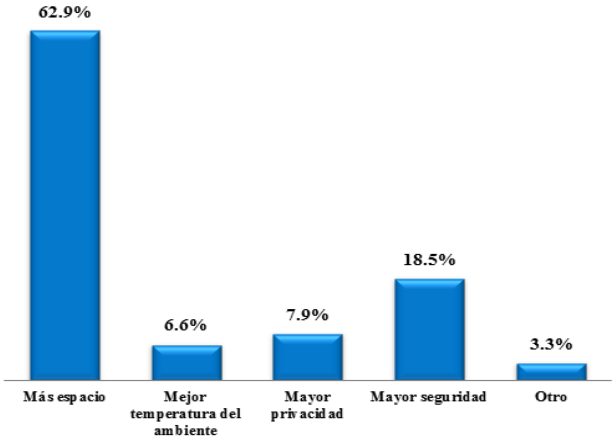


Figura 5: Si tuviera oportunidad de cambiar algo en su vivienda, ¿Qué sería?

Casi el 80% de las personas encuestadas afirman que la temperatura de la vivienda en período cálido es de muy inaceptable a regular, mientras que el 20.4% la considera aceptable y sólo para una minoría del 0.6% resulta muy aceptable. En casi la totalidad de las viviendas la paleta de materiales y sistemas constructivos manejados posee poca capacidad térmica, lo que provoca que en período cálido sea prácticamente imposible habitar las viviendas sin utilizar sistemas aire acondicionado. (Fig. 6).

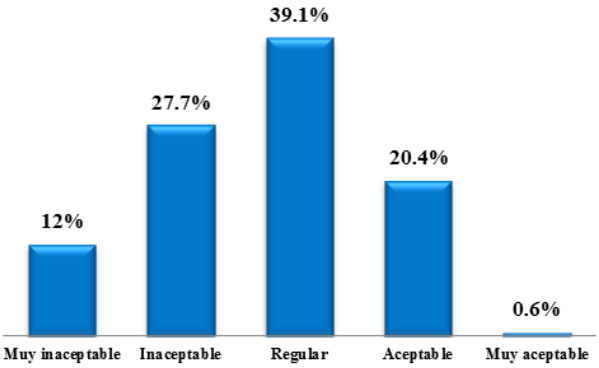


Figura 6: *Aceptación del ambiente* - ¿Cómo considera la temperatura de la vivienda en general, en período cálido?

En casi el 70% de las viviendas se considera que la temperatura interior durante el período de invierno es de regular a muy inaceptable, mientras que apenas poco más del 30% la considera de aceptable a muy aceptable (ésta última escala sólo posee el 3%). Al igual que en el período cálido, en invierno también se requiere de aislamiento térmico en la envolvente de la vivienda, sin embargo, en la mayoría de las viviendas no se posee y los materiales utilizados no tienen suficiente capacidad térmica para protegerse contra el frío. (Fig. 7).

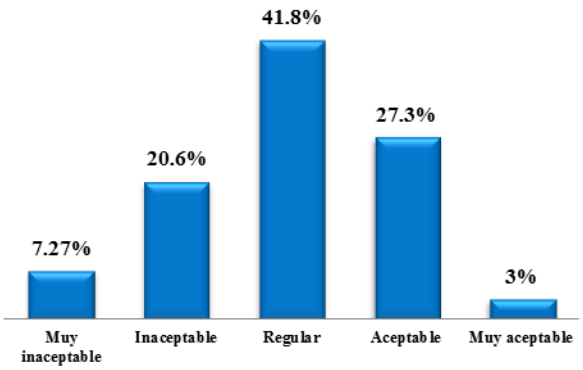


Figura 7: *Aceptación del ambiente* - ¿Cómo considera la temperatura de la vivienda en general, en período frío?

3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, y sin perder de vista el objetivo principal de esta tipología, es posible establecer que los prototipos de vivienda de interés social no cumplen con las características necesarias en relación al sitio donde se ubican, su solución formal y el número de habitantes que en ellas habitan: el 100% de las casas-habitación visitadas están construidas a base de block y losas principalmente de concreto, entregándose originalmente sin ningún tipo de aislamiento térmico o manejo de estrategias pasivas para controlar la temperatura interior, repercutiendo en el confort térmico del espacio. Por otro lado, "las tecnologías empleadas en la vivienda social no garantizan procesos constructivos con la calidad necesaria, por lo que la vida útil del producto final y las facilidades para lograr aplicar un mantenimiento sistemático, son aspectos negativos en el tipo de vivienda estudiada" (Díaz, 2005). Lo anterior provoca que en los meses de temperaturas críticas el equipo de aire acondicionado resulte imprescindible por más tiempo a fin de volver el espacio un lugar habitable. Por otro lado, las superficies de las viviendas no poseen las dimensiones mínimas requeridas en relación al número de personas que en ellas habitan -4 a 5 en su mayoría- (INEGI, 2010), por lo que en un gran porcentaje de las viviendas se han realizado ampliaciones –incluso informales-, comúnmente para aumentar el número de dormitorios, y por ende, ocupando la superficie destinada a patios exteriores o cochera, sacrificando con ello entradas de luz y ventilación natural. De no realizar ampliaciones, en aproximadamente el 60% de los casos se viven condiciones de hacinamiento.

Por otro lado, resulta viable presumir que la planeación urbana en cuanto a la ubicación de los sectores donde se encontrarán los fraccionamientos de interés social resulta deficiente, pues da paso a la formación de zonas de inseguridad: a este respecto, como se mencionó el 50% de las personas encuestadas afirman no sentirse seguras en sus viviendas o bien, no tener la posibilidad de dejar objetos al exterior o incluso abandonar completamente la casa durante el día, debido a situaciones de delincuencia y vandalismo de sus colonias. Asimismo, se detectó que una gran proporción de casas se encuentra en estado de abandono, llegando a tener calles completas de casas deshabitadas que posteriormente se convierten en picaderos o depósitos de basura, acarreando situaciones negativas para los demás colonos tales como violencia, riesgos sanitarios y deterioro de la imagen local. En la misma línea, existe una carencia de elementos de equipamiento en estos sectores, provocando que los habitantes de las viviendas recorran grandes distancias a pie antes de llegar a las paradas de transporte público o en automóvil para llegar a sus lugares de estudio y trabajo, afectando la economía familiar. "La vivienda debe producirse como parte del proceso de construcción de la ciudad, no al margen de ella. En el reciclaje de las zonas con potencial, debe incluirse a la vivienda como ingrediente principal, buscando integrar diferentes productos para distintos segmentos de la población creando zonas heterogéneas y con gran oferta de otros usos, empleo, recreación, servicios y espacio público. Al incluir la vivienda dentro de las ciudades se crean tejidos sociales equilibrados y democráticos con capacidad de generar condiciones de arraigo y riqueza social… Los desarrollos de la periferia ocupan grandes reservas territoriales que, en muchos casos, carecen de una planeación urbana integral y que se limitan a desarrollar productos con base a esquemas financieros y de demanda. Los beneficios que otorgan son escasos, la movilidad para para los habitantes de los desarrollos crea una dependencia al coche debido a la lejanía de los trabajos, escuelas, espacios públicos o de recreación, generando una necesidad de vías que conecten con la ciudad y éstas, al tener una gran afluencia de coches, causan el congestionamiento vial hacia los centros laborales" (Sánchez, 2012).

Un prototipo adecuado debería entonces ser concebido a dos escalas: la primera sería la escala urbana (como conjunto de viviendas, mediante la previsión de una ubicación estratégica respecto al resto de la ciudad, así como dotación del equipamiento necesario en términos de infraestructura y edificaciones para hacer eficiente el flujo de sus habitantes. La segunda sería la escala 'unitaria' (vivienda), en la que se deberían contemplar sistemas constructivos y dimensiones acordes al sitio y número de habitantes, así como poseer la capacidad de crecimiento ordenado de la vivienda –ejes de construcción, ubicación de vanos, emplazamiento en el terreno y dimensiones de éste-. Para ello se propone la implementación de las estrategias de adecuación bioclimática para climas cálidos, con lo cual se solventarían las necesidades térmicas sin comprometer el costo de la vivienda. Otro factor importante es el papel de los programas de vivienda, que deben ser correctamente estructurados y aplicados. Hay que reconocer que "la vivienda es uno de los ejes principales de la política social, ya que constituye un elemento fundamental del bienestar de la familia al proporcionar seguridad y sentido de pertenencia e identidad. Es por ello que se hace necesario que se legisle sobre las reglas de operación de cualquier programa de vivienda, para asegurar que las constructoras cumplan con las medidas de calidad y seguridad de las casas-habitación que construyen, y que con esto se garantice que el patrimonio de las familias mexicanas sea conservado en su integridad" (Muro, 2009).

Como es posible inferir, para los alumnos involucrados en el ejercicio fue posible extraer resultados que no solamente se reducen a la obtención de parámetros numéricos, sino también el aprendizaje obtenido a partir del análisis integral de una realidad dada en el presente, las causas que lo provocan y las posibles soluciones que den respuesta a las problemáticas encontradas, todo realizado en equipo. En otras palabras, se llega a una visión completa de la situación antes de emitir juicios y ofrecer propuestas. Además, el ejercicio de reconocer tanto los aciertos como errores en temas de diseño puede ser de gran ayuda al construir el criterio personal para la toma de futuras decisiones.

REFERENCIAS:

Barona Díaz, Edgar; Sánchez Rodríguez, Fernando Características de la vivienda de interés básica, social y económica urbana en Puebla-México e-Gnosis, núm. 3, 2005, p. 3 Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

Bojórquez G., Contreras K., Romero R., y Favela V. (2015). 'Habitabilidad en la vivienda de Mexicali'.

Sánchez, J. (2012) 'La vivienda "social" en México', p. 4. Recuperado el 15 de Agosto de 2016 de sitio web: http://www.jsa.com.mx/documentos/publiaciones_jsa/libro%20vivienda%20social.pdf

Muro, G. (2009). Opinión/columna *El sol de Zacatecas*, 'La vivienda de interés social en México'. Recuperado el 14 de Agosto de 2016 de sitio web: http://www.oem.com.mx/esto/notas/n1264338.htm

Aldrete, J. (2010). Artículo 'Vivienda de interés social', p.2. Recuperado el 15 de Agosto de 2016 de sitio web: http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/37771/1/RUA3%209-13.pdf

Barona Díaz, Edgar; Sánchez Rodríguez, Fernando Características de la vivienda de interés básica, social y económica urbana en Puebla-México e-Gnosis, núm. 3, 2005, p. 2 Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA:

Rubio Toledo, Miguel Ángel, Higuera Zimbrón, Alejandro, LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL: SOSTENIBILIDAD, REGLAMENTOS INTERNACIONALES Y SU RELACIÓN EN MÉXICOQuivera [en linea] 2011, 13 (Julio-Diciembre): [Fecha de consulta: 17 de septiembre de 2016] Disponible en:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40119956009> ISSN 1405-8626

Dellekamp, D., Sánchez, V. (2012). 'Segunda entrega FONCA: Vivienda de Interés Social'. Recuperado el 10 de Septiembre de 2016, de sitio web:
http://dellekamparq.com/esp/wp-content/uploads/2011/12/entregable-2.pdf

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

EL MARKETING SOSTENIBLE, CONSUMO Y PRODUCCIÓN.

Yohansi Paz Bermúdez
Zweb di Paz Bermúdez Yohansi, Via Giardini 6, Cagliari, Cagliari, 09127, Italia,
3404132118, **yohansipb@gmail.com**

RESUMEN

Hacer frente de los desafíos es cada vez más presente en el desarrollo sostenible, los líderes reconocidos en el marketing de los bienes de largo consumo están adoptando con éxito desde hace algunos años una serie de enfoques innovadores, que cambian profundamente en relación con el concepto que se manejaba hasta hace unos años del consumismo desenfrenado y la falta de respeto al medio ambiente.

Una nueva conciencia de la responsabilidad ambiental y social de las empresas se traduce en originales estrategias de marketing dirigida al crecimiento y a la ventaja competitiva distintiva.

Iniciativas, sobre todo en la creación de nuevos productos y en la comunicación con los consumidores, son diseñada con el concepto de marketing sostenible, sobre todo en los países anglosajones.

El uso de la energía es omnipresente, y su demanda sigue en aumento. A pesar de los esfuerzos de los últimos años por incorporar fuentes de energía más sostenibles, los combustibles fósiles aún dominan el mix energético, lo que tiene como consecuencia un impacto medioambiental negativo.

Una reducción en el consumo de energía, sumada al desarrollo de otras políticas, es ineludible para que Europa alcance sus objetivos de sostenibilidad.

El marketing es una herramienta que puede dar una respuesta adecuada a muchas de estas cuestiones. Pero el marketing, como instrumento debe adaptarse a las características de este tipo de productos y servicios que hemos dado en llamar "ecológicos".

Desde diferentes puntos de vista se pueden enfocar las estrategias con el fin de reducir la demanda de energía y minimizar el calentamiento global. En el siguiente trabajo presentamos algunas cuestiones fundamentales para que nuestro planeta tan especial siga siendo saludable.

ABSTRACT

Addressing the challenges is increasingly present in sustainable development, recognized leaders in the marketing of goods of long consumption are taking successfully for some years a number of innovative approaches to change profoundly in relation to the concept it ran until a few years ago of rampant consumerism and lack of respect for the environment.

A new awareness of environmental and social responsibility of business translates into original marketing strategies aimed at growth and the distinctive competitive advantage.

Initiatives, especially in creating new products and in communication with consumers, are designed with the concept of sustainable marketing, especially in Anglo-Saxon countries.

The use of energy is omnipresent, and demand continues to rise. Despite efforts in recent years to incorporate more sustainable energy sources, fossil fuels still dominate the energy mix, which results in a negative environmental impact.

A reduction in energy consumption, coupled with the development of other policies, it is inevitable for Europe to reach its sustainability goals.

Marketing is a tool that can give an adequate response to many of these issues. But marketing as an instrument should be adapted to the characteristics of these products and services we have come to call "ecological".

From different viewpoints focus strategies in order to reduce energy demand and minimize global warming. In this paper we present some fundamental questions for our special planet remains healthy.

Palabras claves: marketing, energía sostenible, productos ecológicos, sostenibilidad, calentamiento global, consumidor verde.

EL MARKETING ECOLÓGICO

En la actualidad la crisis ecológica que sufre nuestro planeta se debe a un sistema de producción y consumo que exige un nivel de utilización de recursos naturales, de generación de residuos y contaminantes que sobrepasa la capacidad de la naturaleza de auto regenerarse.

Generado una tendencia mundial al aumento constante del número de empresas que siguen normas sobre la cuestión. Se trata no sólo de elevar el nivel de conciencia de los dirigentes acerca de la cuestión medioambiental sino de crear toda una posición filosófica acerca de la relación empresa – entorno donde la ética ecológica basada en la conservación del medio ambiente natural no entre en contradicción con los objetivos económicos de la empresa, más aun, que pueda lograrse desde esta posición más eficiencia económica.

Por lo que la respuesta empresarial debe ir más allá de la elaboración de estrategias para satisfacer a los consumidores de productos ecológicos y aprovechar esa oportunidad del mercado, hace falta un concepto global que penetre en todas las áreas y funciones de la empresa y forme parte de su sistema de valores y de la cultura organizacional. Para contribuir a esto, el Marketing ha desarrollado su noción de Marketing Ecológico enfocando la planificación estratégica y todas las variables básicas desde esta posición.

Cuando hacemos referencia a productos o servicios ecológicos debemos de asegurarnos de que cada una de las cuatro extremidades en las que se sostiene la mesa sean sólidas y estables. Estaremos ya en capacidad de afirmar que el producto es amigable con el entorno, posee unas connotaciones específicas y que cada una de las políticas clásicas del marketing debe adaptarse a las especificidades de este tipo de producto.

En otras palabras, por más adecuado desde el punto de vista ecológico que sea el producto, la campaña de marketing puede fallar si no se atienden los otros elementos de la fórmula. Muchos productos de los conocidos como ecológicos fracasan en su puesta de largo en el mercado debido a que algún aspecto de la ecuación no ha sido tomado en cuenta. Todos estamos familiarizados con productos ecológicos cuyo precio puede llegar a ser excesivamente alto, otros productos de elevadas calidades ambientales no llegan al mercado por que fallan los canales de distribución. El marketing es una herramienta que puede dar una respuesta adecuada a muchas de estas cuestiones. Pero el marketing, como instrumento debe adaptarse a las características de este tipo de productos y servicios que hemos dado en llamar "ecológicos".

El consumidor verde o ecológico se puede definir como aquel consumidor que muestra su preocupación por el medio ambiente en su comportamiento de adquisición, buscando productos que sean percibidos como de menor impacto sobre el medio ambiente.

Para estos consumidores el calificativo ecológico es un atributo valorado en el proceso de decisión de compra. En algunos la valoración se manifestará en pagar un mayor precio por productos percibidos como ecológicos según su clase; en otros casos se manifestará en el rechazo de aquellos productos más contaminantes; y en otros casos se manifestará en preferir el producto más ecológico en igualdad de condiciones funcionales (calidad, comodidad, marca, tipo, garantía) y económicas (promoción, precio, cantidad, etc.).

La aparición de este nuevo consumidor preocupado no sólo por la satisfacción de sus necesidades actuales sino también por la protección del entorno natural, obliga a las empresas a adoptar una nueva forma de entender el marketing: el marketing ecológico (también denominado marketing medioambiental, marketing verde, ecomarketing o marketing sostenible) Ver Tabla N°1

LAS FUNCIONES DEL MARKETING ECOLÓGICO

Bajo una perspectiva ecológica, el marketing debe contribuir al desarrollo sostenible, de forma que diseñe ofertas comerciales que permitan satisfacer las necesidades presentes de los consumidores sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades futuras de esta y de las próximas generaciones. Para ello, el marketing ecológico debe asumir como misión tres funciones principales: redirigir la elección de los consumidores, reorientar el marketing mix de la empresa y reorganizar el comportamiento de la empresa.

Redirigir las elecciones del consumidor.

Puesto que la gran mayoría de la sociedad actual no está dispuesta a reducir su nivel de consumo, el reto del marketing es transformar la forma de consumo: consumir de forma diferente. Para ello, el responsable de marketing debe conseguir poner al consumidor de su parte mediante su educación, tanto en los problemas como en las soluciones medioambientales. Se debe conseguir que la preocupación por los asuntos ecológicas se transponga al comportamiento de compra y consumo. O lo que es lo mismo, se trata de incrementar el tamaño del segmento de consumidores ecológicos. La educación del consumidor se convierte en un paso necesario para superar lo que se puede calificar como “el mayor problema ecológico que sufre el planeta”: la falta de información medioambiental.

Reorientar el marketing mix.

Para conseguir que la calidad del medio ambiente no se vea afectada negativamente por las decisiones de marketing es necesario incorporar objetivos ecológicos a cada una de las políticas de marketing. En este sentido, es necesario quedar claro que no se trata de enfrentar a los objetivos económicos de cada variable de marketing con los objetivos ecológicos. Se trata de buscar la consecución de ambos a la vez.

Reorganizar el comportamiento de la empresa.

El marketing ecológico no es solamente un conjunto de técnicas destinadas a diseñar y comercializar productos menos perjudiciales para el entorno natural; es, también, una forma de entender las relaciones de intercambio, basada en buscar la satisfacción de las 3 partes que intervienen en ella: el consumidor, la empresa y el medio ambiente. Como sucede con la implantación de una filosofía marketing, aplicar la filosofía que hay detrás del marketing ecológico no se puede limitar a implantar un departamento de marketing que aplique las técnicas del marketing ecológico. Adoptar la filosofía de marketing ecológico exige que el respeto por el medio ambiente impregne todo el comportamiento de la organización, no solamente los aspectos comerciales.

No se debería comercializar un producto como ecológico centrándose únicamente en el en sí, ignorando las implicaciones ecológicas de su fabricación y de la compañía en su conjunto. En este supuesto, la empresa se encontrará sometida al continuo riesgo de recibir críticas por parte de los distintos grupos de presión y a la pérdida de confianza del consumidor. Este fue el error que cometió, por ejemplo, Proter and Gamble cuando desarrolló Ariel Ultra, un detergente concentrado que eliminaba de su fórmula los fosfatos. El detergente en si suponía una gran mejora medioambiental, pero recibió innumerables críticas de ecologistas porque durante la fase de I+D se había experimentado con animales.

Por tanto, el marketing ecológico tiene la función de desarrollar, a través de acciones de marketing interno, una cultura empresarial basada en la preocupación medioambiental, esta debe ser aceptada por todos los trabajadores, independientemente de su nivel jerárquico (desde la alta dirección hasta los operarios de línea) e independientemente de su función (compras, producción, comercialización, financiación, etc.).

En definitiva, podemos considerar que el marketing no será ecológico si no existe una gestión medioambiental de la empresa.

COMPORTAMIENTO DEL CONSUMIDOR ECOLÓGICO

El conocimiento sobre la cuestión ecológica y su comprensión han aumentado en los últimos años. Este conocimiento no ha ejercido un efecto apreciable en el plano de los consumidores, cabría hacernos las siguientes reflexiones:

- Estarán los consumidores ecológicos dispuestos a pagar los costos de estos productos.
- Creen los consumidores ecológicos en la bondad para la salud de los productos ecológicos.
- Están preparadas las personas con mentalidad ecológica para aceptar ciertos sacrificios en la calidad subjetivamente percibida en los productos ecológicos.

Guardando la relación de cifras de ventas en productos ecológicos con las ventas de productos estándares. Rige la actitud ecológica los hábitos de compra de los consumidores.

Los temas ambientales han tomado una importancia cada vez más relevante en los medios de comunicación. Algunos problemas graves e inmediatos derivados de la superpoblación y el consumo desmesurado han sido los siguientes:

- Cambio climático debido al efecto invernadero;
- Destrucción de la capa de ozono;
- Destrucción de bosques y selvas;
- Sobre explotación de recursos pesqueros y decrecimiento de productividad agrícola debido a prácticas no sostenible;
- Lluvia ácida;
- Desplazamiento y/o reducción de Culturas Ancestrales;
- Contaminación y sobre explotación de los suministros de agua dulce, y acumulación de tóxicos en los organismos.

¿Qué obstáculos tiene la gente de los países "ricos" para cambiar su conducta hiperconsumista hacia otra proambiental?

La respuesta se puede encontrar en algunos paradigmas de consumo:

- Los avances tecnológicos pueden solucionar por sí solos los problemas medioambientales.
- Falta de disposición a sufrir cambios en sus estilos de vida, sobre todo si percibe que dichos cambios requieren sacrificio y privaciones.
- Seguir rutinas en sus modos de vida y, sin el impulso necesario, posponer las acciones deseables hasta que el daño
- ambiental sea irreparable.
- Falta de respuesta a los mensajes que apelan al miedo.
- Mucha preocupación ante los problemas medioambientales, pero sin tener idea de qué se puede hacer, ni cómo, ni creer en que su acción vaya a marcar alguna diferencia.
- Considerar problemas medioambientales solo cuando el impacto afecte su esfera individual y familiar.

Existe la idea generalizada que el crecimiento del consumo ha generado como consecuencia un mayor bienestar. Sin embargo, el crecimiento del consumo acarrea aspectos positivos, como también aspectos negativos. Ver Tabla N°2

A pesar de ello, el segmento de mercado que demanda productos y servicios que sean respetuosos con el medio ambiente, es cada vez mayor, incluso está dispuesto a pagar un precio algo mayor que un producto "no ecológico", por ello la componente ecológica será fundamental en sus criterios de decisión de compra. Esta tendencia, ha dado origen a nuevos enfoques del marketing, el ecológico que también es conocido como marketing medioambiental, ecomarketing, marketing sostenible, marketing verde etc.

El concepto "verde" no puede estar ausente en nuestras futuras estrategias de desarrollo de mercados.

Desde una perspectiva social, el marketing ecológico es una parte del marketing social, es decir, de aquel conjunto de actividades que persigue estimular y facilitar la aceptación de ideas o comportamientos sociales que se consideran beneficiosos para la sociedad. Ver Fig. 1.

Desde una perspectiva empresarial, el marketing ecológico se define como: "un proceso de gestión integral, responsable de la identificación, anticipación y satisfacción de las demandas de los clientes y de la sociedad, de una forma rentable y sostenible" Peattie, K (1995)

TABLA N°1 DESCRIPCIÓN DE LOS GRUPOS DE CONSUMIDORES ECOLÓGICOS

Autor	Segmentación	Características
Neilssen y Scheepers	▪ Ecologistas consecuentes	▪ Poseen una gran conciencia ecológica y la ponen en práctica a través de su comportamiento.
	▪ Ecologistas con comportamientos aún inconsecuentes	▪ Están muy concientizados ecológicamente y han empezado a cambiar su comportamiento.
	▪ Ecologistas concientizados inconsecuentes	▪ Les preocupa el medio ambiente, pero no trasladan esta preocupación a su comportamiento.
	▪ No ecologistas	▪ No les preocupa el medio ambiente, y reflejan esta actitud en sus actos.
Calomarde	▪ Ecoactivos	▪ Se muestran favorables al pago de un sobreprecio ecológico.
	▪ Ecoconscientes	▪ ▪ Dispuestos a recibir información ecológica.
	▪ Ecopasivos	▪ Confían en que los demás resuelvan los problemas.
	▪ Ecoescépticos	▪ Tienen una actitud negativa ante los grupos ecologistas.
	▪ Ecoopuestos	▪ No están dispuestos a pagar más por productos ecológicos.
J. Walter Thompson	▪ Muy verdes	▪ ▪ Hacen muchos sacrificios por el medio ambiente.
	▪ Verdes	▪ Les preocupa el medio ambiente. Hacen algunos sacrificios.
	▪ Poco verdes	▪ Preocupados por el medio ambiente. No realizan sacrificios por él.
	▪ No verdes	▪ No les preocupa el medio ambiente.

TABLA N°2 TABLA RELACIONAL CRECIMIENTO DE CONSUMO.

ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
Empleo	Adicción al consumo
Ingresos	Escasez de recursos estratégicos
Bienestar	Polución; aire, agua, terrestre
Innovación tecnológica	Endeudamiento privado
Ocio, recreo	Recalentamiento climático
Esperanza de vida	Incertidumbre social
Movilidad	Riesgos tecnológicos
	Estrés social

Figura N°1 Comportamiento sociales campañas de Marketing.

CONSUMO Y PRODUCCIÓN SOSTENIBLE

El consumo y la producción sostenibles consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, infraestructuras sostenibles y facilitar el acceso a los servicios básicos, empleos ecológicos y decentes, y una mejor calidad de vida para todos. Su aplicación ayuda a lograr los planes generales de desarrollo, reducir los futuros costos económicos, ambientales y sociales, aumentar la competitividad económica y reducir la pobreza.

El objetivo del consumo y la producción sostenibles es hacer más y mejores cosas con menos recursos, incrementando las ganancias netas de bienestar de las actividades económicas mediante la reducción de la utilización de los recursos, la degradación y la contaminación durante todo el ciclo de vida, logrando al mismo tiempo una mejor calidad de vida. En ese proceso participan distintos interesados, entre ellos empresas, consumidores, encargados de la formulación de políticas, investigadores, científicos, minoristas, medios de comunicación y organismos de cooperación para el desarrollo.

También es necesario adoptar un enfoque sistémico y lograr la cooperación entre los participantes de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final. Consiste en involucrar a los consumidores mediante la sensibilización y la educación sobre el

consumo y los modos de vida sostenibles, facilitándoles información adecuada a través de normas y etiquetas, y participando en la contratación pública sostenible, entre otros.

Las elecciones de los consumidores cumplen una función destacada para orientar la producción, dado que los consumidores seleccionan ciertos tipos de productos de acuerdo con su lugar de origen, procesos de producción o productor. Los consumidores también ejercen una fuerte influencia a través de la manera en que compran, transportan, conservan, y consumen. El consumo se ve afectado por una amplia gama de factores, que incluyen la disponibilidad, accesibilidad y elección, los que a su vez pueden verse influenciados por la geografía, demografía, ingresos disponibles, situación socio-económica, urbanización, globalización, religión, cultura y actitudes de los consumidores y mercadeo.

El enfoque del consumo y la producción sostenibles consiste en: analizar el modo en que los países producen y consumen artículos y servicios; identificar cómo y por qué esos patrones de producción y consumo contribuyen a la degradación ambiental y a la creación de riesgos ambientales y de salud a causa de la contaminación química; e implementar mecanismos técnicos, políticos, comerciales, económicos e informativos a través de los cuales cambiar a un modelo del consumo y la producción sostenibles.

Aplicar el consumo y la producción sostenibles implica un conjunto de acciones tales como la producción limpia, la eficiencia energética, la gestión responsable de los productos químicos, una política de compra pública sostenible, el eco-etiquetado, estilos de vida sostenibles, educación para el consumo sostenible, etc.

CONCLUSIONES

El marketing verde debe trascender la comercialización de los productos llamados verdes: debe referirse al proceso y al producto. Por ello, el verdadero concepto de marketing verde necesita un considerable desarrollo y análisis, con rigor e integridad, en términos científicos, académicos, económicos y éticos. (Kangis, 1992)

Teniendo en cuenta esto, es muy importante el trabajo en conjunto de las empresas con sus proveedores, deben incluirlos en su cadena de valor y ayudarlos a realizar las transformaciones necesarias en sus procesos productivos para que estos no intoxiquen el medio ambiente.

Una de las herramientas claves del marketing es la comunicación, es decir, informar; más aún, cuando se trata de introducir nuevos comportamientos de compra que inciden en los gustos y las preferencias de los consumidores, hay que educar a los consumidores. Las empresas tienen un compromiso con el ambiente y ellas juegan un rol importantísimo en la solución del problema ambiental.

El marketing ecológico tiene una triple función: educar medioambientalmente a los consumidores y demás grupos de interés, rediseñar el marketing- mix para incorporar el factor medioambiental y crear una cultura organizativa basada en la búsqueda continua de la mejora medioambiental de la empresa.

El fomento del consumo sostenible desde la perspectiva del marketing está relacionado con su rol educativo desde un ámbito no formal.

A través de las campañas comunicativas, el marketing puede contribuir a la educación para el cambio de comportamiento de consumo hacia uno más acorde con la sostenibilidad. Para ser efectivas, las campañas han de ir acompañadas de medidas económicas, tecnológicas y normativas. Un cambio de comportamiento de consumo exitoso ha de impulsarse conjuntamente por todas las partes implicadas, autoridades, empresas e individuos, y no de forma unilateral. A este respecto, algunos autores apuntan a un necesario cambio de las prácticas en sí mismas más que a un solo cambio de los comportamientos a nivel individual.

El cuidado del medio ambiente es una tarea de todos, de aquí la importancia que trabajemos juntos por un mundo más sostenible.

REFERENCIAS

- Introduzione al Marketing Sostenibile - Quaderno realizzato nell'ambito della campagna europea (novembre 2012)
- La Mercadotecnia o Marketing Sostenible de Francisco Javier Cervigon Ruckauer
- Chamorro, A (2001). Marketing ecológico; sí, marketing ecológico. Publicado en Puertas a la Lecturas. Universidad de Extremadura. Coddington, W (1993). Environmental marketing: positive strategies for reaching the green consumer. McGraw-Hill, New York.
- Pérez Bengochea Valietti. (2008, junio 23). Marketing ecológico. Recuperado de http://www.gestiopolis.com/marketing-ecologico
- Fuller, D.A (1999): Sustainable marketing: managerial-ecological issues. SAGE Publications, Thousand Oaks.
- Hopfenbeck, W (1992). Dirección y marketing ecológicos: conceptos, instrumentos y ejemplos prácticos. Ediciones Deusto, Bilbao.
- McDonagh, P y Prothero, A (editores, 1997): Green Management, a reader. The Dryden Press, Londres.
- Ottman, J.A (1998). Green marketing: opportunity for innovation. NTC Business Books, Lincolwood, Chicago (EEUU).
- Polonsky, M.J y Mintu-Wimsatt, A.T (editores, 1995): Environmental marketing: strategies, practice, theory and research.. The Haworth Press. Nueva York.
- AZNAR, F.J. & FERNÁNDEZ, M. & RAGA, J.A. (2007) Valores, actitudes, creencias y conducta: ¿Cómo fomentar conductas ambientales responsables? Universitat de València, España
- Calomarde, J. (2000). Márketing ecológico. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Vicente, M. A. & Mediano, L. (2002). Propuestas para una segmentación estratégica del mercado ecológico. Cuadernos de Gestión, 2 (1): 11-30

"Y DESPUÉS DEL PETRÓLEO… ¿QUÉ? LAS GRANDES OPORTUNIDADES QUE TRANSFORMARÁN LA INDUSTRIA ENERGÉTICA EN EL SIGLO XXI"

Jesús A Cuéllar Jiménez
Investigación y Ventas, ERGOSolar, Cp. 74160, Huejotzingo, Pue. México
Tel 2221894863, **jacuellarj@gmail.com**

RESUMEN

La utilización de los combustibles fósiles desprendió más de un billón de toneladas de CO2 desde 1752 al 2002, causando un cambio climático; y desprenderá una cantidad igual de CO2 del 2003 al 2030, a menos que se haga un cambio radical. La política energética de México, basada en los hidrocarburos, está en crisis: el precio de los combustibles aumenta constantemente, la extracción de petróleo disminuye, incrementan las importaciones de crudo, gasolinas, gas y carbón. Las termoeléctricas, además de quemar carbón, combustóleo y gas, consumen elevadas cantidades de agua indispensables para riego y habitantes. CFE no alcanza a satisfacer la energía requerida por el país. Si el sol originó los combustibles fósiles, el cambio será utilizar las energías naturales. Su utilización dependerá del clima y de las posibilidades de cada sitio: México tiene la gran ventaja de localizarse en el cinturón solar de la tierra.

Las tecnologías alternas se desarrollaron debido a crisis o guerras por petróleo y accidentes nucleares. Las instalaciones existentes son todavía caras: se deben utilizar combinadas entre sí, complementadas con combustibles reciclados menos contaminantes como bio-gas. En las tecnologías eólicas y solares, los avances científicos y tecnológicos en los últimos años permiten generar energía eléctrica hasta en ausencias de viento o de sol. Las tecnologías termo solares recientes ya no requieren de utilizar vapor y dan utilidades durante un buen tiempo. Las instalaciones solares se pueden construir en sitios desérticos que no compiten con cultivos; las torres eólicas pueden colocarse al borde de las costas y las mareomotrices en el lecho marino sin alterar las actividades humanas ni el ambiente. El costo del kW FV se redujo muy significativamente. La tecnología de concentración solar duplicó su eficiencia. Las energías primarias son gratuitas.

Recientemente la capacidad de almacenamiento de electricidad en las baterías para autos aumentó de manera considerable. La producción en masa de dichas baterías permitirá una carga completa de kwh que resulta muchísimo más barata que un tanque de gasolina. Existe otro tipo de baterías tiene más capacidad de carga que las de Litio. Además se están desarrollando tecnologías de aire comprimido equivalente a varios miles de ciclos de carga.

Los vehículos avanzan a toda velocidad. En dos décadas los autos eléctricos serán más baratos que el más barato del 2015.

Estas grandes tendencias combinadas transformarán la industria energética en el Siglo XXI" crearán nuevas especialidades, nuevas formas de transporte, almacenamiento de electricidad, empleos limpios. Es ahora el momento de pasar de la economía basada en combustibles fósiles a la economía de las Energías Alternas.

ABSTRACT

The fossil fuel use detached more than one trillion tons of CO2 from 1752 to the 2002, causing a climate change; and from 2003 to 2030, an equal amount of CO2 will be detached again, unless a radical change is made. Mexican energy policy, based on hydrocarbons, is in crisis: the fuel price is increasing constantly meanwhile oil extracting is decreasing; in addition, crude oil, gasoline, gas and coal are now being imported. The thermoelectric technology, besides burning coal, fuel oil and gas, consume high quantities of water, needed not only by inhabitants but also for irrigation. Nowadays, CFE is not able anymore to satisfy the energy required by the country. And as it was the sun that originated fossil fuels, it would be great solving the problem with energies given by nature itself. Their source, or kind, will depend on each regional climate and possibilities: Mexico has the enormous advantage to be located in the earth solar belt.

The alternate technologies developed due to crises, wars for oil or nuclear accidents. The existing facilities are still expensive: they should be used combined among themselves, complemented with less pollutant recycled fuels such as bio-gas. Lately, scientific and technological advances in wind and solar technologies allow electric energy generation lacking wind or sun; and recently, thermo solar technologies do not require steam anymore. On the other hand, give utilities for a long time. Thermos Solar installations can be built in desert, without competing with crops; wind towers can be placed along the coasts and finally, tidal in the marine bedding without altering neither human activities nor the environment. PV kW cost has been very significantly reduced. Solar concentration technologies have doubled their efficiency. Besides, primary energies are free.

Recently, electricity storage capacity in cars batteries has considerably increased. Mass production of these batteries will allow a kWh full load, cheaper that a gasoline tankful. There is even another battery type that has more cargo capacity than the lithium one. In addition, compressed air technologies, equivalent to several thousand load cycles are developing fast.

Finally, vehicles are moving at all speed: within two decades, the electric car will be cheaper that the 2015 cheapest one!

These combined big opportunities will transform the energy industry in the XXI century; create new specialties, new electricity transport and storage forms and new clean jobs. It is now time to move from the economy based on fossil fuels to the alternative energy one.

Palabras claves: solar belt, opportunities, thermo solar, economic changes, energy industry transformation.

ANTECEDENTES

Desde *el año 1751 al 2002*, se desprendieron **más de un billón de ton de CO_2**, con todas sus consecuencias, f1. En un principio, fue por la quema de carbón para fabricar hierro y acero, uso en las máquinas de vapor, más tarde en las carbo-eléctricas: y así se dio el impulso a las industrias de la segunda parte del siglo XX. Al mismo tiempo, fue aumentando progresivamente el efecto invernadero hasta alcanzar 2°C de incremento en la temperatura media de la atmósfera. Se estima que, *del 2003 al 2030*, s**e desprenderá una cantidad igual,** a menos que se haga un cambio radical. *En 30 años*, se desprenderá una *cantidad igual* a la que se desprendió *en 250 años*.

La economía de México depende de los combustibles fósiles, f2. La extracción del petróleo disminuye,f3; incrementan las importaciones de crudo y gasolinas, f4, gas y carbón; el precio de los combustibles aumenta constantemente. Las últimas carbo-eléctricas de CFE consumen carbón importado de Australia y así será por 60 años. La carbo-eléctrica de Petacalco consume además de carbón de Australia, tanta agua como los 11 millones de habitantes de la ciudad de México: el equivalente al agua de riego de los cultivos de Tlaxcala, Morelos y Puebla juntos. Además, *CFE no produce suficiente energía eléctrica* para satisfacer las necesidades del país, la compra a productores independientes (empresas extranjeras) CFE 2007, 2008,2012.

La crisis energética en México apresurará el cambio, que lograremos, cambiando la economía basada en el petróleo por la basada en las energías alternas.

LA IRRADIACIÓN SOLAR.

Sabemos que el sol originó la vida y que, a través de millones de años, se formaron *los combustibles fósiles almacenando* así, la *energía solar*.

Características del Cinturón Solar de la Tierra.

Se conoce como cinturón solar de la tierra, f5, a la zona situada entre las latitudes de 30° LN y 30° LS por recibir mayor radiación solar que en las latitudes superiores e inferiores.

De acuerdo con los especialistas en energía solar**, la irradiación** que llega a la tierra está constituida esencialmente por: f6

- 6.6% radiación ultravioleta
- 8.92% espectro visible: energía luminosa
- **82.8%** radiación infra-roja: energía térmica

y se traduce en luz, temperatura ambiente, vapor de agua, vientos, huracanes, lluvia, corrientes marinas, mareas y vida.
Fuente: Centro de Estudios de Energía Solar (CENSOLAR) Sevilla, España Curso programado. Tomo I, pág. 4(132) 1997.
La irradiación solar es varios cientos mayor que las reservas de los combustibles fósiles y miles de veces superior a las necesidades energéticas de la humanidad, como se aprecian las proporciones f7:

- 50 veces la reserva mundial de Carbón
- 140 veces la reserva mundial de Petróleo
- 600 veces la reserva mundial de Uranio
- 1000 veces la reserva mundial de Gas

Equivale a la energía suficiente para el consumo global de la humanidad durante 40,000 años. Cada año, los desiertos del hemisferio norte, en Marruecos, Egipto, Argelia, Medio Oriente y entre otros, México, del paralelo 20° al 30° LN, reciben una cantidad de energía equivalente a 1.5 millones de barriles de petróleo por cada km^2.

En México, **esta fracción de energía solar** equivale, como irradiación normal directa promedio, a 2,050 GWh / km^2 / año. Con tal energía solar, una planta **foto voltaica** o **termo-solar** de concentradores parabólicos, y una eficiencia entre 15 y 35 %, puede producir energía eléctrica del orden de: **420 GWh / km^2 de área receptora / año.** Con la unidad de producción de energía eléctrica mencionada, se puede generar, mediante las técnicas solares, la energía eléctrica equivalente a la generada por combustión y energía nuclear: 162,395 GWh, el 64.13% del total publicado por CFE: **253,247 GWh / año** f9, en un área de **400 km^2** f8 (20 km por 20 km) equivalente a poco menos la extensión de la ciudad de Puebla. **Esa es la meta que debemos alcanzar, el 64.13%. Actualmente la eólica y la Fv producen 4,273 GWh/año, lo que representa apenas el 1.69.**La mega planta solar podría dividirse en unidades menores y localizarlas cerca de los centros de consumo. Sin embargo el uso de la energía solar deberá complementarse con energía eólica, mare-motriz y biogás para generar la demanda de energía eléctrica y reemplazar los combustibles fósiles.

México tiene la *gran ventaja de localizarse* en el **cinturón solar** de la tierra.

TECNOLOGÍAS SOLARES

La *radiación solar* se *ha utilizado* por el ser humano desde que hay vida: la primera vez que se registró en la historia fue en el año 213AC en Siracusa, cuando Arquímedes incendió las velas de la flota persa con el reflejo de los rayos solares. Los astrónomos e ingenieros han utilizado durante siglos los rayos del sol en la construcción de monumentos y ciudades. En nuestro tiempo, se busca *utilizar más que la rectitud* de los rayos solares. Necesitamos sacar la energía que se ha escapado durante milenios, el Albedo, para generar electricidad: *el sol sale para todos desde hace 4,500 millones de años y es gratis, pero es necesario saber utilizarlo*. Esto podemos hacerlo, con dos tecnologías: la **termo-solar** y la **fotovoltaica.**

Energía Termo Solar

Se desarrolló como alternativa a la escasez de hidrocarburos f10, debido a crisis o guerras por petróleo y accidentes nucleares., Las instalaciones existentes concentran la irradiación solar **en diferentes tipos de equipos**. Son todavía *caras*, se *deben utilizar combinadas* con combustibles reciclados menos contaminantes como bio-gas para generar energía eléctrica en ausencia de la irradiación

Concentradores cilíndricos parabólicos. Las **primeras plantas termo solares** para generar electricidad concentran los rayos solares en un tubo colocado en el foco de la parábola, f11. Por este tubo circula el agua que se va calentando hasta generar vapor y tiene la longitud del espejo cilíndrico parabólico. Se construyeron en el desierto de Mojave, California a consecuencia del primer embargo petrolero por la guerra del Jom Keppur. Se hicieron bajo el principio de generar electricidad con vapor de agua y un turbogenerador de tamaño casi igual al de una termoeléctrica: lo que hizo *necesarias grandes extensiones* de espejos cilíndricos y tuberías, **La segunda generación de cilíndricos parabólicos** fue a causa de la escasez de petróleo por la guerra del Golfo y se construyó en el desierto de Nevada. Para evitar los inconvenientes de transportar vapor, se calentaron aceites para evaporar agua en un intercambiador. **La siguiente generación** en España fundía sal para generar vapor.

Concentradores solares de torre. *La segunda generación termo solar* optó por una **torre central** f12.En la parte superior de la torre, se encuentra un recipiente en el cual se concentran los reflejos de cientos de heliostatos para fundir la sal a 150 m de altura. La sal fundida a 650°C se guarda en termos, al pie de la torre. Esta sal genera vapor en un intercambiador y así se produce electricidad en la noche. Estos sistemas tienen *varios inconvenientes*, *todos muy costosos*: gran inversión inicial, tiempo largo de instalación, tiempo prolongado de ajustes antes de iniciar la operación, manejo complejo de fluidos a temperatura elevada, desgaste de equipo, programación compleja de los heliostatos., c/u con un programa diferente para que todos enfoquen el mismo punto de la torre. Utilizan, además, la misma cantidad de agua que las termoeléctricas para generar vapor.

Concentradores parabólicos. Estos concentradores, a *diferencia de los primeros*, **son espejos parabólicos** y tienen el foco fuera de la parábola: en dicho foco, se encuentra un motor Stirling que esta sostenido por un brazo móvil f13. El perímetro de los espejos parabólicos es una elipse. El motor Stirling genera directamente electricidad por movimiento de un pistón impulsado por el aire caliente. Estas parábolas tienen seguimiento automático del sol y se operan a distancia. *Otra variante de este sistema* es el **Stirling-Dish**: el perímetro de la parábola, en este caso, es un círculo. Ambos modelos tienen la posibilidad de trabajar en forma independiente o conectada a la red. La unidad de menor capacidad tiene una potencia de salida de 11 kW. La primera unidad se instaló en Almería en 1992. Campos solares de China, Mongolia, Dubái y África tienen unidades de mayor capacidad. Generan desde el amanecer hasta el anochecer. El rendimiento es el doble del FV. Según la latitud pueden alcanzar 35% de eficiencia. **No requieren de Agua.** Se pueden construir en sitios desérticos que **no compiten con cultivos**. Invitamos a unas de estas compañías a la XL Semana de Energía Solar, pero les resultó muy apresurado para asistir.

Energía Solar Foto voltaica.

Esta tecnología se desarrolló *lentamente* por el *costo elevado* de las **fotoceldas** y la *baja eficiencia* comparada con la de las termoeléctricas. La energía generada por las fotoceldas se almacenaba en baterías de ciclo profundo, con objeto de utilizar la electricidad en la noche. Las baterías tenían una vida de 2 a 3 años por lo que, al desecharlas, se convertían en *residuos peligrosos*. Este fue otro inconveniente para el uso de esta tecnología. La reforma energética permitió prescindir de las baterías al hacerse la interconexión del equipo a la red de CFE. Las obleas de Si amorfo de los paneles fueron cambiando a Si poli cristalino para **mejorar la generación** de electricidad y **aumentar** la **eficiencia** al disminuir los límites entre cristales. **La conductividad mejoró** aún más cuando se hicieron mono cristales de Si, facilitando el flujo de energía. **El costo de los paneles fotovoltaicos por w FV instalado se redujo casi 100%** en los últimos años, f14. Los equipos Fv se pueden instalar sobre las casas *sin afectar el paisaje*: *se incorporan fácilmente* a la arquitectura cubriendo extensiones considerables sobre edificios, campos deportivos, oficinas, estacionamientos. Recientemente se desarrollaron *foto celdas flexibles* y en forma de *tejas*. Se pueden cubrir terrenos de cultivo con grandes instalaciones en la modalidad de **granjas solares** para suministrar energía eléctrica a *grandes consumidores* o *poblaciones enteras*, f15.

TECNOLOGIA EÓLICA.

La utilización de la energía eólica se popularizó antes que la solar en *Holanda*, por ser un país sin reservas de petróleo. *No* era *competitiva para las compañías petroleras*. Ya se conocía el principio para los molinos de viento, para sacar agua de pozos y *no se le dio importancia* pensando que se utilizaría solo en sitios con mucho viento. Sin embargo, primero, surgieron varios modelos **pequeños** y después**, grandes aerogeneradores**, f16, que han tenido **avances considerables** para generar electricidad **a diferentes velocidades de viento**. Los avances científicos y tecnológicos en los últimos años permiten inclusive ***generar energía eléctrica en ausencias de viento***. Las torres eólicas pueden colocarse al borde de las costas y las mareomotrices en el lecho marino *sin alterar* las actividades *humanas* ni el *ambiente*.

En *México*, el mapa de vientos, muestra diferentes zonas con *mucho potencial*. Los primeros aerogeneradores se construyeron en *La Ventosa*, con fondos del BM, para productores independientes. ***Este fue el primer paso*** para el cambio de la política energética de México. Antes de la reforma energética, la iniciativa privada instaló aerogeneradores para autoconsumo a través de la red de CFE, pagando solo por el porteo. Ya hay más campos eólicos en Tamaulipas, Baja California y Puebla que producen **2,330 GWh y representa el 0.92% según CFE**. La Asociación Mexicana de Energía Eólica (amdee), tiene datos diferentes y una meta alcanzable a corto plazo **de 15,000 MW para el 2022 y a largo plazo, el 40% de la producción de todas las tecnologías renovables.**

PROGRESOS DE LAS BATERÍAS.

Cuanto a las baterías para autos ***Tesla***, fabricadas por ***Panasonic***, estas aumentaron recientemente su **capacidad de almacenamiento** de electricidad casi *al doble y redujeron su peso*. Desde fines del siglo pasado, la producción en masa de dichas baterías ha *disminuido* los *precios* en **más del 80%** y el costo de carga de estas baterías *de* 100 USD/ kwh *hasta* 0.11USD/kwh en los vehículos del **2020**. Esto permitirá que una carga completa de kwh resulte muchísimo **más barata que un tanque de gasolina**. Recientemente, ***Tesla*** se lanzó a fabricar *baterías estacionarias* para casa habitación y empresas.

Otro tipo de baterías tiene *capacidad de hasta 5,000 ciclos de carga*, de larga duración, 10 veces más que las baterías de *ion de Litio*. En Francia, la tecnología **Bolloré** tiene **baterías ultraligeras de ion de Litio, 100% ecológicas** sin solventes y con Litio reciclable, para *los autos compartidos, tranvías, autobuses* **y** con el mismo principio, **baterías estacionarias** que almacenan energía solar Fv para hospitales, estadios y plantas potabilizadoras en Togo, Nigeria. En París, tiene 3,800 puntos de recarga para 3,485 vehículos compartidos. En todo Francia, son 7,000 puntos de recarga (que representan 60 % del total).

ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA INDUSTRIA Y MOVER VEHÍCULOS.

Por otra parte, Tata Motors en la India desarrolló una tecnología de **aire comprimido** equivalente a varios miles de ciclos de carga: tienen un futuro prometedor.

ASÍ AVANZAN LOS VEHÍCULOS A TODA VELOCIDAD…

E**n México, l**os primeros autos eléctricos fueron *Leaf* ***de Nissan,*** utilizados como taxi que se usan también en otras ciudades del mundo.

En Estados Unidos,

Fueron ***Volt de GM*** y otras marcas. El más reciente es ***Tesla***.f17, el auto eléctrico que adelantó el futuro. El modelo más reciente, se conduce en automático: lo utiliza *Huber* como taxi privado. Por su parte, Ford está desarrollando también sus modelos.

En Francia,

La Compañía *Bolloré* empezó en 2011: tiene actualmente **70,000 autos eléctricos compartidos, *Autolib***, en París y **100,000** en Detroit. *Bolloré* cambiará los talones de recargas por **15,000 ton de bonos de CO_2** (base de 117gr/km). *Autolib*, tendrá sucursales en Indianápolis, Detroit, Los Ángeles, Londres, Roma, Turín. Invitamos la compañía a la XL Semana de Energía Solar, pero era muy apresurado para asistir.

En India,

La **Compañía *Tata Motors***, presentó en 2014 un modelo Mini CAT, f18 *impulsado por aire comprimido*: costo de venta 8177 $, carga de aire en ciudad 3 min, (€ 1 = 69 rupias) por cada 100 km, en casa 3 hrs (€ 1 = 69 rupias) y el coche hará 300 kilómetros con una velocidad máxima de 105 km/hr.

En México.

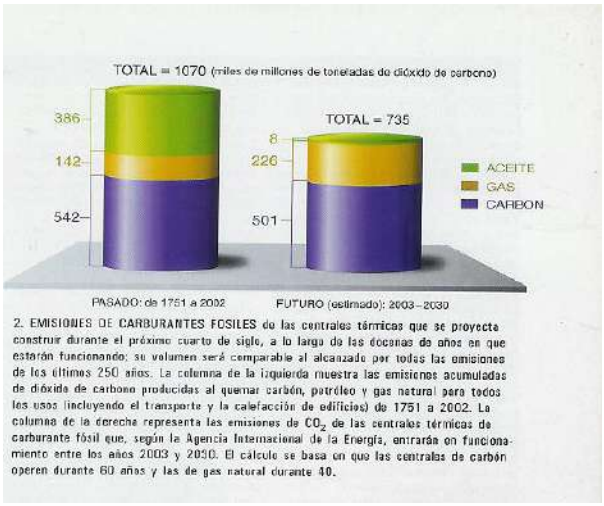
Existen 20 taxis Leaf para el centro histórico de la ciudad de México. Recientemente la compañía ***Tesla*** mostró el Modelo "S" en Sta. Fé. En el 2020, Ford producirá autos eléctricos en Guanajuato para exportar y La BUAP tiene un vehículo eléctrico experimental.

En los próximos años los autos eléctricos serán más baratos que el más barato del 2015.

CONCLUSIÓN

"Estas grandes ***OPORTUNIDADES COMBINADAS*** *transformaránPlaPIndustriaPenergéticaPenPelPSigloPXXI": crearán nuevas especialidades, nuevas formas de transporte, otros almacenamientos de electricidad, nuevas empresas y más empleos limpios.*

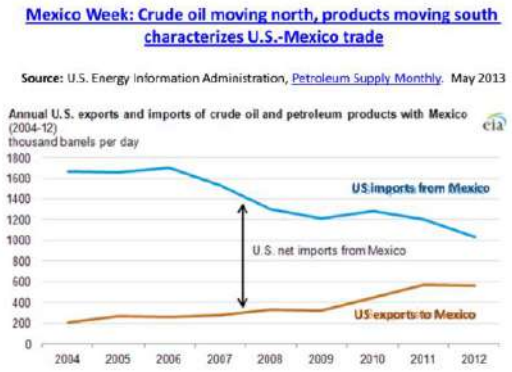
Ahora es el momento para México de salir de la crisis económica y energética, pasar de la economía basada en los combustibles fósiles a la economía de las Energías Alternas.



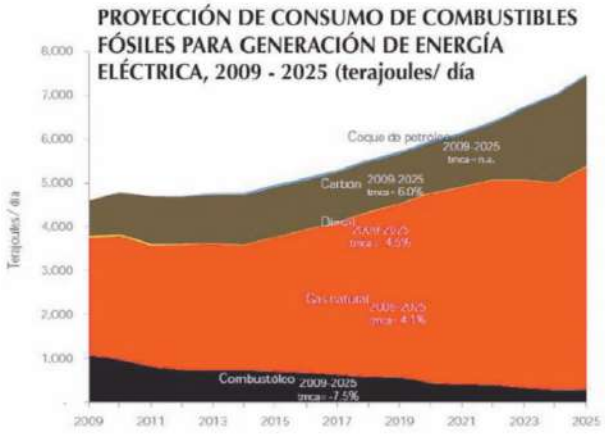
2. EMISIONES DE CARBURANTES FOSILES de las centrales térmicas que se proyecta construir durante el próximo cuarto de siglo, a lo largo de las décanas de años en que estarán funcionando; su volumen será comparable al alcanzado por todas las emisiones de los últimos 250 años. La columna de la izquierda muestra las emisiones acumuladas de dióxido de carbono producidas al quemar carbón, petróleo y gas natural para todos los usos (incluyendo el transporte y la calefacción de edificios) de 1751 a 2002. La columna de la derecha representa las emisiones de CO_2 de las centrales térmicas de carburante fósil que, según la Agencia Internacional de la Energía, entrarán en funcionamiento entre los años 2003 y 2030. El cálculo se basa en que las centrales de carbón operen durante 60 años y las de gas natural durante 40.

f1 CO_2 acumulado desde 1751 al 2002 y proyección esperada del 2003 al 2030 Revista Energía Hoy.

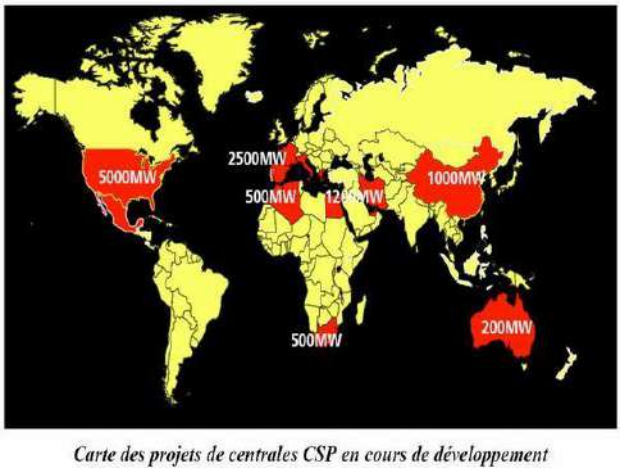
f2 Mexican Petroleum Production /year US Energy Information Administration. August 2008



f3 Crude oil moving north, products moving south
Source: US Energy Information Administration Jun 2013

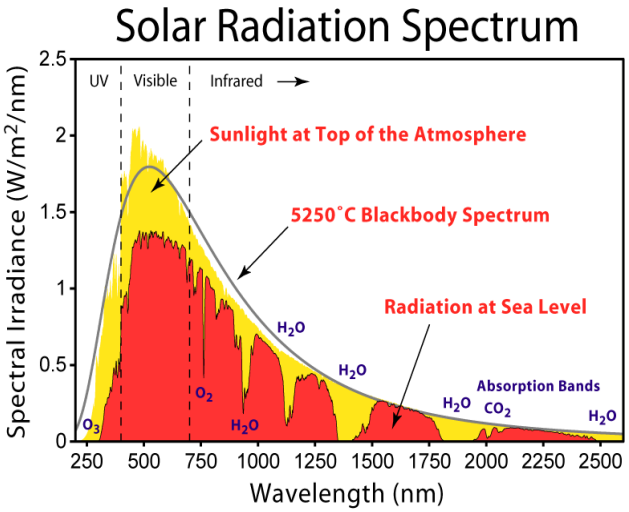


f4 CFE Dirección de Operaciones CFE Diciembre 2015
CFE Prospectiva del Sector Eléctrico 2010-2025.
Graf 57pag 168

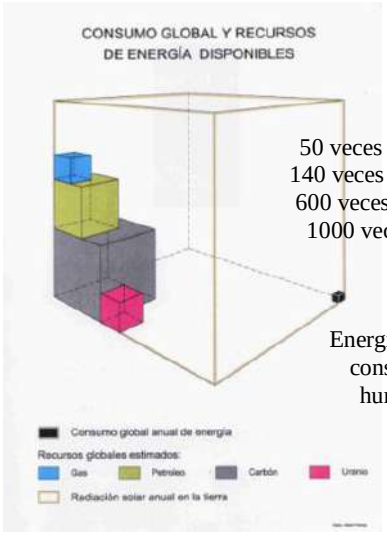


Carte des projets de centrales CSP en cours de développement

f5 Cinturón Solar de la Tierra **Fuente**
Global Energy Network Institute (GENI) 2006



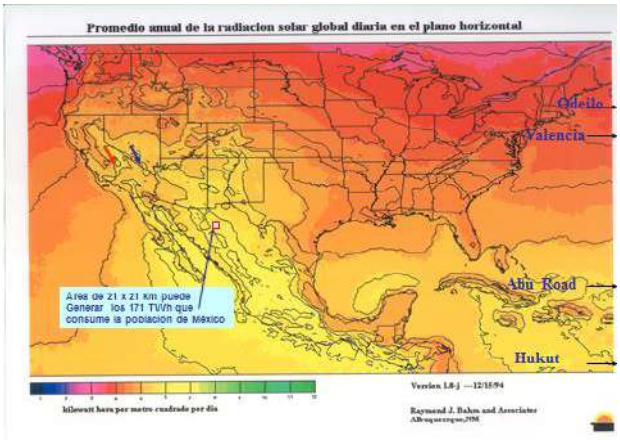
F6 Centro de Estudios de Energía Solar (CENSOLAR) Sevilla España. Curso programado. Tomo I, pág. 4(132) 1997



50 veces la reserva mundial de Carbón
140 veces la reserva mundial de petróleo
600 veces la reserva mundial de Uranio
1000 veces la reserva mundial de gas

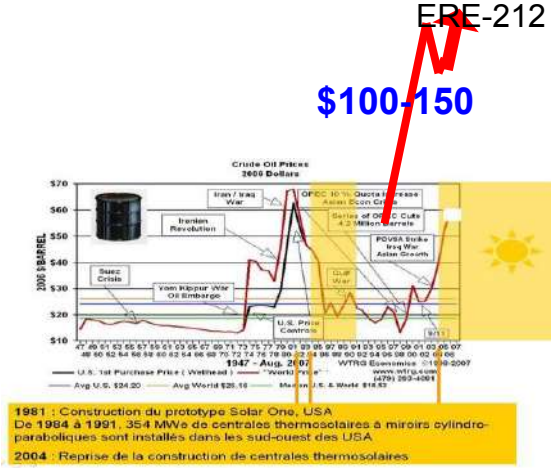
Energía suficiente para el consumo global de la humanidad durante 40,000 años.

f7 Consumo Global de Recursos y Energía Disponibles . Publicación de ONU 2000

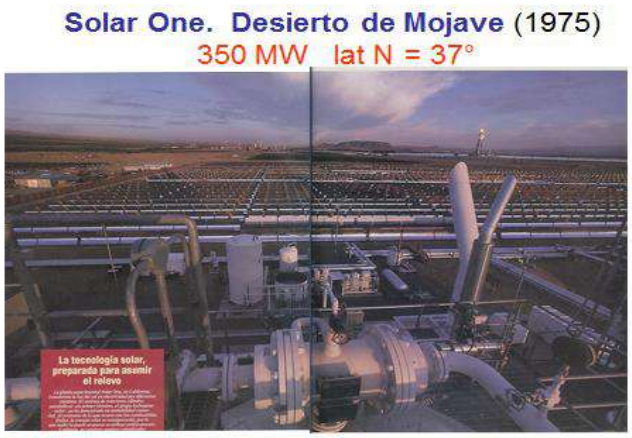


f8 Radiación Solar promedio en kwh/m2/año.
Raymond J. Baker & Associated Albuquerque NM.

f9 Generación Neta anual de electricidad
Prospectiva del Sector Eléctrico 2010- 2025.
Dirección de operación CFE Dic 2015

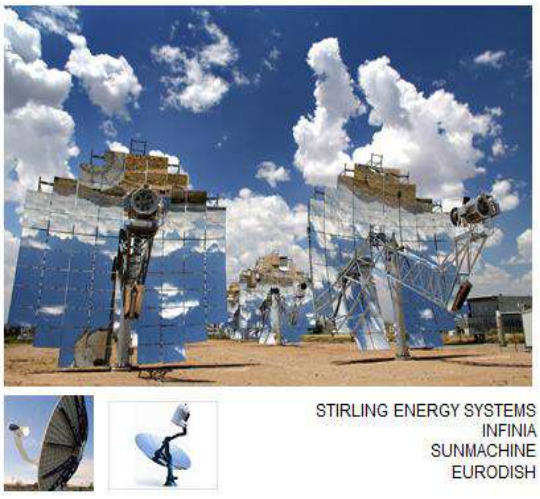


f10 Las instalaciones solares se desarrollaron a causa de las crisis de petróleo y desastres nucleares.

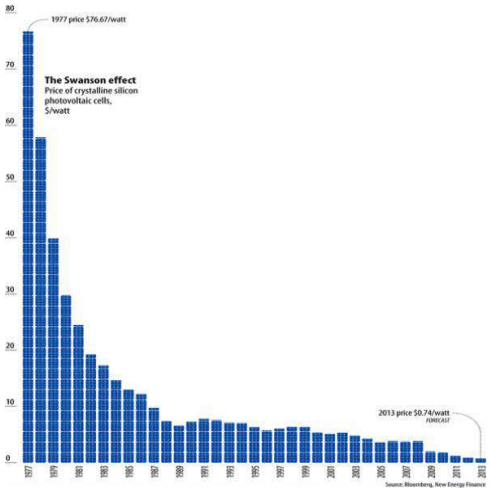


f11 Planta Solar One. Concentradores Cilíndrico Parabólicos calienta agua, generar vapor para el turbogenerador.
Revista

f12 Torre solar con 1255 heliostatos que funden la sal en la torre para generar vapor y electricidad en la noche
WWW.Abengoa.org



f13 Campo de concentradores solares con eficiencia de 30- 35% con seguimiento automático del sol.
Cleannergy.broshure. WWW.CLEANERGY.COM



. f14 Variación del costo de paneles fotovoltaicos USD/w
Source: Bloomberg New Energy Finance. 2013

f15 Granja Foto Voltaica en un antiguo campo de lavanda al sur Francia. "Les Mees".112,780 paneles
Selecciones Abril 2013 pág. 8 – 9

f16 La energía eólica está creciendo al 30% anual en 2007
Fuente: International Energy Statistics, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy (DOE).

f17 AutoTesla Mod S. El auto eléctrico que avanzó el futuro
La batería tesla de Li, cubre toda la charola del auto
www.tesla.org

F 18 Mini CAT. impulsado por aire comprimido
Costo de venta 8177 $ carga de aire en ciudad 3 min, € 1 por cada 100 km. Vel 105 km/hr. www.tata.motors.com

REFERENCIAS.

- **f1** Emisiones de carburantes Fósiles. Revista Energía hoy (2003)
- f2 US Energy Information Administration. Last up dated: September 21.2015. Mexican oil proved reserves
- f3 US Energy Information Administration. Jun 2013. Characterizes U.S. Mexico trade.
- f4 Dirección de Operaciones CFE Diciembre 2015. Prospectiva del Sector Eléctrico 2010-2025. Graf 57 pag 168
- f5 Global Energy Network Institute (GENI) 2006. Proyectos CSP en desarrollo en el Cinturón Solar de la Tierra.
- f6 Energy (the useful portion of energy) Data to produce this graphic was taken from a NASA publication 2000
- f7 Centro de Estudios de Energía Solar (CENSOLAR) Sevilla, España. Curso programado. Tomo I, pág. 4(132) 1997
- f8 Raymond J. Bahm & Associates. Albuquerque N.M. US. Version1.0.j 12/15/94 Radiación Solar promedio en kwh/m2/año. .
- F9 Dirección de operación CFE Dic 2015. Generación neta anual de electricidad Prospectiva del Sector Eléctrico 2010- 2025 pág. 165
- f10 WTRG. Economics 09/11 . Crude Oil Prices Variation 1947-2011. WTRG. Economics.org
- f11 Solar One Inc. 1975.Planta Concentración Sola Parabólico experimental. Revista
- f12 Torre Solar de Abengoa. Plataforma de Solucar. Sevilla España 2007 Abengoa Solar. www.abengoa.solar.org
- f13 Infinia Corporation Stirling Energy System
- f14 Bloomberg New Energy Finance Jun 2013 United Nations Environment Programme (UNEP) report. Variación del costo de paneles FV en -100% USD/W.

f15 Les Mees. 2012. Granja Foto voltaica en el Sur de Francia. Selecciones Abril 2013 pág. 8-9

- f16 Energy Information Administration, U.S. Department of Energy (DOE- 2007) Incremento del 30 % annual de EOL.
- - f17 TESLA. Auto Tesla Modelo S Auto eléctrico más evolucionado. 2015 en Santa Fé. – 2016 www.tesla.org

f18 TATA Motors, India Mini CAT Abril 2014 auto impulsado por aire comprimido, 2016 www-tatamotors.com

40 AÑOS
ANES
Asociación Nacional de Energía Solar

ISES
International Solar Energy Society

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR 2016

Solar Fotovoltaica "SFV"

- Sistemas Conectados a Red
- Sistemas Autonomos e Hibridos No-conectados a Red
- Células y Módulos Fotovoltaicos

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANALISIS TERMICO Y ENERGETICO DE LA VIVIENDA EN VALLE DE SAN PEDRO, BAJA CALIFORNIA: EN BUSQUEDA DE LA SUSTENTABILIDAD.

René Delgado, Eric Villanueva-Vega, Ixchel Camacho, Miguel I. Sahagun
ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México.
Teléfono (664) 676-8222, **dirección de e-mail;** rene.delgado.rendon@uabc.edu.mx, eric.villanueva@uabc.edu.mx, ixchel.camacho@uabc.edu.mx, isahagun@uabc.edu.mx

RESUMEN

Uno de los objetivos de la utilización de las energías renovables en la vivienda es procurar un buen confort y nivel de calidad de vida de los ocupantes de la vivienda. Los elementos constructivos de la vivienda impactan en gran medida en los consumos de energía de la vivienda por concepto de climatización, esto conlleva una relación directa en la calidad de vida de las personas. El consumo de energía entonces, es un aspecto importante cuando se trata de diseñar una vivienda y de integrar a esta alguna tecnología de energía renovable. El presente trabajo realiza un análisis del comportamiento térmico de la vivienda tijuanense, específicamente; los modelos del desarrollo habitacional de Valle de San Pedro, el cual originalmente fue concebido como un desarrollo sustentable. Así mismo; se analiza el escenario de uso de tecnología eólica y fotovoltaica, de modo que en conjunto con el diseño original se simulan tales escenarios y se determina la configuración adecuada mediante el uso de una metodología fundamentada en el uso de programas como CYPE CAD, RETSCREEN y HOMER para generar un escenario más cercano a la sustentabilidad. Una vez planteados los escenarios y realizadas las simulaciones, se comparan entre sí, para determinar la configuración que genere mayores ahorros energéticos y permita conservar el confort de los ocupantes, contemplando el análisis técnico y financiero de cada escenario como los criterios principales que definan la viabilidad de cada caso.

Palabras clave; sustentabilidad, energías renovables, simulación, análisis térmico, tecnología eólica, ahorro energético, viabilidad.

ABSTRACT

One of the objectives of the use of renewable energies in residential is to provide a good quality of life and comfort for people. The construction components of the house impact on energy consumption for cooling or heating, this is directly related with the quality of life of people. Then the energy consumption is an important aspect to designing a house and integrate to this some renewable energy technology. This paper is an analysis of the thermal behavior of the homes in Tijuana, specifically; the residential development of Valle de San Pedro, which was originally conceived as a sustainable development. Likewise; the scenario to use wind and photovoltaic technology is analyzed, so that together with the original design scenarios are simulated, and appropriate configuration is determined by using a methodology based on the use of programs like CYPE CAD, RETSCREEN and HOMER to generate close conditions to sustainability. Once developed the stage and performed simulations, these are compared with each other to determine the configuration that generates greater energy savings and allow people preserve comfort, analyzing the technical and financial scenarios, set as the main criteria to define the feasibility of each case.

Key words: sustainability, renewable energy, simulation, thermal analysis, wind technology, energy saving, viability.

INTRODUCCION

En el municipio de Tijuana se inició un proyecto que sería modelo a seguir como un macroproyecto de vivienda sustentable en México [1], el desarrollo habitación denominado Valle de San Pedro, el cual se localiza en la zona limite colindante con el municipio de Tecate en baja California y sería el primer Desarrollo Urbano Integral Sostenible (DUIS). Los problemas macroeconómicos que afectaron a las empresas involucradas en este proyecto como la desarrolladora URBI, desembocaron en un proyecto inconcluso con grandes problemas que afrontan los habitantes de este fraccionamiento hasta la fecha.

Actualmente el fraccionamiento que originalmente en su primera etapa contemplaba más de 10 mil viviendas, cuenta con 379 unidades en obra negra y 2802 viviendas terminadas de las cuales la mayoría están ocupadas y solo unas pocas en abandono, aunado a los servicios insuficientes. Además del fraccionamiento, cercana se encuentra la unidad de la Universidad Autónoma de Baja California, lo cual permite dar algo de dinamismo al fraccionamiento, como espacio habitacional de estudiantes y empleados de la universidad. Es importante destacar que en suma son 3181 unidades habitaciones, siendo apenas una tercera parte de lo proyectado en la primera etapa del proyecto. Lo anterior es relevante, ya que al considerar continuar con el desarrollo de nuevas viviendas, es conveniente integrar las medidas de sustentabilidad.

Figura 1. Vivienda vertical multifamiliar de Frac. Valle de San Pedro.

Este trabajo permite observar el potencial de aprovechamiento de los recursos energéticos en función de las necesidades y características de las viviendas y sus ocupantes, para considerar escenarios y alternativas que permitan llevar este desarrollo a la sustentabilidad energética. El análisis de escenarios de sustentabilidad, permitiría ya sea a la comunidad de Valle de San Pedro, a los desarrolladores residenciales y a los programas de gobierno, evaluar las alternativas que la Universidad ha considerado. Actualmente, las viviendas ocupadas ya cuentan con un sistema de calentamiento solar de agua, sistema que contribuye al ahorro del consumo de gas LP para calentamiento de agua, empleando tecnología de placa plana y tubos evacuados.

METODOLOGIA

La zona donde se sitúa el fraccionamiento Valle de San Pedro, es un área donde se realizan principalmente actividades agrícolas y pecuarias, aproximadamente a 5 km de la carretera que comunica Tijuana y Tecate. El clima predominante va de frio a templado, por lo que durante la época invernal se hace necesario el uso de agua caliente tanto para duchas como para aseo.

Para el análisis se siguió la siguiente metodología que se describe:

i. Definición de la vivienda. La vivienda es de dos tipos, multifamiliar con edificios de dos niveles, y multifamiliar vertical de 3 niveles con dos alas. El diseño es el mismo para cada casa, con superficie construida de 36m^2, 2 habitaciones, sala comedor, cocina y 1 baño con ducha.
ii. Definición de la demanda eléctrica de la vivienda. Se asume que el número de ocupantes por vivienda en promedio es de 3 personas, que requieren el mínimo de aparatos eléctricos como son: tv, pc, radio, lavadora, licuadora, microondas, plancha, focos y refrigerador.
iii. Análisis de recursos renovables para generación de energía. Se recabo la información meteorológica de la estación de monitoreo situada en la unidad de la universidad para obtener lecturas del área de variables como radiación solar, velocidad de viento y temperatura ambiente.
iv. Simulación. Se utilizaron los programas de CYPECAD MEP, RetScreen y HOMER para realizar las simulaciones sobre los requerimientos de energía de la vivienda y sus ocupantes y para dimensionamiento de las tecnologías propuestas; fotovoltaica, eólica.
v. Análisis de simulaciones. De las simulaciones se analizaron los resultados obtenidos para definir la viabilidad de cada una de las tecnologías propuestas en función del recurso solar y de viento disponible, y con base a la energía entregada por cada sistema.

El programa CYPECAD MEP [2], permitió simular la vivienda para determinar si el calentador solar con el que ya cuentan las casas es adecuado para las condiciones térmicas requeridas de agua en la vivienda, el programa RetScreen permite analizar y dimensionar el sistema fotovoltaico [3] y HOMER permite analizar el sistema de aerogeneración y su dimensionamiento [4].

DEFINICION DE LA VIVIENDA

Cada casa habitación tiene el mismo diseño, por lo que se puede asumir que este factor permite generalizar las necesidades energéticas de la vivienda de Valle de San Pedro. En la figura 2 se observa la vista isométrica de la vivienda así como la distribución de los espacios.

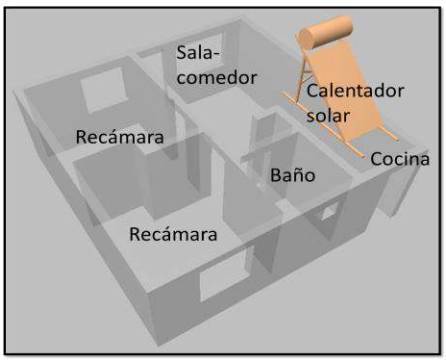


Figura 2. Distribución de espacios en la vivienda de Frac. Valle de San Pedro. Fuente: Elaboración propia.

La superficie total de construcción es de 36 m^2, y cuenta con un calentador solar de placa plana de 2m^2 de superficie de captación y un termotanque de mezclado directo con capacidad de 150 litros, el sistema de calentamiento solar funciona por termosifón a fin de evitar el costo del sistema de bombeo. Cuenta con un sistema de calentamiento de agua de respaldo que consiste en un calentador de paso de gas LP, los materiales constructivos de la vivienda son; bloque de 15cm de espesor, loza de 10cm, sin material aislante en paredes y techos.

La casa mide 6mX6m distribuyendo los espacios en 2.8mX6m para habitaciones y 3.2mX6m para sala-comedor-cocina-baño, ya que básicamente el diseño fue pensado en familias pequeñas de 3-4 personas o parejas, y para personas que laboran en la industria de la región, es decir, de bajos ingresos [5].

DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA

Los requerimientos de energía eléctrica en una vivienda equipada con lo mínimo de electrodomésticos se estiman en 7.5 kWh-día contemplando los datos que se muestran en la tabla 1 [6].

Tabla 1. Consumo de energía eléctrica de electrodomésticos para una vivienda de bajos ingresos. Fuente: portal-Tijuana, consumo de aparatos eléctricos residenciales en Tijuana.

aparato	Potencia watts	Tiempo de uso (hr)	Wh	kWh
licuadora	60	0.2	10.0	0.01
estéreo	75	3.0	225.0	0.23
lámparas	10	8.0	80.0	0.08
lavadora	400	0.5	200.0	0.20
microondas	1000	0.3	333.3	0.33
plancha	1000	0.5	500.0	0.50
pc	350	4.0	1400.0	1.40
tv	200	6.0	1200.0	1.20
refrigerador	440	8.0	3520.0	3.52
			kWh/día	**7.47**
días del mes	30		**kWh/mes**	**224.05**

Se estima que mensualmente cada hogar de Valle de San Pedro puede consumir hasta 224 kWh, lo cual varia respecto al tiempo de uso de los aparatos y de la potencia de cada uno, el factor de ocupancia está en función de cada caso ya sea que los ocupantes laboren, estudien o ambos, sin embargo se considera que siempre hay personas en la vivienda.

RECURSO SOLAR Y EOLICO

Baja California es un estado privilegiado en cuanto a radiación solar se refiere, ya que en promedio recibe 5.5 kWh/m^2-dìa en la zona norte del estado correspondiente al municipio de Tijuana [7]. En la tabla 2 se muestran los datos de recurso solar y de viento disponible en la zona del fraccionamiento de San Pedro, situado en las coordenadas 32˚27´ latitud norte y 116˚40´ longitud oeste.

Tabla 2. Recurso disponible de radiación solar y viento en la zona del Fracc. San Pedro, Valle de las Palmas, Tijuana, B.C. Fuente: Atmosferic Science Data Center.

	RADIACION kWh/m2/d	VEL. VIENTO m/s	TEMP. AMB. °C
ENERO	3.19	4.2	11.5
FEBRERO	3.95	4.1	12.4
MARZO	4.99	4.2	14.6
ABRIL	6.02	4.2	17.2
MAYO	6.68	4.5	19.6
JUNIO	6.96	4.4	22.3
JULIO	7	4	25.2
AGOSTO	6.62	3.7	26.1
SEPTIEMBRE	5.69	3.7	24.3
OCTUBRE	4.39	3.5	20.2
NOVIEMBRE	3.54	4	14.9
DICIEMBRE	2.93	4.1	11.3

A partir de estos datos, se considera que la radiación solar disponible es buena para ser aprovechada por la tecnología fotovoltaica para generación eléctrica. Además, la velocidad promedio de viento disponible a 10m de altura sobre el piso, es buena para micro aerogeneradores de tipo residencial, los cuales se instalan a partir de los 15m-20m de altura y cuya generación suele arrancar a partir de los 3m/s. Para el análisis del calentador solar de agua, se emplean los datos de la estación de la base de datos de CYPECAD, cuya información de radiación solar y de temperatura ambiente son aproximadas a las dadas para el fraccionamiento, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Recurso disponible de radiación solar y temperatura de la ciudad de Tijuana.
Fuente: Estación meteorológica Grl. Abelardo L. Rodríguez.

MES	Rad kWh/m2	Temp ℃	Temp. red ℃
Enero	3.17	14	17
Febrero	3.94	15	15
Marzo	5.19	15	14
Abril	6.50	16	15
Mayo	6.98	18	15
Junio	7.20	20	16
Julio	7.06	22	18
Agosto	6.49	23	20
Septiembre	5.58	22	21
Octubre	4.40	20	22
Noviembre	3.49	17	21
Diciembre	2.94	14	19

SIMULACION EN CYPECAD MEP, HOMER Y RETSCREEN.

Para realizar las simulaciones se realizó la selección de los equipos disponibles en el mercado que pudieran adaptarse a las condiciones de disponibilidad de recurso y demanda de energía en la vivienda. Por la parte térmica de calentamiento de agua se optó para la simulación por un calentador de placa plana por termosifón, con área útil de captación de 1.99 m2, rendimiento óptico de 0.76, absorbedor de cobre, tubería de 8mm, aislado con poliuretano con espesor de 30mm, cubierta de vidrio templado de 4mm y termotanque de 150 l. El colector se considera en un ángulo de inclinación de 40 grados orientado al sur, buscando con esta posición optimizar el calentamiento de agua en los meses invernales de noviembre a marzo.

Para el aerogenerador, se seleccionó analizar el AEOLOS H1000, el cual tiene una potencia nominal de 1000w, con velocidad de arranque a 2.5m/s, el cual comienza a generar a partir de los 4m/s, un peso de 60 kg, además de soportar velocidad de viento de hasta 45m/s, y se considera una altura de instalación de 20m para la turbina [8]. Respecto al sistema fotovoltaico, se seleccionaron módulos de silicio policristalino de Kyocera, con capacidad instalada de 480Wp con eficiencia del 13%, instalados a una inclinación de 32 grados orientados al sur para optimizar la producción de electricidad durante todo el año [9].

Para el análisis de calentamiento solar de agua, se utilizó CYPECAD-MEP, empleando la información que se muestra previamente en la tabla 3, y los planos de la vivienda como se muestran en la perspectiva de la figura 2. En el caso del análisis del aerogenerador y del sistema fotovoltaico se empleó HOMER y RETScreen para el análisis y validar los resultados comparando ambos programas, a fin de que la energía producida sea suficiente para satisfacer el consumo anual en la vivienda que se estima en 2,689 kWh-anuales. Los resultados obtenidos en cada caso se muestran en la tabla 4 para calentamiento de agua, y en la tabla 5 los resultados de los sistemas Fotovoltaico y Eólico.

Tabla 4. Resultados Calentador solar de agua (CYPECAD-MEP). Fuente: Elaboración propia.

	Demanda (kWh)	Energía Aux (kWh)	Fracción solar (%)
Enero	128.5	29.8	77
Febrero	120.7	17.5	86
Marzo	136.0	3.8	97
Abril	130.8	0.0	105
Mayo	133.3	0.0	104
Junio	125.7	0.0	105
Julio	125.2	0.0	107
Agosto	119.6	0.0	109
Septiembre	111.2	0.0	108
Octubre	112.6	0.0	101
Noviembre	111.3	11.6	90
Diciembre	120.8	28.7	76
ANUAL	**1,475.8**	**91.4**	

Tabla 5. Resultados Sistema FV y Eólico (HOMER y RETScreen). Fuente: Elaboración propia.

SISTEMA FV			**SISTEMA EOLICO**		
HOMER kWh-anual	RETSCREEN kWh-anual	Variación %	HOMER kWh-anual	RETSCREEN kWh-anual	Variación %
842	**795**	**5.9**	**1,775**	**2,000**	**11.3**

ANALISIS DE RESULTADOS SIMULADOS.

Con respecto al calentador solar de agua, los resultados del CYPECAD-MEP muestran que la capacidad del calentador de placa plana, el recurso disponible de radiación solar y la inclinación de la instalación son suficientes para la mayor parte del año, siendo necesario el uso del sistema de respaldo de calentador de paso solo en periodos cortos, tal como se observa en la tabla 4. Los meses más fríos de diciembre a febrero son los críticos pero aun así el calentador solar cubre en gran medida la demanda de agua caliente, es decir, el 94% de los 1,567 kWh-año requeridos para calentamiento son cubiertos por el colector solar.

El comportamiento de la producción de energía eléctrica durante el año se pueden observar en las gráficas que facilita el programa HOMER como se muestra en la figura 3, figura 4 y gráfica 1. En la figura 3 y gráfica 1, se observa que el comportamiento del sistema fotovoltaico respecto a la producción eléctrica a través del año, es notoriamente uniforme, es decir, la posición en que instalo el sistema permite optimizar y maximizar la producción del sistema a lo largo del año, aunque en los meses de verano a partir de mayo a agosto existe un pequeño incremento en la producción.

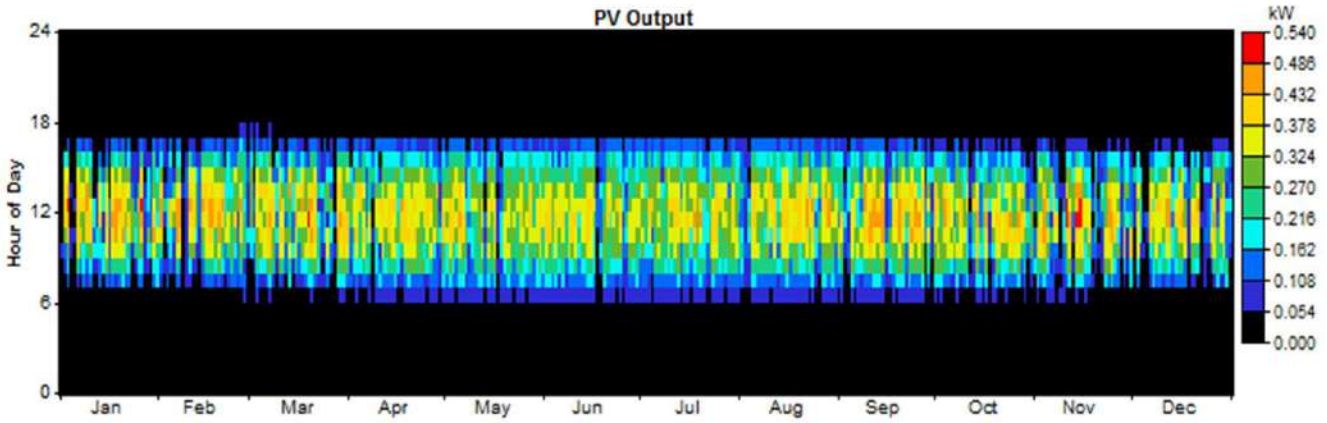


Figura 3. Comportamiento de producción eléctrica del sistema Fotovoltaico. Fuente: Simulación en HOMER.

Respecto a la figura 4, es notable la intermitencia del recurso eólico, sin embargo la periodos de producción son largos respecto a la duración del día, es decir, hay viento disponible durante la mayor parte del día en la mayoría de los meses siendo mayo y junio los más productivos para el sistema eólico.

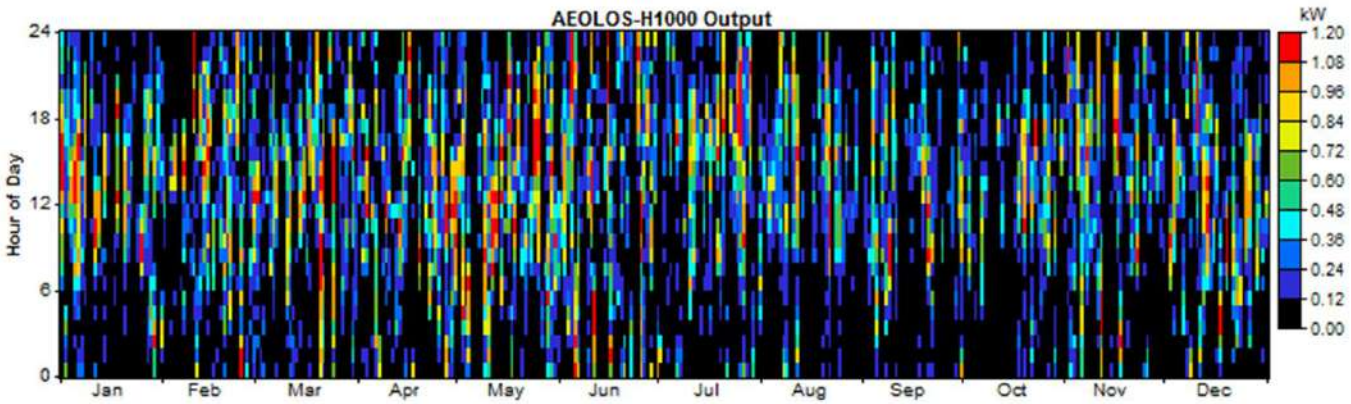
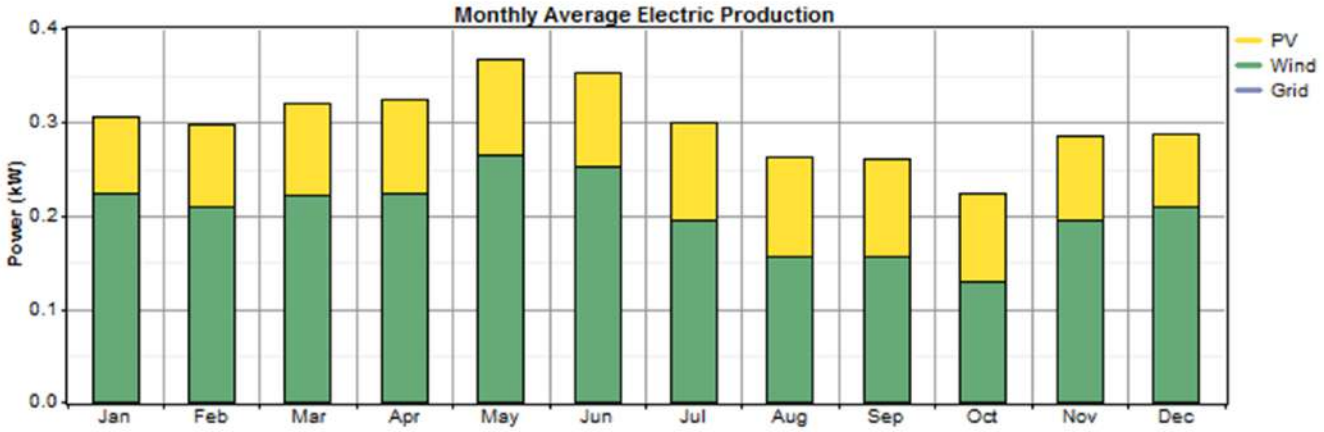


Figura 4. Comportamiento de producción eléctrica del sistema Eólico. Fuente: Simulación en HOMER.

En la gráfica 1, se presentan los resultados de la producción calculada por el programa HOMER para cada uno de los meses del año y para cada uno de los sistemas analizados, tanto fotovoltaico como eólico. Se denota la mayor contribución del sistema eólico debido a que es del doble de capacidad del sistema fotovoltaico, aunado a ello la producción eólica es mayor en la mayoría de los meses, sin embargo considerando los resultados de HOMER se tiene que la producción eólica es 2.1 veces mayor que la fotovoltaica, lo que básicamente establece la misma relación de producción eléctrica respecto a la capacidad instalada de ambos sistemas.



Gráfica 1. Comportamiento mensual de producción eléctrica del sistema Eólico y fotovoltaico.
Fuente: Simulación en HOMER.

Partiendo de este análisis de producción de energía eléctrica del sistema fotovoltaico, se estima un costo de aproximadamente 1,300usd por concepto de equipamiento, para el sistema eólico se estima un costo del equipo de 1,700usd. Partiendo de lo anterior considerando un precio de la energía de 0.10usd por kWh generado en el esquema de intercambio con la red, se obtiene en RETScreen un tiempo de retorno simple de 16 años con una relación beneficio costo de 1.58, en tanto que para el aerogenerador se tiene un retorno simple 8.3 años con un beneficio costo de 2.40.

CONCLUSIONES.

Respecto a los resultados obtenidos y mostrados previamente, la configuración propuesta para la sustentabilidad energética de la vivienda en el Fraccionamiento de Valle de San Pedro, Tijuana, es adecuada y suficiente, ya que el recurso disponible tanto solar como eólico es suficiente para que el calentador de placa plana por termosifón satisfaga los requerimientos de agua caliente en más del 90%, recurriendo el sistema de respaldo esporádicamente, esto reafirma la relevancia de emplear los colectores con los que actualmente ya cuentan las viviendas del fraccionamiento. En cuanto a energía eléctrica la propuesta del sistema hibrido interconectado a la red, implica utilizar un sistema Fotovoltaico de 500Wp y un sistema Eólico de 1000Wp con factor de planta de 20% considerado como aceptable para la tecnología de aerogeneración [10], los cuales con base al recurso disponible abastecen perfectamente el 100% de la energía demandada anualmente por una vivienda típica de Fraccionamiento de San Pedro, ya que se estimó un consumo máximo de hasta 2,689 kWh-año por vivienda, y el sistema FV-Eólico produciría hasta 2,617 kWh-año. En conclusión los resultados obtenidos resultan confiables con base a la validación realizada con ambos programas, y por ende la configuración propuesta permitiría brindar sustentabilidad energética a las viviendas de San Pedro aprovechando las fuentes de energía renovable de viento y radiación solar.

En cuanto a lo económico, el costo de equipamiento comparado con un precio de la energía mayor a la tarifa que se utiliza pero inferior al costo de producción de la energía de la Comisión Federal de Electricidad, los resultados de la simulación permiten concluir escenarios en los cuales el uso de los sistemas propuestos supone un pago del costo de equipamiento por concepto de ahorro de energía, que para fotovoltaico es de 16 años y el eólico en menos de 9 años, ambos son aceptables y recomendables en función de la relación de beneficio costo que es superior 1.5 en fotovoltaico y mayor a dos en eólico, es decir, la sustentabilidad energética del desarrollo de San Pedro es posible.

REFERENCIAS

1. BANOBRAS (2011). Descripción ejecutiva de proyecto: DUIS Valle de San Pedro. SHCP.
2. CYPE (2014). Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción. http://instalaciones.cype.es/
3. RETSCREEN (2016). Clean Energy Management Software system for energy efficiency. Retscreen 4. Natural Resources Canada.
4. HOMER (2016). Modeling software: Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources. HOMER 2.68 BETA. HOMER Energy LLC. http://www.homerenergy.com/
5. SEDESOL (2012). XXI Reunión Nacional de CONOREVI. Chihuahua, Chihuahua, México.
6. Discovery (2016). Consumo de energía eléctrica de aparatos electrodomésticos-Tijuana. Portal Tijuana. http://portal-tijuana.com
7. IIE (2001). Atlas de radiación solar para la República Mexicana. CONUEE, México 2014. http://www.conuee.gob.mx
8. AEOLOS (2016). Aeolos H-1000W Data Sheet and specifications. Aeolos wind energy, Ltd. www.windturbinestar.com
9. KYOCERA (2003). Hoja y manual de especificaciones: Modelo KC-120. Kyocera Solar, inc. Scottsdale, Arizona, EU. http://www.kyocerasolar.com

Villarubia M. (2013). Ingeniería de la Energía Eólica, p. 245. 1ra edición, Alfaomega, Méx

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA DE 27 kW CONECTADA A LA RED

Edson O. Ángel Ruiz, Aarón Sánchez Juárez, José Ortega Cruz
Departamento de Materiales Solares, Instituto de Energías Renovables, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, Código Postal 62580, México, Teléfono (52) 777 362 00 90, Fax (52) 777 325 00 18, **eogm@cie.unam.mx.**

RESUMEN

Durante un periodo de 5 meses (Enero-Mayo) se implementó una metodología para evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Dicho sistema cuenta con una capacidad instalada de 27 kW conectados a la red, dividido en 3 arreglos de 9 kW conectados a 3 inversores trifásicos de 240 V en corriente alterna. Está instalado dentro del Centro Morelense de Innovación Agropecuaria (CEMIAGRO) en la ciudad de Emiliano Zapata, Morelos. Se midieron variables ambientales como radiación, temperatura ambiente y temperatura del módulo; además se reportan la energía generada por cada arreglo fotovoltaico y los valores de voltaje y corriente tanto en régimen de corriente directa como en alterna a la salida del inversor.

Para analizar el rendimiento del sistema fotovoltaico (los tres arreglos en conjunto), se calcularon la productividad de referencia, la productividad del generador fotovoltaico, la productividad final y el rendimiento final del sistema por cada mes evaluado, así como el promedio del periodo. Además, se determinaron valores en porcentaje y la cantidad de energía que cada uno de diversos valores han disminuido el rendimiento del sistema, tales como pérdidas por temperatura, por caídas de voltaje en los conductores, por suciedad, por reducción en la potencia de los módulos, por sombreado, por efectos angulares debido a la posición del sol respecto a los módulos y por eficiencia del inversor. La energía inyectada a la red promedio diario mensual más alta se registró en el mes de Abril, con 129.97 kWh/día, sin embargo el mejor rendimiento promedio mensual se registró en Mayo, siendo de 0.91. Las mayores pérdidas se deben a efectos de temperatura, alcanzando los 24.5 kWh/día en el mes de Mayo.

ABSTRACT

For a period of five months (from January to May), a methodology was implemented to evaluate the performance of a grid-connected PV system. This system has an installed capacity of 27 kW connected to the grid, divided into three 9-kW arrays connected to three 240-V three-phased inverters. The system is installed in the Center of Agricultural Innovation of the State of Morelos (CEMIAGRO, by its acronym in Spanish) in the city of Emiliano Zapata, Morelos. Environmental variables such as radiation, ambient and module temperature were measured; as well as the energy generated by each PV array and the values of voltage and current both direct and alternating regime at the output inverter were reported.

To analyze the performance of the total PV system (three arrays together), the Reference Yield, Array Yield, Final Yield and Performance Ratio for each month and the average for the period were calculated. Furthermore, different values were determined in means of percentage and amount of energy of each value that has decreased its performance in the system; such as losses by temperature, voltage drops across the conductors, caused by dirt, by reduction in power of the modules, by shading, by angular effects due to the position of the sun about the modules and inverter efficiency. The highest daily monthly average energy injected to the grid, was recorded in April, with 129.97 kWh/day, however the best daily monthly average Performance Ratio was recorded in May, with 0.91. The greatest energy losses are due to temperature effects, reaching 24.5 kWh/day in the month of May.

Palabras claves: Sistema fotovoltaico, interconexión a red, rendimiento de referencia, rendimiento del generador, rendimiento final, rendimiento global.

INTRODUCCIÓN

El mercado histórico fotovoltaico han sido las aplicaciones aisladas. Sin embargo, en países industrializados, gracias a la maduración alcanzada en las tecnologías de dispositivos fotovoltaicos y convertidores de potencia, así como la reducción en sus costos de fabricación, la generación fotovoltaica conectada a la red, se ha venido convirtiendo gradualmente en una alternativa viable. En México, a partir de 2006, se ha observado una tendencia en implementar sistemas fotovoltaicos, alcanzando los 131 MW instalados en 2014 y el 94% de dichas instalaciones pertenecen a las del tipo conectadas a red.

La extensión de la implementación de centrales fotovoltaicos requiere del desarrollo de estudios que analicen su funcionamiento mientras operan en tiempo real. Es por ello que, en el presente trabajo, se evalúa el rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a red, tomando en cuenta variables atmosféricas y energéticas como radiación, temperatura ambiente y del módulo, de tal manera que nos permita conocer la eficiencia y fiabilidad del sistema, así como trazar líneas básicas que hay que tomar en cuenta para lograr un buen funcionamiento y poder compararlo con otros sistemas. Además, se determinarán valores en porcentaje y la cantidad de energía que cada uno de diversos factores han disminuido el rendimiento del sistema, tales como, pérdidas por temperatura, por caída de voltaje en el cableado, por suciedad, por reducción en la potencia de los módulos, por sombreado, por efectos angulares debido a la posición del sol con respecto a los módulos, y por rendimiento del inversor.

Descripción del sistema y monitoreo

El sistema fotovoltaico cuenta con una capacidad instalada de 27 kW conectados a la red, dividido en 3 arreglos de 9 kW cada uno. Cada arreglo se compone de 3 cadenas de 12 módulos modelo S60PC conectados en serie. Para la interconexión con la red, por cada arreglo se tiene un inversor de 10 kW de potencia. Los módulos se encuentran instalados con un ángulo de inclinación de 10°, debido a requerimientos particulares del propietario. Fue instalado a través del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) con la colaboración del Instituto de Energías Renovables, dentro de las instalaciones del Centro Morelense de Innovación Agropecuaria (CEMIAGRO) en la ciudad de Emiliano Zapata, Morelos.

Se cuenta con un sistema de monitoreo de variables ambientales como son radiación, temperatura ambiente, temperatura de operación los módulos fotovoltaicos y velocidad del viento; además de un sistema de adquisición de datos para el análisis de la energía generada por cada arreglo fotovoltaico y de valores de voltaje y corriente tanto en régimen de corriente directa como alterna a la salida del inversor.

Para monitorear el sistema, se emplearon sensores de la marca Fronius y un sistema de adquisición de datos incluidos en los inversores para almacenar los datos cada 5 minutos. En total se utilizaron una celda de referencia de silicio montada en el mismo plano de los arreglos fotovoltaicos para los datos de radiación con una precisión en la medición de +/- 5%, un sensor de temperatura ambiente con una precisión de +/- 0.8°C, un termopar fijado al reverso de uno de los módulos fotovoltaicos de precisión +/- 0.8°C y un anemómetro de copa con una precisión de +/- 5% del valor de la medición de la velocidad del viento. El monitoreo en tiempo real se puede llevar a cabo en el portal de Fronius Solar Web y los datos de las mediciones para su análisis se pueden descargar mediante la aplicación de Fronius Solar Access.

RENDIMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

La evaluación del rendimiento se realizó tomando en cuenta la suma de los tres arreglos, es decir el sistema fotovoltaico completo. Debido a que los datos se guardaron cada 5 minutos, para su análisis se realizaron promedios diarios para cada mes. La información obtenida fue irradiancia, temperatura ambiente, temperatura del módulo, irradiación, voltaje en AC, energía generada en DC, potencia y energía inyectadas a la red en AC.

En la Fig. 1 se presentan la energía inyectada a la red promedio diario mensual de los 5 meses medidos en donde se puede observar que el mes que más energía inyectó a la red como promedio diario fue Abril, con 129.971 kWh/día mientras que el de menor inyección fue Enero, con 78.849 kWh/día. Enero se caracterizó por presentar desconexiones de la red por parte de los inversores, situación que se refleja en los valores de generación e inyección a la red.

La energía inyectada a la red mensual más alta la registró Mayo con 3,930.814 kWh/mes, a pesar de tener un menor promedio diario que Abril, pero cuenta con un día más y la energía inyectada mensual más baja la tiene Enero, con 2,444.319 kWh/mes (ver Fig. 2); en total fueron inyectados en la red 16,683.308 kWh durante los 5 meses de evaluación. En la Fig. 3 y Fig. 4 vemos la irradiación promedio diaria mensual y los valores máximos, mínimos y promedios de la temperatura del módulo, mediciones importantes para evaluar el desempeño de nuestra instalación, que analizaremos más adelante.

Para calcular el rendimiento global del sistema se tomaron en cuenta la energía máxima que el sistema podía generar multiplicando la potencia instalada bajo condiciones de operación que se ve afectada por la temperatura, por la irradiación; tal producto es comparado con la energía realmente generada y de esta manera obtenemos el Performance Ratio del sistema (PR). El PR del sistema durante el periodo de medición se calculó en 0.85. En la Fig. 5 se presentan los rendimientos globales del sistema para cada mes, donde podemos observar que Mayo tiene el PR más alto, 0.917, que a pesar de tener menor irradiación promedio diaria mensual que Abril, inyectó mayor energía a la red.

La Productividad de Referencia, del Generador y la Final durante el periodo de evaluación son 5.48, 4.21 y 4.07 respectivamente. En la Fig. 6 se encuentran graficados las productividades mensuales. Otra manera de representar estas cantidades, son en unidades energéticas, por lo tanto, la energía máxima que puede generar el sistema, la energía generada por el sistema y la energía inyectada a la red durante el periodo de medición son 19,526.37 kWh, 17,270.49 kWh y 16,683.31 kWh respectivamente, cuyos valores promedios diarios están representados en la Fig. 7 y los valores mensuales en la Fig. 8.

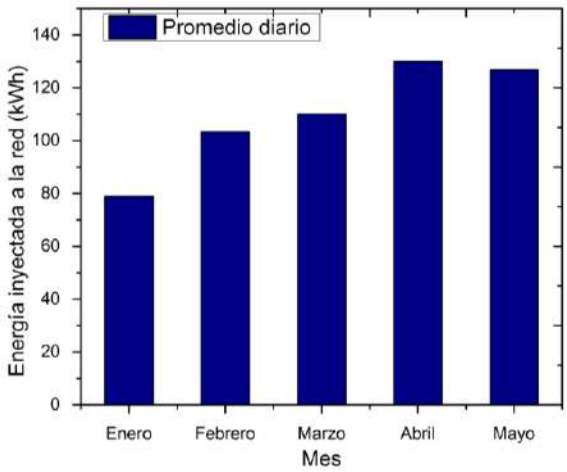


Fig. 1. Energía inyectada a la red promedio diario mensual

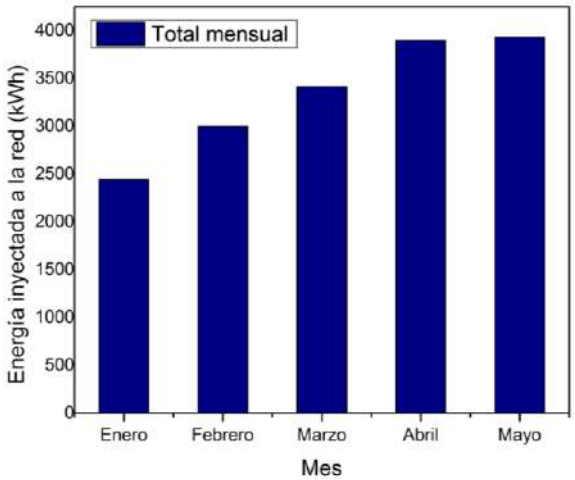


Fig. 2 Energía inyectada a la red total mensual

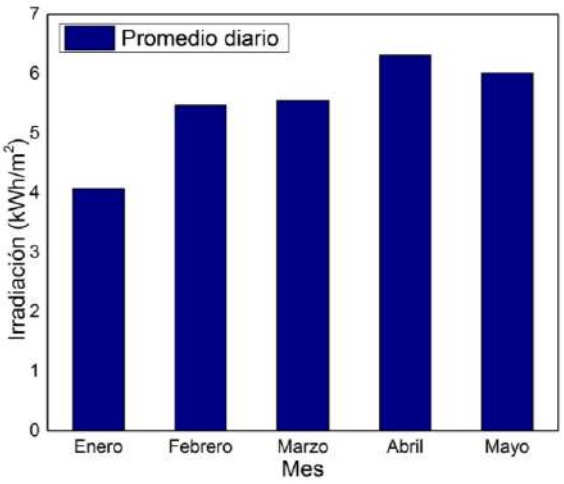


Fig. 3. Irradiación promedio diaria mensual

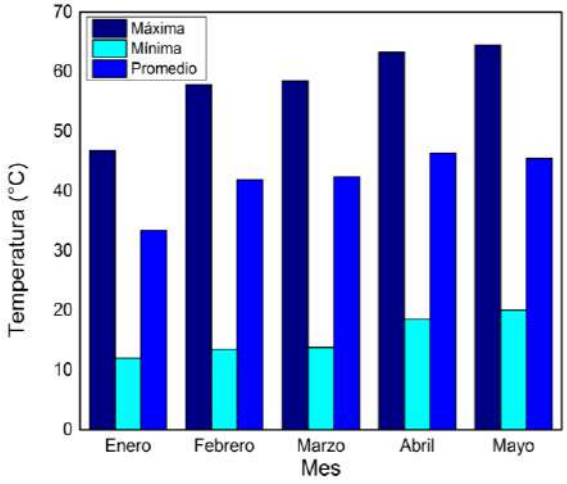


Fig. 4. Temperaturas máx., mín. y prom. diarias mensuales

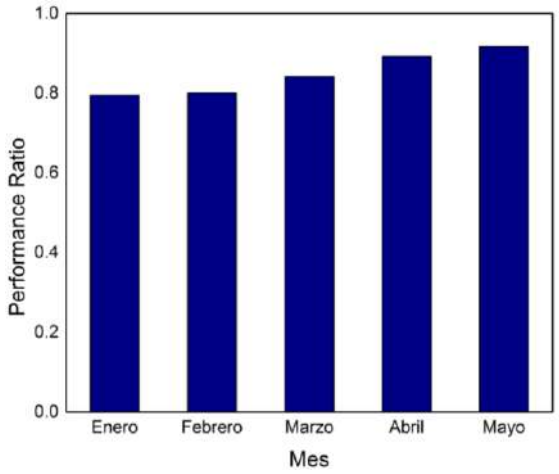


Fig. 5. Performance Ratio mensual

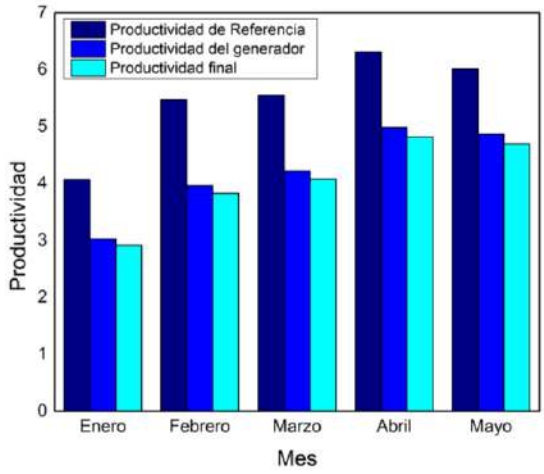


Fig. 6. Productividades mensuales

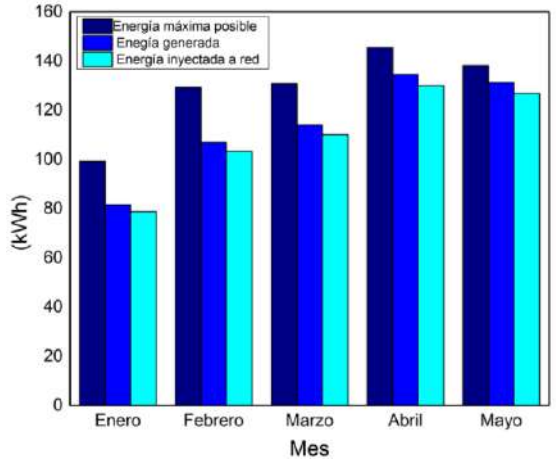


Fig. 7. Energía máx., generada e inyectada promedio diaria mensual

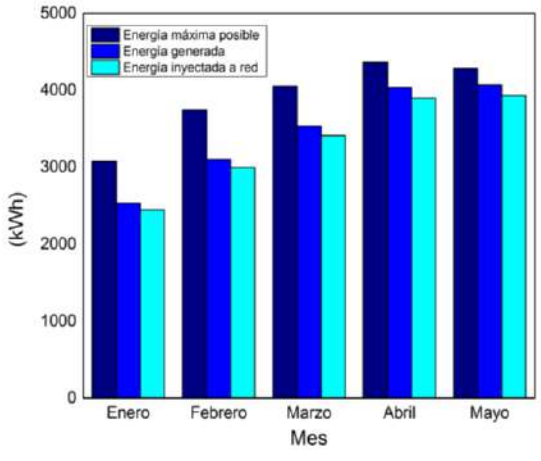


Fig. 8. Energía máx., generada e inyectada mensual

PÉRDIDAS ENERGÉTICAS

A partir del PR calculado de 0.85 para el sistema evaluado durante 5 meses, de Enero a Mayo, podemos ver que de la cantidad máxima de energía que el sistema fotovoltaico puede convertir en energía eléctrica e inyectarla a la red, el 15% forma parte de las pérdidas energéticas. Diversos parámetros influyen en mayor o menor medida en la cantidad total de pérdidas en dependencia de las características particulares del sitio, como pueden ser temperatura, humedad, cantidad de sombras y en el caso de este sistema, que se encuentra en una zona polvosa, la cantidad de suciedad en los módulos influyen significativamente en el rendimiento global del sistema. En la Tabla I, podemos ver la cantidad en porcentaje y en energía que dichos parámetros han afectado la correcta operación del sistema durante el periodo de medición, en donde la temperatura de los módulos es el factor que provoca la mayor cantidad de energía no generada por el sistema, alcanzando el valor de 1,718.32 kWh., ya que como vimos en la Fig. 4, la temperatura de los módulos alcanza los 64.5 °C en el mes de Mayo. Sin embargo, el Performance Ratio del sistema se calculó a partir de la energía máxima posible técnicamente hablando, en donde ya se toman como referencia los efectos negativos de la temperatura. De tal manera, el polvo y la suciedad es el factor que más afecta el rendimiento del sistema, siendo más grande el impacto en los meses de Enero a Marzo, disminuyendo en Abril y Mayo cuando las lluvias ayudan limpiando los módulos.

Tabla I. Influencia de diversos parámetros en las pérdidas totales del sistema fotovoltaico.

Parámetro	Porcentaje (%)	Energía (kWh)
Temperatura de los módulos	8.8	1,718.32
Polvo y suciedad	4.3	839.63
Inversor	4	781.05
Seguidor del PMP	1.8	351.47
Conexionado	1.7	331.95
No cumplimiento de potencia	1.7	331.95
Angulares y espectrales	1.36	265.56
Caída de tensión en conductores	1.1	214.79
Sombras	0.5	97.63
Mantenimiento y baja irradiancia	0.05	9.76
TOTAL	25.31	4,942.12

CONCLUSIONES

Después de evaluar el sistema durante 5 meses se calculó el rendimiento global o Performance Ratio del sistema en 0.85, por lo que se encuentra operando sobre el promedio de acuerdo a resultaos de otros trabajos realizados en distintas partes del mundo. El mes con mayor energía inyectada a la red fue Mayo con 3930.814 kWh y el mes de mayores pérdidas fue Enero con un PR de 0.79. Los factores que más influyen en las pérdidas energéticas del sistema son la temperatura de los módulos, debido a las altas temperaturas ambiente y a que se registran cantidades altas de irradiancia que provocan el calentamiento de los módulos, y el polvo y suciedad, situación que se provoca debido a que el sistema se encuentra en una posición no tan inclinada lo que favorece el asentamiento del polvo. Como medidas correctivas y de optimización, se pueden implementar programas de limpieza de los módulos, logrando así aumentar un promedio mensual de 167.93 kWh inyectados a la red. Además de corregir la suciedad en los módulos, se pueden disminuir a cero las pérdidas por sombreado de los módulos, ya que estas se deben a sombras ocasionadas por árboles que pueden ser podados parcialmente, que, aunque en porcentaje no es una cantidad muy alta, los kWh perdidos al mes se encuentran alrededor de 20 kWh, siendo éste valor más alto en los meses donde el Sol se encuentra a menor altura. Sería conveniente realizar un estudio sobre las ganancias al optimizar el ángulo de inclinación y reducir pérdidas angulares y posiblemente por polvo y suciedad.

REFERENCIAS

González G., R., Jiménez G., H., & Lagunas M., J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Boletín IIE, 140-144.
Orioli, A., & Di Gangi, A. (2013). Load mismatch of grid-connected photovoltaic systems: Review of the. Elsevier, 13-28.
Abella, M. A. (2005). SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Madrid, España.
Buday, M. S. (2011). Measuring irradiance, temperature and angle of incidence effects on photovoltaic modules in Auburn Hills, Michigan. Michigan.
Cano, J. (2011). Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling. Arizona, EU.
Cherfa, F., Hadj Araba, A., Oussaidb, R., Abdeladima, K., & Bouchakoura, S. (2015). Performance Analysis of the Mini-Grid Connected. Elsevier, 226-236.
Eltawil, M. A., & Zhengming, Z. (2010). Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential. Elsevier, 112-129.

Khatib, T., Kamaruzzaman Sopian, & Hussein A. Kazem. (2013). Actual performance and characteristic of a grid connected photovoltaic power system in the tropics: A short term evaluation. Elsevier, 115-119.
Li, D. H., K.L. Cheung, Tony N.T. Lam, & Wilco W.H. Chan b. (2012). A study of grid-connected photovoltaic (PV) system in Hong Kong. Elsevier, 122-127.
Mirhassani, S., Hwai Chyuan Ong, W. T. Chong, & K.Y. Leong. (2015). Advances and challenges in grid tied photovoltaic systems. Elsevier, 121-131.
Óscar Perpiñán, A. C. (2012). Diseño de sistemas fotovoltaicos. España: creative commons.
Pradhan, A. K., Mohanty, M., & Kar, S. (2014). The Techno-Economic and Environmental Assessments of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Bhubaneswar, India. World Academy of Science, Engineering and Technology, 269-275.
Salgado, J. M. (2007). Guía completa de le energía solar fotovoltaica. Madrid, España: AMV.
Sidrach-de-Cardonaa, M., & Mora Lo´pezb, L. (1999). Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system. Pergamon, 93-102.
Villoz, A. L. (2008). Manual práctico de la energía solar fotovoltaico. Madrid, España: AMV.
Al, J. A. (2014). One-year 60 kWp photovoltaic system energy performance at. Elsevier, 2017-2025.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO EN UN PANEL FOTOVOLTAICO Y ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Kevin A. Jiménez-Gómez, Marcos Á. González-Olvera*, José A. Del Oso Acevedo y Rogelio Mendoza-Pérez
Universidad Autónoma de la Ciudad de México; Av. Prolongación San Isidro Núm. 151; Col. San Lorenzo Tezonco; C. P. 09790; México, D. F. Tel. 58501901, Ext. 13165. Fax. 58502100
*Correo electrónico: marcosangel@gmail.com y marcos.angel.gonzalez@uacm.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de control electrónico para seguimiento solar aplicado a un panel fotovoltaico (MFV) con un área de 0.1225 m^2. Este seguidor solar fue desarrollado en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México en las instalaciones del Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES).

El sistema de seguimiento solar está conformado básicamente por: una estructura metálica en la cual se pueden montar dos paneles fotovoltaicos, uno se encuentra fijo y el otro en movimiento; un sistema de engranes con la finalidad de proporcionar el torque necesario para mover el panel fotovoltaico acoplado a un motor a pasos bipolar (stepper motor) de bajo consumo de energía; un sistema de adquisición de variables físicas tales como temperatura, voltaje y corriente, compuesto por sensores y componentes de bajo costo; a esto se acopla una tarjeta electrónica basada en micro-controladores mediante una comunicación RS-485 y circuitos integrados que realizan la función de controlar y llevar a cabo el posicionamiento del panel fotovoltaico en la trayectoria solar.

Como el panel fotovoltaico móvil está orientado en todo momento hacia el sol, aumenta su rendimiento y eficiencia energética. El seguidor solar optimiza el aprovechamiento de la energía al obtener alrededor de 20% más de potencia eléctrica del panel móvil respecto al panel fijo.

Palabras clave: motor a pasos, seguidor solar, panel fotovoltaico, micro-controlador

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of an electronic control system for solar tracking applied to a photovoltaic module with an area of 0.1225 m^2. This solar tracking was developed at the Autonomous University of Mexico City in the installations of the Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES).

The solar tracker system it was basic conformed by: a metallic structure in which can be mounted two photovoltaic panels, one is fixed and the other moving; a system of gears in order to provide the necessary torque for to move the photovoltaic panel coupled to a bipolar motor steps bipolar low power consumption; an acquisition system of physical variable such as temperature, voltage and current, compound by sensors and low cost components; this electronic card based on microcontrollers coupled via a communication RS-485 and integrated circuits which function to control and carry out the positioning of the photovoltaic panel in the solar path.

As the photovoltaic mobile panel is oriented at all times towards the sun, it increases performance and energy efficiency. The solar tracker installed optimizes the use of the energy to obtain close to 20% more of electrical power of mobile panel respects to fixed panel.

Keywords: motor steps, solar tracker, photovoltaic module, microcontrollers.

INTRODUCCIÓN

La tecnología solar fotovoltaica constituye una importante alternativa que aprovecha la energía del sol y la convierte en eléctrica, la cual se puede aprovechar dándole diferentes usos en la vida cotidiana. Ésta tecnología se encuentra en desarrollo, encaminada principalmente en mejorar la eficiencia de los sistemas y perfeccionar los materiales que se utilizan en su fabricación.

El seguidor solar es un dispositivo tecnológico cuya función es aumentar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y otros dispositivos de concentración solar por medio de sistemas mecánicos, hidráulicos eléctricos y electrónicos que siguen la trayectoria del sol. El diseño del seguidor solar consiste en un circuito analógico-digital capaz de detectar la energía luminosa incidente entre dos fotorresistores ubicados en la misma posición que el panel solar, de tal manera que, cuando éstas reciban la máxima energía luminosa, el circuito pueda activar un motor a pasos bipolar (stepper-motor), haciendo que éste actúe generando el torque necesario aplicado al eje de transmisión de una caja de engranes acondicionada en la estructura del panel solar para orientarlo y mantenerlo en la trayectoria de este mismo. La figura 1, muestra un esquema básico del funcionamiento del sistema de seguimiento solar.

Figura 1. Esquema básico de funcionamiento del sistema seguidor solar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La parte fundamental de uno de los proyectos que ha financiado parcialmente este trabajo, se refiere a la obtención de paneles fotovoltaicos desarrollados completamente en nuestro país[1]. La primera parte de éste trabajo consistió en asegurar que los paneles fotovoltaicos (PFV) tuvieran las mismas especificaciones eléctricas que según su ficha técnica se encuentran dentro de las condiciones denominadas STC (Condiciones Estándar de Prueba - Standar Test Condition), ver tabla I.

Tabla I. Características eléctricas de los PFV utilizados.

	PFV-Fijo DBF10	**PFV-Móvil DBF10**
Maximum power	10 W	10 W
Optimum operating voltage	17.5 V	17.5 V
Optimum operating current	0.58 A	0.58 A
Short circuit current	0.64 A	0.64 A
Open circuit voltage	21.5 V	21.5 V
Maximum SystemVoltage	1000 V	1000 V

Después se realizaron las consideraciones respecto a la parte mecánica del sistema de seguimiento. Es claro que dependiendo del número de PFV que conformen al sistema de generación de energía, será la cantidad de corriente o voltaje a obtener, esto dependerá de las necesidades y especificaciones particulares del diseño. El montaje cuenta con dos PFV (PFV-Fijo y PFV-Móvil) y están compuestos por 36 celdas, cada una con las mismas características eléctricas, en un arreglo de celdas en conexión serie-paralelo.

El seguidor solar (PFV-Móvil) diseñado está basado en el posicionamiento azimutal girando sobre un eje horizontal moviéndose únicamente de Este a Oeste, por lo que sólo tienen un grado de libertad, es decir se mueve en un solo eje de rotación. La superficie de los paneles tanto el móvil como el fijo tiene una inclinación igual a la latitud del lugar donde se llevó a cabo el experimento para obtener un mejor rendimiento a lo largo del año (19° 25′ 10″ N, 99° 8′ 44″ W). Su diseño es el más simple por lo que su uso se ha extendido entre los fabricantes[2].

Se necesita mover nuestro PFV que tiene una masa de 2.650 kg y a = 0.35 m. El panel girará alrededor de un eje fijo BB' como se muestra en la figura 2. Aunado a esto, se necesita determinar el momento de inercia correspondiente a una placa equivalente al PFV que en este caso será un cuerpo rígido. El momento de inercia *I* de un cuerpo alrededor de un eje dado es una medida de su inercia rotacional: cuanto mayor sea el valor de *I*, más difícil será cambiar el estado de rotación del cuerpo. Supongamos una placa solida rectangular que gira sobre un eje fijo y que tenemos diferentes ejes AA', BB' y CC', en este caso tomaremos como referencia el eje de giro BB'[3].

[1] FOMIX CONACyT-GDF 189282 2012-2
[2] IEC, 2007, Iowa Energy Center, solar energy. http://www.energy.iastate.edu

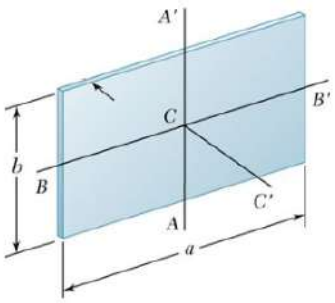


Figura 2. Ejes de giro para una placa solida (PFV-Móvil).

Tomando en cuenta las dimensiones del PFV-Móvil para determinar tanto el momento de inercia como el torque y sabiendo que el momento de inercia para una placa con el eje de giro fijo está dado por la ecuación (1), se realizaron los cálculos necesarios obteniendo los siguientes resultados:

$$I = (1/12)\, M\, a^2\ [Kg\ m^2] \qquad (1)$$
$$I = 0.027052\ [Kg\ m^2]$$

Una vez teniendo estos datos, se necesita determinar la aceleración angular α pero no sin antes conocer el valor de la velocidad angular ω. Sabemos que para determinar estos parámetros se necesita obtener el ángulo Θ como coordenada de rotación. Se sabe que, el sol en su trayectoria realiza en su movimiento 15 grados cada hora aproximadamente en el plano que la contiene[4]. Por lo tanto nuestra velocidad angular será:

$$\omega_{PFV} = (\Theta_{fin} - \Theta_{in})/(t_{fin} - t_{in}) \qquad (2)$$

Por tanto $\omega_{PFV} = 72.171 \times 10^{-6}$ [rad/seg]

Asegurando un torque de $\tau = 5.463 \times 10^{-10}$ [Nm]

Que será el torque necesario para mover el PFV-Móvil.

Monitoreo de luz solar, monitoreo de variables eléctricas y prototipo de seguidor solar

El diseño consiste, en un circuito electrónico acondicionado de tal manera que sea capaz de tomar decisiones básicas a partir de algunas variables de entrada. En este caso será la tensión generada por las fotorresistencias en ausencia o presencia de luz solar. El circuito consta de un par de comparadores de tensión, el cual valorará las variables y enviará una tensión de salida acorde a la luz incidente; de tal manera, que sólo puedan proporcionar un valor de voltaje determinado estando colocadas ambas frente al Sol. En la figura 3, se muestra la tarjeta electrónica y la figura 4 muestra la distribución de los sensores foto-resistivos.

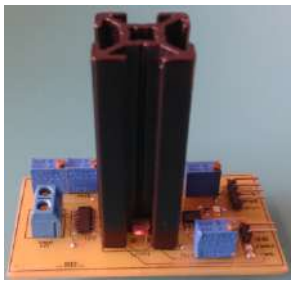


Figura 3. Tarjeta electrónica para seguimiento solar.

[3] Marcelo Alonso, Edward J. Finn. Física volumen I: Mecánica. p. 300-303. Fondo Educativo Interamericano.
[4] Cenidet Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Coordinación de Mecatrónica. P. 42-43.

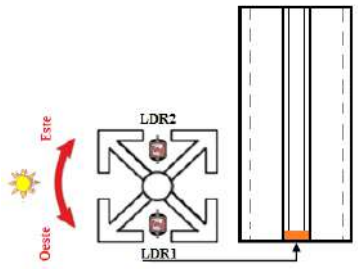


Figura 4. Distribución de sensores foto-resistivos LDR1 y 2.

Nuestro sistema de monitoreo envía los datos a una PC para su almacenamiento y manipulación, la interfaz entre la adquisición de datos y la computadora se realizó con una tarjeta de adquisición de datos, NI USB-6009 de National Instruments, capaz de leer ocho entradas analógicas, se utilizó una de ellas por variable física, temperatura, voltaje de los PFV y corriente generada por estos mismos. Para el sistema de medición de voltaje, las entradas analógicas leen la tensión en un rango de -10 a 10. La figura 5, muestra los dispositivos utilizados para el sistema de medición de voltaje para el caso del PFV móvil y el PFV fijo siendo la misma configuración de elementos para ambos. Para realizar la medición de corriente en los distintos estados de carga se considera el uso de sensores de efecto hall el cual permite realizar mediciones precisas de corriente. En el mercado existen algunos sensores que permiten medir corriente tanto continua como alterna, los rangos de medición dependen de las necesidades de la aplicación, en el presente proyecto se han utilizado dos sensores, el ACS712 y el ACS711EX de Allegro Microsystems[5]. El esquema de conexión se muestra en la figura 6.

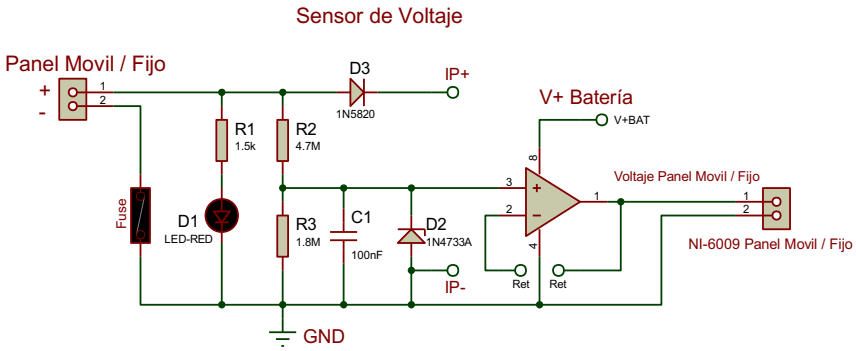


Figura 5. Circuito para realizar la medición de voltaje en los PFV.

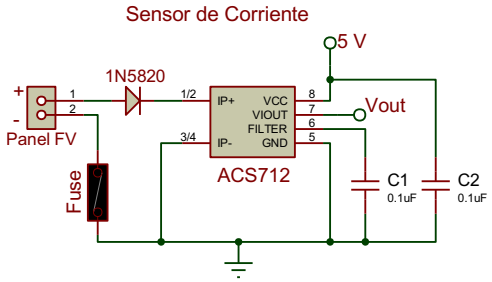


Figura 6. Circuito para la medición de corriente

[5]Allegro Microsystems, Inc. 115 Northeast Cutoff, Box 15036.Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000.www.allegromicro.com

La interfaz de usuario asistida por ordenador, diseñada en la plataforma de Labview versión 2012, misma que hace más cómodo al usuario visualizar los parámetros provenientes de los sensores y el monitoreo de las variables a medir (corriente, voltaje y temperatura) se realizó mediante una IHM (Human-Machine Interface), ver figura 7.

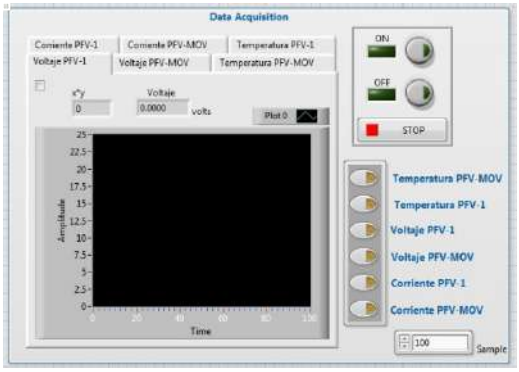


Figura 7. IHM para el sistema de adquisición de datos.

El diseño del PFV-Móvil contempló tanto el torque necesario para mover el PFV como el peso neto del PFV en conjunto con los soportes, baleros, ejes de rotación (que es sólo uno) etc. Se requirió adaptar una transmisión de engranes, ver figura 8. Capaz de generar el torque suficiente para mover una carga plenamente en reposo hasta mantener constante el movimiento sin que dicha estructura presentará cambios debido a la rotación del móvil en cuestión.

Con este sistema de reducción no solamente disminuimos la velocidad de giro del PFV-Móvil a un giro más lento que es útil para la mayoría de las aplicaciones sino que al mismo tiempo estaremos aumentado el "par" o "torque" en la última rueda del motor P-P que generalmente se conoce como la rueda de salida a la que va ensamblada la "flecha de salida" del reductor o motor a pasos. En muchas aplicaciones se le llama moto reductor, pero en esta aplicación se utiliza un motor a pasos.

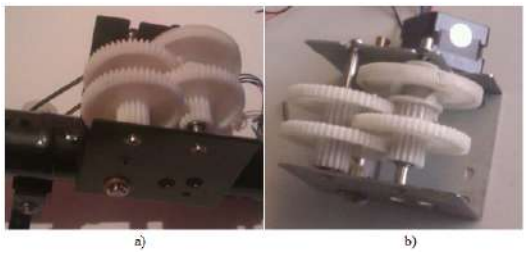


Figura 8. Transmisión de engranes para el movimiento del PFV-Móvil

Al sistema de movimiento se le acopló un tornillo sin fin, dado que se necesita que el PFV rote en ambas direcciones, ver figura 9. Anclado a la flecha de reducción de la caja de transmisión se le ajustó, un engrane que tiene como finalidad hacer girar al PFV-Móvil, y mediante una banda dota de movimiento al tornillo sin fin dando como resultado el movimiento azimutal del panel seguidor. Una vez montado las piezas vistas en las figuras antes mencionadas y haciendo las pruebas correspondientes (figura 9c), el PFV se mueve a una razón de 15° por hora.

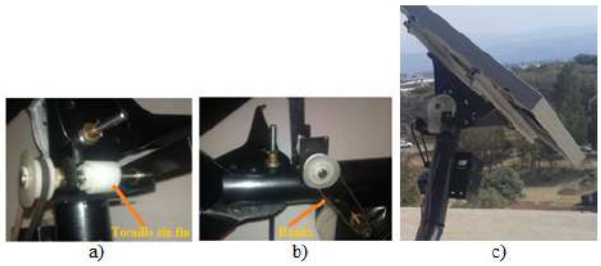


Figura 9. a) Tornillo sin fin, b) Detalle de la banda y c) Acoplamiento de engrane para movimiento azimutal.

Como se mencionó, el sistema de seguimiento solar está basado en el protocolo de comunicación RS-485. El protocolo RS 485, es un formato de comunicación serial que usa como estrategia de transmisión, la diferencia de potencial entre dos terminales denominadas A, y B. Cuando la diferencia de potencial es positiva el protocolo representa un 1 lógico y cuando la diferencia es negativa representa un 0 lógico. La comunicación RS 485, implementa un par trenzado de cobre para la transmisión de datos, como características notables de este protocolo se tiene que puede establecer la comunicación en una topología en forma de bus, con un alcance máximo de 1000 metros sin la necesidad de implementar dispositivos de repetición. De igual forma es posible conectar al bus de datos un máximo de 32 nodos, con una conectividad Half Duplex, esto quiere decir que la comunicación es bidireccional pero no al mismo tiempo. El protocolo RS 485 permite establecer comunicaciones con una velocidad de hasta 2,5M bits por segundo. Para la implementación de este tipo de comunicación se usan convertidores integrados que permiten hacer un enlace de niveles TTL a RS 485, el circuito integrado más popular para estás aplicaciones es el transceiver MAX485[6].

Para tal aplicación se requirió del uso de microcontroladores PIC 16F887 del fabricante Microchip, dado que estos permiten RS-485 es una comunicación multipunto que permite que múltiples dispositivos a ser conectados a un solo bus. La plataforma mikroC PRO para PIC proporciona un conjunto de rutinas de biblioteca para el trabajo cómodo con el sistema RS485 utilizando la arquitectura maestro / esclavo. Maestro y esclavo son dispositivos de intercambio de paquetes de información. Cada esclavo tiene una única dirección y sólo recibe los paquetes dirigidos a él. El esclavo no puede iniciar la comunicación si no es mediante el ordenamiento del maestro. El PIC maestro recibe de los niveles de voltaje de los fotorresistores, los procesa y manda las ordenes a ejecutar por el microcontrolador esclavo que es quien controla la tarjeta de potencia, misma que comanda y dirige a nuestro motor a pasos, ver figura 10.

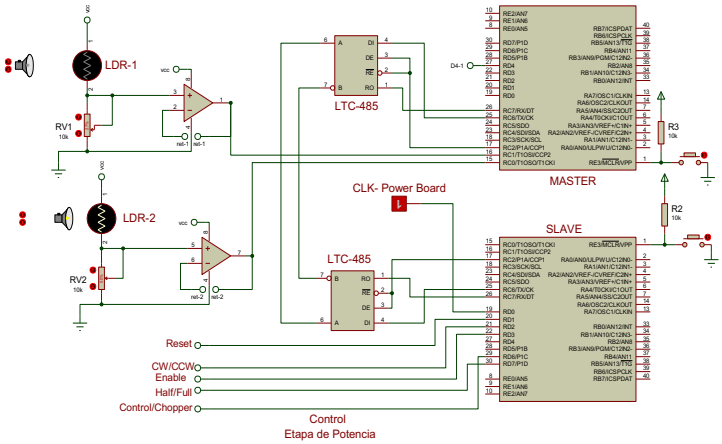


Figura 10. Simulación del protocolo de comunicación RS-485 basado en microcontroladores PIC16f887.

PUEBAS DEL SISTEMA Y RESULTADOS.

Las pruebas de funcionamiento de los subsistemas de monitoreo se presentan en orden de desarrollo de cada uno de ellos. Las pruebas se efectuaron para evaluar su rendimiento de acuerdo a su tarea específica. Se obtuvieron los datos necesarios, mismos que fueron procesados para obtener curvas características de las variables físicas de los PFV tanto móvil como fijo a lo largo del día manteniendo la trayectoria del sol. Las condiciones climatológicas correspondientes al día 20 de mayo del 2016, no fueron tan favorables hasta el medio día, propiciando alguna interrupción en alguna de las mediciones. La figura 11, muestra la curva de I vs. V tanto del PFV-fijo, como del PFV-móvil alrededor de las 17 hm del día mencionado, hora en la cual el PFV-móvil recibe 880W/m^2 (orientado de forma perpendicular a los rayos del sol) y el PFV-fijo recibe solo 365 W/m^2.

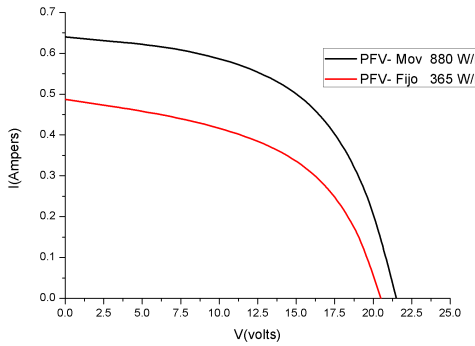


Figura 11. Gráficas de I vs. V para los PFV-móvil y fijo.

[6] Juan Ricardo Clavijo Mendoza. Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C.p.172-174.

Las figuras 12,13 y 14, muestran los resultados obtenidos de corriente, voltaje y potencia en función del tiempo, desde las 10 hasta las 18:30 hrs, correspondientes al día 20 de mayo del 2016 en la trayectoria solar.

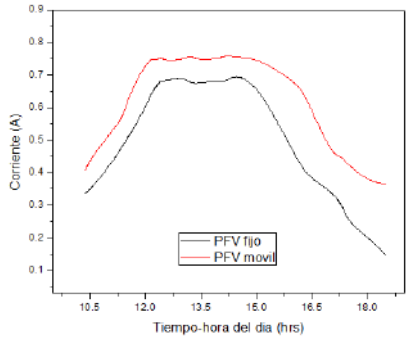


Figura 12. Gráfica de corriente en función del tiempo del PFV-Móvil y PFV-Fijo.

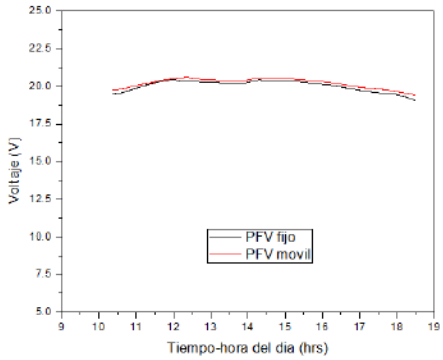


Figura 13. Gráfica de voltaje en función del tiempo del PFV-Móvil y PFV-Fijo.

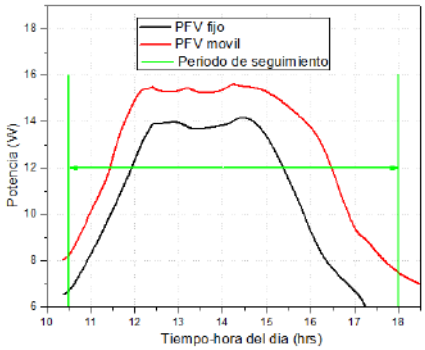


Figura 14. Gráfica de potencia en función del tiempo del PFV-Móvil y PFV-Fijo.

CONCLUSIONES

Se observan la correlación de los parámetros eléctricos obteniéndose un incremento de los valores de la corriente y por tanto de la corriente eléctrica del PFV-móvil respecto al PFV-fijo, mientras que el voltaje se mantiene prácticamente constante entre un módulo y otro. El incremento de potencia eléctrica generada por el PFV-móvil respecto al PFV-fijo es aproximadamente de un 20%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de los proyectos: fomix conacyt-gdf 189282 2012-2 “manufactura de módulos fotovoltaicos de CdS/CdTe en áreas de 100 cm^2 y con eficiencias de 8% por la técnica de sublimación y procesos preindustriales asociados”,“electropolimerizaión anódica, de compuestos derivados del 3,4 dialcoxitiofeno, aplicada para la elaboración de celdas orgánicas fotovoltaicas (opvs)”.pi2014-34 y Proyecto UACM PI2014-65.

REFERENCIAS

Robert F. Coughlin (1999). Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, p.256, 73-77.5ª. Ed. México.
Marcelo Alonso, Edward J. Finn. Física volumen I: Mecánica. p. 300-303. Fondo Educativo Interamericano.
Juan Ricardo Clavijo Mendoza. Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C.p.172-174.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

Estado del arte de tecnologías híbridas de almacenamiento de energía: hidroeléctricas de bombeo y aire comprimido

F. Castellanos-Balderas, N. Velázquez, A. Aguilar-Jiménez, R. López-Zavala, J. Alvarez-Mancilla, S. Islas, L. González
Centro de Estudio de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Mexicali, Baja California, 21280, México,
(686) 566 41 50 Ext 111, **francisco.castellanos.balderas@uabc.edu.mx.**

RESUMEN

El sistema de almacenamiento de energía es el punto débil de las micro redes aisladas y un área de oportunidad para las redes inteligentes. Con esto se puede lograr la gestionabilidad de la red, reducir la variabilidad e intermitencia del suministro eléctrico, además de aumentar su disponibilidad. Actualmente la batería de plomo ácido es la tecnología de almacenamiento de energía más utilizada. Esta tecnología tiene inconvenientes como una corta vida útil y alto impacto ambiental al ser desechadas. Existe una tendencia en la combinación de las tecnologías hidroeléctricas por bombeo y aire comprimido las cuales son amigables con el medio ambiente. Este artículo explora las diferentes tecnologías híbridas que utilizan agua y aire para almacenar energía en forma de presión. Se plantea si existen áreas de innovación en la que la comunidad científica pueda intervenir para mejorar el proceso de almacenamiento de energía de este tipo de tecnologías. Para responder a esta cuestión se realizó una recopilación de información de publicaciones científicas existentes y patentes tecnológicas sobre el tema. Las ventajas, desventajas, así como una breve descripción tecnológica se muestran en este estudio. El trabajo permite al lector conocer las tecnologías existentes de almacenamiento de energía con agua y aire en forma de presión como punto de partida para profundizar en el tema o bien constituir un antecedente tecnológico.

ABSTRACT

The energy storage system is the weakness of isolated micro grid systems and an area of opportunity for smart grids. With this we can achieve grid manageability, reduce variability and intermittency of electricity supply, as well as increasing its availability. Currently the lead acid battery technology is most commonly used energy storage. This technology has drawbacks such as a short life time and high environmental impact when this are discard. There is a trend in the combination of technologies hydroelectric pumped and compressed air which are friendly to the environment. This article explores the different hybrid technologies that use water and air to store energy in the form of pressure. It pose whether there are areas of innovation in which the scientific community can intervene to improve the process of energy storage for this type of technologies. To answer this question a compilation of existing information technology patents and scientific publications on the subject was done. The advantages, disadvantages, and a brief technological description shown in this study. The work allows the reader to understand the existing energy storage technologies with water and air as pressure as a starting point to delve into the subject or constitute a technological background.

Palabras claves: hidroeléctricas de bombeo, aire comprimido, almacenamiento de energía, pistón líquido.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía permite la interacción entre una fuente variable de energía y cargas variables, sin almacenamiento, la generación tendría que ser equivalente al consumo. El almacenamiento funciona moviendo la energía a través tiempo, permite una mayor penetración de las energías renovables a la red eléctrica debido a la naturaleza intermitente de estas últimas. Para las redes inteligentes el almacenamiento permite un uso eficiente de la energía, mientras que para los sistemas aislados de la red eléctrica, como las micro redes, el almacenamiento es primordial debido a que el consumo no coincide en el tiempo con la generación de las tecnologías de energías renovables. Las baterías de plomo ácido son utilizadas comúnmente como sistemas de almacenamiento de energía. Su corta vida útil impacta en el costo de operación de esta tecnología. Además se sabe que varios de sus componentes usados en su fabricación son tóxicos y por tanto la contaminación ambiental, los riesgos de afectar la salud y los ecosistemas dependen de la forma, lugar y volumen en que se ha dispuesto o tratado este tipo de residuos. La aplicación de esta tecnología ira en aumento, por la disminución de costos y fácil adquisición, con ello el aumento de los efectos negativos. Las plantas hidroeléctricas de bombeo (PHES por sus siglas en inglés) son una tecnología madura y comercial que ha sido utilizada desde 1890. Su flexibilidad y capacidad otorgan estabilidad a la red eléctrica. Estos sistemas son los más adecuados para aplicaciones de pequeñas redes aisladas con una gran cantidad de energía, donde la eficiencia del ciclo de carga y descarga varía en la práctica de 70% a 80% (Pickard, 2012; Rehman, Al-Hadhrami, & Alam, 2015). Debido a su relativamente baja densidad energética comparada con los demás sistemas de almacenamiento de energía, PHES requiere grandes cantidades de cuerpos de agua, o grandes diferencias de altura, estas condiciones geográficas no se encuentran en cualquier localidad y el uso de PHES se encuentra limitado, además de tener un alto impacto ambiental. La tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES por sus siglas en inglés) es muy prometedora debido a que utiliza un recurso abundante y económico, el aire que nos rodea. Es una tecnología madura que utiliza compresores industriales que duran al menos 20 años y tiene el costo más bajo de entre las tecnologías de almacenamiento a larga duración, siempre y cuando se presenten las condiciones geológicas para su instalación ("Energy

Storage Wars", 2013).Tiene un menor impacto ambiental que PHES. Su eficiencia es menor comparada con PHES, varia de 40%-70% ("Energy Storage Association", 2015; Y.-M. Kim, Lee, Kim, & Favrat, 2012; Y S H Najjar, 2006). Generalmente se requieren de cavernas de sal, o mantos acuíferos para almacenar el aire presurizado. Tiene pérdidas de energía en forma de calor, se requieren equipos de intercambio de calor y calentadores auxiliares para la expansión del aire. Ambas tecnologías son utilizadas para almacenamiento de energía con larga duración, son las de menor costo por kW instalado de entre las demás tecnologías de almacenamiento de energía pero requieren condiciones geográficas especiales para su instalación.

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA POR BOMBEO HIDRÁULICO COMBINADO CON AIRE COMPRIMIDO (PHES-CAES): REVISIÓN TECNOLÓGICA

Algunos autores están investigando la posibilidad de integrar estas dos grandes tecnologías (PHES-CAES) en una sola (Bi, Jiang, Chen, & Ma, 2013; Y. M. Kim, Shin, & Favrat, 2011; Wang, Wang, Wang, & Yao, 2013; Yao, Wang, Liu, & Xi, 2014), aprovechando los beneficios de ser tecnologías maduras, de larga vida útil, bajo costo de inversión y operación, utiliza recursos no tóxicos para el ambiente (agua y aire), ambos son abundantes (en el caso de agua de mar), alta densidad energética de CAES al utilizar altas presiones y alta eficiencia de PHES al utilizar el conjunto bomba-turbina.

Algunos autores proponen el uso de agua y gas (Bi et al., 2013; Ma, Bi, Chen, Li, & Jiang, 2013). Se utilizan dos tanques separados por una bomba reversible, el tanque de menor presión contiene agua, y el segundo tanque de mayor presión contiene un gas. Durante el proceso de compresión se inyecta aire al tanque de gas, la bomba hidráulica se encarga de elevar la presión en el tanque de gas inyectando agua del tanque de menor presión. Después la descarga se lleva a cabo, el gas presurizado empuja el agua fuera del tanque hacia el tanque de menor presión a través de la bomba reversible que ahora funciona como turbina hidráulica generando energía eléctrica. El sistema utiliza una turbina hidráulica para generar electricidad, lo cual tiene una mayor eficiencia en la conversión de energía que las CAES convencionales. La desventaja es que al igual que en las tecnología CAES, la presión no es constante. Las tecnologías CAES requieren funcionar en un rango de presiones cercanas a las condiciones de diseño del compresor y turbina de gas, esto para lograr la máxima eficiencia en el proceso de compresión y expansión. Para lograr esto se controla la presión de entrada y salida estrangulando el aire, lo cual genera pérdidas de energía. Debido a que los rangos de operación son generalmente de 55-103 bars se requiere gran volumen de almacenamiento de aire para mantener ese rango de presión por un mayor tiempo (Y. M. Kim et al., 2011).

Para reducir el volumen de almacenamiento, mantener la eficiencia de CAES y reducir las pérdidas de energía por estrangulamiento de aire se propone el uso de CAES a presión constante compensado por una columna de agua (Heidenreich, 2007; Y. M. Kim et al., 2011). El sistema tiene la misma capacidad de generación de energía eléctrica utilizando solamente el 23% del volumen de almacenamiento utilizado por CAES a volumen constante con presión variable. Para compensar la presión con una columna de agua se requiere de cuevas muy profundas para lograr las diferencias de altura del agua. Esto dificulta la construcción. Para disminuir las diferencias de alturas se estudia el uso de una bomba entre la cueva que contiene el aire presurizado y un embalse de agua. La bomba se encarga de mantener la presión del aire inyectando agua a la cueva. La desventaja es que la bomba consume el 15% de la energía generada. Como solución a lo anterior se plantea el uso de un sistema que funciona a presión constante combinado con bombeo hidráulico (Y.-M. Kim, 2012; Y.-M. Kim et al., 2012). El sistema consta de dos tanques de almacenamiento de aire conectados entre sí mediante una tubería y una bomba reversible colocados en la parte inferior de ambos tanques. El primer tanque está conectado al compresor y turbina de gas por su parte superior, el segundo actúa como almacenamiento. Ambos tanques contienen agua y aire. Durante el proceso de compresión se ingresa aire al primer tanque y empuja al agua al segundo tanque. La bomba ayuda en el desplazamiento del agua para mantener una presión constante en el proceso de compresión. Durante la descarga, el aire presurizado en el primer tanque se expande en la turbina de gas, el aire presurizado en el segundo tanque empuja el agua hacia el primer taque para mantener la presión constante en el proceso de expansión. En el desplazamiento del agua se acciona la turbina hidráulica (bomba reversible) y se genera electricidad.

En la propuesta anterior no se le da importancia al calor generado durante el proceso de compresión, lo cual aumenta la temperatura y provoca un mayor trabajo en el compresor, ni tampoco se considera que el aire al enfriarse perderá presión, es decir es un sistema adiabático. Es por ello que Huanran Wang sugiere realizar el proceso de compresión cuasi-isotérmico utilizando un pistón líquido y rociado de agua para lograr la transferencia de calor del aire al agua. Además el sistema de almacenamiento es mayormente PHES ya que no se utiliza la turbina de gas, en su lugar la turbina hidráulica genera todo el trabajo (Wang et al., 2013). La estructura es más simple, solo se utiliza un tanque, un compresor, una bomba y una turbina hidráulica. El tanque es precargado con aire mediante el compresor. Durante el proceso de carga la bomba inyecta agua al tanque elevando la presión interna, al mismo tiempo se rocía agua por la parte superior del tanque para estabilizar la temperatura del aire. Después la descarga toma lugar, el aire presurizado empuja el agua fuera del tanque, al mismo tiempo se rocía agua del fondo del tanque sobre el aire, debido a que el agua tiene mayor temperatura, cede su calor al aire y ayuda en el proceso de expansión. El agua fluye a través de una turbina hidráulica y se genera energía eléctrica. La eficiencia es alta y los costos de construcción bajos comparado con CAES, no se requieren de condiciones geográficas especiales, la densidad energética aumenta al aumentar la presión inicial de carga (Wang et al., 2013). Con esto se da solución a los problemas de PHES y CAES planteados al inicio de este trabajo, sin embargo nuevamente se tiene la desventaja de que la bomba y la turbina hidráulica no trabajan en condiciones estables, lo que perjudica su eficiencia. Es por ello que se realiza una mejora a la propuesta anterior en donde se agrega un segundo tanque donde se almacena el aire a alta presión. Al inicio los dos tanques se precargan mediante un compresor, una vez terminada la precarga el compresor para. Durante la carga, la bomba inyecta agua al primer tanque. Los dos tanques se encuentran conectados por un segundo compresor que mantiene constante la presión durante el proceso de carga en el primer tanque, y aumenta la presión en el segundo tanque. Durante el proceso de descarga el segundo tanque descarga su presión en el primer tanque manteniendo este último una presión constante durante la descarga del agua a través de la turbina hidráulica (Yao et al., 2014).

Paralelo a lo anterior en el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) está en etapa de desarrollo un sistema integral de almacenamiento de energía distribuido (GLIDES por su siglas en inglés) (Witt, Hadjerioua, Martinez, & Bishop, 2015) donde están resolviendo el problema de la combinación PHES-CAES desde otro enfoque, disolución del aire en el agua. La disolución del aire en el agua depende de la presión y temperatura a la que estén sometidos, y cuando mayor es la disolución del aire en el agua, mayor son las pérdidas de presión en el tanque de almacenamiento (Romero, 2013). Es por ello que GLIDES utiliza una capa aislante flotante para dividir el aire del agua y así prescindir del uso de un compresor de aire. Utilizan una bomba para cargar el sistema, introduciendo el agua a la cámara

cargada previamente con aire elevando su presión. Durante el proceso de carga la bomba es accionada con energía solar fotovoltaica, un colector de energía solar térmica recolecta calor durante el día y lo almacena en un material con cambio de fase. Durante el proceso de descarga el agua bajo presión circula por una turbina hidráulica al mismo tiempo que el calor almacenado durante el día se utiliza para elevar la temperatura del aire almacenado y con ello elevar su presión. El proceso de compresión es ineficiente ya que no se le retira calor al aire presurizado.

El inventor Benjamin R. (Bollinger, 2010), describe un sistema y método para una expansión rápida e isotérmica de un gas en un cilindro. El cilindro está incluido en un sistema de conversión de energía hidráulico-neumático que incluye una cámara de gas (lado neumático), una cámara de fluido (lado hidráulico) y un mecanismo que separa ambas cámaras pero permitiendo un desplazamiento para el intercambio de presión entre ambas cámaras. La cámara de gas del cilindro contiene un mecanismo de acoplamiento para diferentes tipos de intercambiadores de calor comerciales, por donde circula el gas del lado neumático e intercambia calor con un fluido de trabajo de flujo variable a temperatura ambiente. En esta patente se busca disminuir los costos del sistema de almacenamiento utilizando componentes comerciales, además de mejorar la potencia de expansión del gas aumentando la transferencia de calor variando el flujo del fluido de trabajo y el área del intercambiador de calor.

En la Universidad de Ecole Polytechnique Federale de Lausanna (EPFL), Suiza, se tiene un prototipo experimental de un sistema de almacenamiento de energía hidroneumático inventado por (Rufer et al., 2013) que utiliza dos pares de cilindros trabajando de forma alternada para realizar la compresión-expansión del aire. Cada par está compuesto por un cilindro de baja presión, y uno de alta presión. La compresión se realiza por dos etapas en cada par de cilindros mediante el principio de pistón líquido. En cada par, el aire del exterior es succionado por el pistón de baja presión al mismo tiempo que el pistón de alta presión comprime el aire que contenía inicialmente y lo deposita en el tanque de almacenamiento. El aire que ingresó previamente al cilindro de baja presión es comprimido y se deposita en el pistón de alta presión. El agua que ingresa a los cilindros es dispersada en forma de gota para lograr un proceso cuasi-isotérmico. El movimiento del agua es provocado por un cilindro horizontal con 6 cámaras, una para cada pistón de compresión/expansión, y las dos restantes que se encuentran en los extremos derecho e izquierdo son utilizadas para desplazar un pistón axial al llenarse y vaciarse de un fluido (agua o aceite) en repetidas ocasiones, este último fluido es movido por una bomba y una válvula de 4 vías 3 posiciones que permite cambiar la dirección del flujo. Un intercambiador de calor es utilizado para retirar la energía térmica del agua, que adquirió durante el proceso de compresión. La energía térmica retirada se disipa en el ambiente. Durante el proceso de expansión del aire ocurre lo mismo, pero en esta ocasión la bomba se convierte en turbina y el motor en generador eléctrico. La dispersión de agua dentro de los cilindros de compresión/expansión se lleva a cabo mediante bombas re circulatorias. En esta tecnología no se cuenta con un sub sistema de almacenamiento térmico, en su lugar, la energía térmica se dispersa al ambiente durante el proceso de compresión, para después tomarla nuevamente del ambiente durante el proceso de expansión. Sí bien es cierto que el medio ambiente es un gran sumidero y fuente de calor al mismo tiempo, esta tecnología debe ser lo suficientemente robusta para funcionar en regiones con clima muy variante y extremo a lo largo del año.

Como mejora a la patente de (Rufer et al., 2013), los inventores (Lebas, FR, Rojey, & FR, 2015), proponen utilizar un sistema en donde el medio de almacenamiento de energía térmica es el mismo fluido utilizado para comprimir el gas mediante una bomba hidráulica usando el principio de pistón líquido, y posteriormente recuperar la energía mecánica en la expansión del gas mediante una turbina hidráulica. El intercambiador de calor tubular en espiral es utilizado como medio de almacenamiento del aire presurizado, para tener una mayor área de contacto logrando cambios de presión en el gas aún con pequeños deltas de temperatura, similar a un proceso isotérmico. Un colector solar puede funcionar como auxiliar en el proceso de expansión del gas, proporcionando energía al medio de almacenamiento de energía térmica.

Los inventores (Samara-Rubio, Samara-Rubio, Ackler, & Moffat, 2016) desarrollaron un sistema que consta de 3 etapas de compresión-expansión de aire para mejorar la eficiencia termodinámica. El aire es almacenado en tanques, dependiendo de la etapa de comprensión-expansión, en su respectivo tanque de baja presión, media presión y alta presión. Los dispositivos de compresión se realizan mediante pistones hidráulicos frustoconico para reducir el volumen muerto. Se realiza un intercambio de calor en cada etapa en los tanques de almacenamiento de aire, y dentro del procesos entre los dispositivos compresores/expansores y tanques que contienen el líquido utilizado para la compresión, para lograr un proceso cuasi isotérmico. Un mezclador en tanques de almacenamiento de aire y del líquido ayuda a promover la transferencia de calor. Se utiliza un arreglo de contenedores hexagonales agrupados de tal forma que se asemejan a un panal de abejas. La geometría del contenedor hexagonal permite una mayor área de contacto entre el aire y la superficie, además aumenta la turbulencia y velocidad del mismo para mejorar la transferencia de calor. Una membrana elástica contiene en su interior el agua para la compresión del aire que se encuentra en la parte externa de la membrana. En los contenedores hexagonales se almacena el aire presurizado, unos conductos internos en las paredes transportan un líquido calo transportador para intercambiar calor con el aire de manera indirecta.

RESULTADOS

Durante el análisis del funcionamiento de las distintas tecnologías mostradas en el presente trabajo se detectaron las siguientes áreas de innovación:

Expansión y compresión a presión cuasi constante del gas

Las variaciones en presión durante el proceso de compresión y expansión del gas provoca que las máquinas fluido mecánicas involucradas operen fuera de su diseño nominal reduciendo la eficiencia global del sistema. Como se vio en este trabajo, algunos autores proponen el uso de una columna de agua o un tanque presurizado con aire extra para mantener la presión constante por mayor tiempo durante la compresión/expansión de este.

Métodos de trasferencia de calor

El trabajo de compresión del gas se ve reducido conforme nos aproximamos a un proceso isotérmico, además se maximiza el trabajo de expansión. La velocidad de transferencia de calor está relacionado con la potencia de salida del sistema de almacenamiento, a mayor velocidad en la transferencia de calor, mayor la potencia de salida en el proceso de expansión. La transferencia de calor puede mejorarse

por dos técnicas: aumentando el flujo másico del fluido de trabajo y aumentando el área de intercambio de calor. Es importante el diseño geométrico de los intercambiadores de calor a manera que ocupen el mayor espacio posible del cilindro, la ventaja de utilizar un pistón líquido, reside en que este último puede atravesar medios porosos inclusive algunos tecnólogos utilizan la técnica de espreado de agua dentro del cilindro logrando una mayor área de contacto entre agua y aire, sin embargo este método tiene una pérdida de presión debido a la disolución del aire en el agua.

Diseño de máquinas fluido mecánicas para alta presión

Al aumentar la presión del gas presurizado, estamos aumentando la densidad energética del sistema de almacenamiento, logrando así equipos de dimensiones reducidas. Las turbinas comerciales existentes que soportan alta presión (>800 psi) como las turbinas tipo pelton, solo están disponibles para aplicaciones a gran escala (> 1 MW) y para caudales altos (> 1000 m^3/h) haciéndose inviable su aplicación técnica y económica.

CONCLUSIONES

Los sistemas de almacenamiento de energía híbridos PHES-CAES son una tecnología emergente muy prometedora debido a su bajo impacto ambiental, y por utilizar materias primas abundantes de fácil adquisición (agua y aire). No se requiere de trabajo especializado para la extracción o elaboración de las materias primas, no utiliza materiales especializados para su construcción y es una tecnología que puede ser desarrollada por tecnólogos Mexicanos para su comercialización Nacional e Internacional. Al utilizar un pistón líquido en lugar de uno sólido se minimiza el volumen muerto, las fugas de aire a través de los empaques además de las pérdidas de energía por fricción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT- SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA por el apoyo recibido a través del proyecto P09 del CEMIE-Solar.

REFERENCIAS

Bi, J., Jiang, T., Chen, W., & Ma, X. (2013). Research on Storage Capacity of Compressed Air Pumped Hydro Energy Storage Equipment. *Energy and Power Engineering*, *05*(04), 26–30. http://doi.org/10.4236/epe.2013.54B005

Bollinger, B. R. (2010). System and method for rapid isothermal gas expansion and compression for energy storage. Recuperado a partir de http://www.google.com/patents/US7802426

Bollinger, B. R., McBride, T. O., Cameron, B., Magari, P., Izenson, M., & Chen, W. (2014, julio 1). United States Patent: 8763390 - Heat exchange with compressed gas in energy-storage systems. Recuperado a partir de http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/8763390

Cyphelly, I., & CH. (2000, noviembre 14). United States Patent: 6145311 - Pneumo-hydraulic converter for energy storage. Recuperado a partir de http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/6145311

Energy Storage Association. (2015). Recuperado el 22 de diciembre de 2015, a partir de http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes

Energy Storage Wars. (2013). Recuperado a partir de http://conservationmagazine.org/2013/06/compressed-air-energy-storage/

Fong, D. A., Crane, S. E., Berlin, J., & Pourmousa Abkenar, A. (2015, agosto 18). United States Patent: 9109614 - Compressed gas energy storage system. Recuperado a partir de https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US153435342&recNum=5&maxRec=11&office=&prevFilter=&sortOption=Relevance&queryString=EN_TI%3A%28Compressed+gas+energy+storage+system%29+AND+IN%3AFong+&tab=NationalBiblio

Fong, D. A., Crane, S. E., Berlin, J., Pourmousa Abkenar, A., Mahalatkar, K., IN, … Stahlkopf, K. E. (2013, octubre 22). United States Patent: 8561399 - Compressed air energy storage system utilizing two-phase flow to facilitate heat exchange. Recuperado a partir de http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/8561399

Heidenreich, D. C. (2007, octubre 16). Compressed air pumped hydro energy storage and distribution system. United States. Recuperado a partir de http://www.google.com/patents/US7281371

Huggins, R. A. (2010). *Energy Storage*. Boston, MA: Springer US. Recuperado a partir de http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-1024-0

Kim, Y.-M. (2012). *Novel concepts of compressed air energy storage and thermo-electric energy storage* (Doctor thesis). ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Suisse. Recuperado a partir de http://infoscience.epfl.ch/record/181540

Kim, Y.-M., Lee, J.-H., Kim, S.-J., & Favrat, D. (2012). Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses. *Entropy*, *14*(8), 1501–1521. http://doi.org/10.3390/e14081501

Kim, Y. M., Shin, D. G., & Favrat, D. (2011). Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis. *Energy*, *36*(10), 6220–6233. http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.040

Lebas, E., FR, Rojey, A., & FR. (2015, julio 14). United States Patent: 9080574 - Method and apparatus for storing mechanical energy by quasi-isothermal expansion and compression of a gas. Recuperado a partir de http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/9080574

Lemofouet-Gatsi, S. (2006). *investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors* (Ph.D). EPFL, Switzerland. Recuperado a partir de http://infoscience.epfl.ch/record/89165

Lemofouet, S., CH, Rufer, A., & CH. (2013, octubre 29). United States Patent: 8567183 - Multistage hydraulic gas compression/expansion systems and methods. Recuperado a partir de https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US8567183.pdf

Ma, X., Bi, J., Chen, W., Li, Z., & Jiang, T. (2013). Research on New Compressed Air Energy Storage Technology. *Energy and Power Engineering*, *05*(04), 22–25. http://doi.org/10.4236/epe.2013.54B004

Pickard, W. F. (2012). The History, Present State, and Future Prospects of Underground Pumped Hydro for Massive Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, *100*(2), 473–483. http://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2126030

Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 586–598. http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040

Romero, R. G. C. (2013, julio 4). *A PV Powered BWRO Desalination Installation with Energy Recovery and Hydro-Pneumatic Energy Storage* (Master thesis). Delft University of Technology, Delft. Recuperado a partir de http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A31cfa67f-278c-4fe8-abf4-cdbd9a993aa8/

Rufer, A., CH, Favrat, D., CH, Barrade, P., CH, … CH. (2013, febrero 19). United States Patent: 8378521 - Energy storage systems. Recuperado a partir de http://www.freepatentsonline.com/8378521.pdf

Rufer, A., Favrat, D., Barrade, P., & Lemofouet, S. (2008, noviembre 21). Energy Storage Systems. Recuperado a partir de https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008139267&recNum=1&maxRec=&office=&prevFilter=&sortOption=&queryString=&tab=PCT+Biblio

Samara-Rubio, D., Samara-Rubio, E., Ackler, H., & Moffat, R. (2016, enero 26). United States Patent: 9243558 - Compressed air energy storage. Recuperado a partir de http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&u=%2Fnetahtml%2FPTO%2Fsearch-adv.htm&r=1&f=G&l=50&d=PTXT&p=1&S1=StorWatts&OS=StorWatts&RS=StorWatts

Wang, H., Wang, L., Wang, X., & Yao, E. (2013). A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System. *Energies*, *6*(3), 1554–1567. http://doi.org/10.3390/en6031554

Witt, A. M., Hadjerioua, B., Martinez, R., & Bishop, N. (2015). *Evaluation of the Feasibility and Viability of Modular Pumped Storage Hydro (m-Psh) in the United States* (No. ORNL/TM--2015/559). Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Recuperado a partir de http://www.osti.gov/scitech/biblio/1222573

Yao, E., Wang, H., Liu, L., & Xi, G. (2014). A Novel Constant-Pressure Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System. *Energies*, *8*(1), 154–171. http://doi.org/10.3390/en8010154

Y S H Najjar, N. M. J. (2006). Comparison of performance of compressed-air energy-storage plant with compressed-air storage with humidification. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-journal of Power and Energy - PROC INST MECH ENG A-J POWER*, *220*(6), 581–588. http://doi.org/10.1243/09576509JPE246

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE SFV INTERCONECTADOS A LA RED DE 3 kW CON TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS DIFERENTES (CIGS, CdTe y p-Si)

Samuel Rojas López Zalasar, Aarón Sánchez Juárez
Departamento de materiales solares, Instituto de Energías Renovables UNAM, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62588, México, (777) 362-0090, ext.29742, jefms@ier.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la comparación del rendimiento energético de tres sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de diferentes tecnologías comercialmente disponibles: CIGS, CdTe y p-Si. Estos sistemas FV se encuentran instalados en el Instituto de Energías Renovables (IER) ubicado en Temixco, Morelos, México y cada uno tiene una capacidad de 3 kWp. Cada arreglo fotovoltaico se encuentra expuesto a las mismas condiciones ambientales y el diseño eléctrico es similar en cada arreglo.
Para obtener el rendimiento energético de cada sistema fotovoltaico se caracterizaron eléctricamente cada módulo individual así como el arreglo completo, es decir, se obtuvieron curvas de corriente contra voltaje, se registró corriente y voltaje de cada cadena, temperatura de cada tecnología, temperatura ambiente, Irradiancia y velocidad de viento. Se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de variables eléctricas de tal manera que se pudieran obtener los parámetros eléctricos (voltaje, corriente, potencia) de cada arreglo. Se presentan los resultados del comportamiento eléctrico de los sistemas FV de diferentes tecnologías, y se compara el rendimiento eléctrico de cada una de ellas con los datos registrados durante cuetro meses.
Palabras clave: Rendimiento energético, Sistemas fotovoltaicos, sistemas de monitoreo FV.

ABSTRAC

In this work is presents the comparison of the performance energy of three systems photovoltaic interconnected to the network of different technologies commercially available: CIGS, CdTe and p-SI. These systems FV were found installed in the Institute of energy renewable (IER) located in Temixco, Morelos, Mexico and each one has a capacity of 3 kWp. Each photovoltaic array is exposed to the same environmental conditions and electricaldesign is similar in each array.
To obtain the performance energy of each system photovoltaicis characterized electrically each module individual as well as the arrangement full, i.e. is obtained curves of current against voltaje, record current and voltage of each chain, temperature of each technology, ambient temperature, irradiance and wind speed. It was designed and implemented a system of monitoring electrical variables in such a way that the electrical parameters (voltage, current, power) of each array could be found. Presentsthe results of the electrical behavior of the PV systems of different technologies, and power of each performance is comparedwith data reported for three months.
Keywords: performance energy, photovoltaic systems, systems of monitoring PV.

INTRODUCCIÓN

La fiabilidad a largo plazo de los paneles solares fotovoltaicos es esencial para garantizar su factibilidad técnica y económica, y con ello asegurar el éxito futuro de esta tecnología y su implementación como fuente de energía eléctrica. Los periodos de garantía dados por los fabricantes deben corresponderse con la vida útil y la producción real de los módulos solares fotovoltaicos. Se necesitan las características de rendimiento de los módulos fotovoltaicos con el fin de modelar su rendimiento energético. La información disponible de los fabricantes se limita típicamente a los parámetros eléctricos tales como el voltaje de circuito abierto Voc, corriente de cortocircuito Isc, voltaje en punto de máxima potencia Vmp, corriente en punto de máxima potencia Imp, máxima potencia Pmax y cómo afectan los coeficiente de temperatura en el módulo bajo condiciones estándar (STC). La STC especifica una temperatura de 25 °C, irradiancia de 1000w/m2 y una masa de aire espectral de 1.5 (AM 1.5).[1]
Esta información si bien nos ayuda será útiles para comprar el rendimiento del módulo fotovoltaico en condiciones nominales pero es insuficiente para poder predecir el rendimiento energético que tendrá durante toda su vida útil en condiciones de operación.
En este artículo se presenta la comparación del rendimiento energético de tres sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de diferentes tecnologías comercialmente disponibles: CIGS, CdTe y p-Si. Estos sistemas FV se encuentran instalados en el Instituto de Energías Renovables (IER) ubicado en Temixco, Morelos, México y cada uno tiene una capacidad instalada de 3 kWp. Cada arreglo fotovoltaico se encuentra a una inclinación igual a la latitud del lugar, está es igual a 18.84° y se encuentran expuestos a las mismas condiciones ambientales y el diseño eléctrico es similar en cada arreglo.
Para obtener el rendimiento energético de cada sistema fotovoltaico se caracterizaron eléctricamente cada módulo individual así como el arreglo completo, es decir se obtuvieron curvas de corriente contra voltaje. Se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de variables eléctricas de tal manera que se pudieran obtener los parámetros eléctricos (voltaje, corriente, potencia) de cada arreglo. Se presentan los resultados del comportamiento eléctrico de los sistemas FV de diferentes tecnologías, y se compara el rendimiento eléctrico de cada una de ellas con los datos registrados durante cuatro meses.

Fotografía 1. Sistemas Fotovoltaicos interconectado a la red con un total de 9 kWp dividido en 3 tecnologías diferentes.

DIMENSIONAMIENTO DE UN SFV

El dimensionamiento de un SFV interconectado a la red se basa en el criterio de balance de energía, el cual sugiere que la energía generada sea igual a la consumida, de tal modo que se puede establecer una relación algebraica como la siguiente:

$$E_G = \frac{E_C}{\eta_T}$$

Donde E_G es la energía generada, E_C es la energía consumida y η_T es la eficiencia global por el manejo de la energía [2]. De esta forma se puede calcular la energía producida E_G por el sistema fotovoltaico con una potencia pico P_p, una eficiencia global η_T, un rendimiento térmico R_T y un recurso solar R_S en donde se vaya instalar el SFV [3], esto es:

$$E_G = P_P * R_S * R_T * \eta_T$$

Las perdidas asociadas al efecto de la temperatura se calcula mediante el rendimiento térmico de los módulos que se definen de la siguiente manera.

$$R_T = 1 - \Delta P$$

Donde $\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial T} * \frac{\Delta T}{100}$, en esta ecuación tenemos que $\frac{\partial P}{\partial T}$ es el coeficiente de temperatura de pérdida de potencia del módulo y $\Delta T = T_{celda} - T_{STC}$, además la $T_{celda} = T_{amb} + C_1 * G$, donde T_{amb} es la temperatura ambiente máxima del lugar registrada en el año, G es la irradiancia máxima asociada al día mas cliente y $C_1 = \frac{T_{NOCT} - 20℃}{\frac{800W}{m^2}}$donde T_{NOCT}es un dato que provee el fabricante y $T_{STC} = 25℃$. Y para el manejo y acondicionamiento de la energía de define la eficiencia total del sistemas como:

$$\eta_T = \eta_w * \eta_I * \eta_O * \eta_{SP}$$

Donde η_W es la eficiencia del cableado, η_I es la eficiencia del inversor, η_O se asocia a las pérdidas por orientación y η_{SP} se asocia a las pérdidas por suciedad y polvo.

METODOLOGÍA DE ANALISIS

Para poder llevar a cabo la metodología para el análisis del rendimiento energético se utilizó una serie de dispositivos lo cual son los encargados de monitor las diferentes variables de los tres SFV en la siguiente tabla se enlistan los dispositivos que se utilizaron para el monitoreo de la plataforma con las tres tecnologías diferentes [4]:

Tabla 1. Instrumentación empleada para el monitoreo del SFV

Variable	Descripción	Modelo	Calibración
Corriente	Transductor de corriente CR Magnetics	CR5211-3-10	IEC-60068-2-6
Voltaje	Transductor de voltaje CR Magnetics	CR5311-600	IEC-60068-2-6
Temperatura	Sensor tipo K	-	Bianual (Fabricante)
Velocidad de Viento	Wind Speed Young Company	03002-5	Bianual (Fabircante)
Irradiancia	Sensor de Irradiancia Fronius Irradiance	43,0001,1189	Fabricante
Adquisidor de datos	Datalogger Campbell Scientific	CR1000 Y NL121	Bianual (Fabricante)
Fuente de alimentación Sensores	Fuente de 24 Vdc Mean Well	MDR-60-24	Fabricante

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLATAFORMA SOLAR FOTOVOLTAICA

En los meses correspondientes, Abril, Mayo, Junio y Julio del año en curso, se toman los valores de producción real mensual en el punto de salida del inversor hacia la red eléctrica, así como la potencia pico de la instalación y la irradiancia solar total mensual para tres tipos de sistemas fotovoltaicos (CIGS, Poly, CdTe) interconectados a la red.

- En el primer sistema, el sistemas es de 3 kWp con tecnologías de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), cada módulo es de 150 W por un conjunto de 20 módulos los cuales conforman el sistemas de 3 kWp, la configuración de los módulos generadores de esta tecnología está dada por 5 cadenas de 4 módulos en serie (4Sx5P), proporcionando así la energía requerida para el inversor. (a)

- En el segundo sistemas de 3 kWp es de tecnología de Silicio poli cristalino con una potencia pico de 250 W cada módulo, el sistema consiste en 12 módulos en serie que dan una potencia total de 3 kWp, a diferencia de las otras tecnologías estos módulos proporcionan 4 veces más corriente provocando el uso de cable más grueso y menos material para la colocación estructural.

- El tercer sistema interconectado a la red es de tecnología Teluro de Cadmio, al igual que el primer sistema estos SFV son de película delgada teniendo la desventaja de ser más frágiles ya que son de vidrio, dicho módulos tiene una potencia de 75 W y el sistemas tiene un total de 40 módulos, Su configuración para llegar a los 3 kWp está basada en una arquitectura de 5 cadenas de 8 módulos en serie (8Sx5p).

Las tres tecnologías están conectados a tres inversores eléctricamente idénticos de la marca SMA, modelo Sonny Boy 4000-US, Potencia nominal es de 4000 Wac con una amplia ventana de operación de voltaje en AC (mínima de 183vac, nominal de 208 Vac y máxima de 229vac) y una frecuencia (Hz) de 59.3 hasta 60.5 de acuerdo a la red, en las parte de DC maneja un sistemas máximo de 600 Vdc con una corriente de hasta 18 Adc con dos puntos de máxima potencia de entre 220-480 Vdc, su protección contra intemperie es de grado IP 54 tipo 3R con una eficiencia de conversión de 96.5 %. Los inversores no son nuevos, ya tiene un uso de aproximadamente 10 años en un sistemas de 9 kWp con tecnología de silicio monocritalino, durante su traba en la anterior plataforma nunca tuvieron fallas.

Tabla 2 .Características eléctricas de los módulos que se instalaron en cada tecnología de la plataforma.

	CIGS [5]	SI-POLY [6]	CdTe [7]
Marca	Tsmc solar	INNOTECH SOLAR	CALYXO
Modelo	TS-150C2	DB-E250	CX3 75
Pp (W)	150	250	75.0
Voc (V)	86.6	37.6	62.0
Isc (A)	2.62	8.79	1.95
Vmp (V)	65.5	31.0	46.3
Isc (A)	2.29	8.22	1.65
Eficiencia %	13.3	15.2-15.8	-
Coeficiente temperatura			
Isc	-0.30 %/°C	-0.38 %/°C	-0.25 %/°C
Voc	-0.29 %/°C	-0.32 %/°C	-0.25 %/°C
Pp	0.01 %/°C	0.077 %/°C	0.02 %/°C

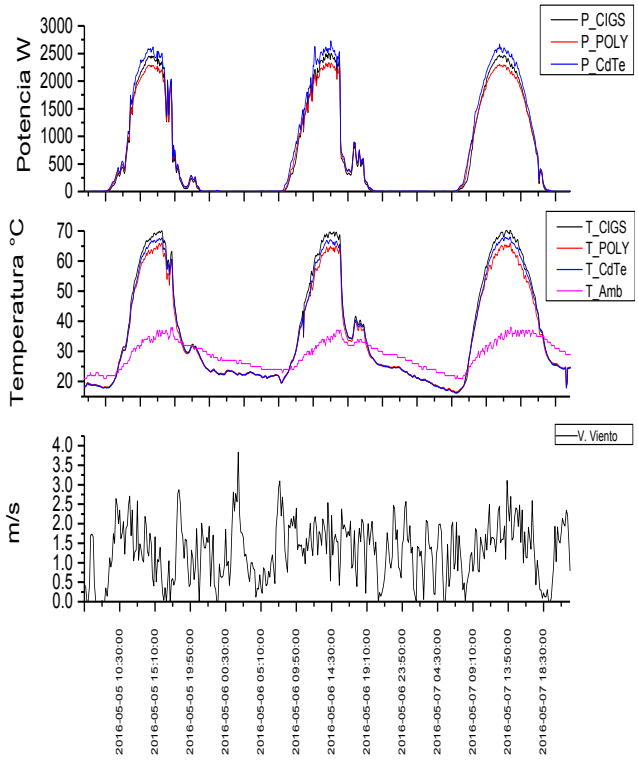
Resultados

Durante los 120 días de monitoreo en las 3 diferentes tecnologías se pueden exponer los resultados en las siguientes tablas en la cuales se puede observar los diferentes comportamientos de acuerdo a la tecnología bajo estudio, en la graficas 1, se muestras las potencias máximas obtenidos en 3 días mayor soleados con una irradianca de 1054 W/m^2, sus temperaturas alcanzadas y velocidad del viento.

Tabla 3. Se muestras los principales resultados del rendimiento emergentico de 3 días escogidos al azar con mayor irradiancia, se puede ver la potencia instantánea, eficiencia del inversor y temperatura máxima de los módulos registrada [8].

	05/05/2016 Rs 5.135 h Energía generada	05/05/2016 Rs=5.167 h Energía generada	05/05/2016 Rs= 6.205 Energía generada	EFICIENCIA INVERSOR%	POTENCIA TOTAL AC Energía generada	TEMPERATURA PROMEDIA MAX.MODULO
CIGS	13.93 kWh	13.97 kWh	17.38 kWh	92.56	41.90 kWh	69.98 °C
Si-p	13.65 kWh	13.81 kWh	17.04 kWh	91.22	40.59 kWh	65.86 °C
CdTe	15.14 kWh	15.59 kWh	19.08 kWh	91.27	45.45 kWh	67.79 °C

Grafica 1. Comportamiento de la potencia de las tres tecnologías



Grafica 2. Energía total generada durante los 4 meses de la planta bajo estudio.

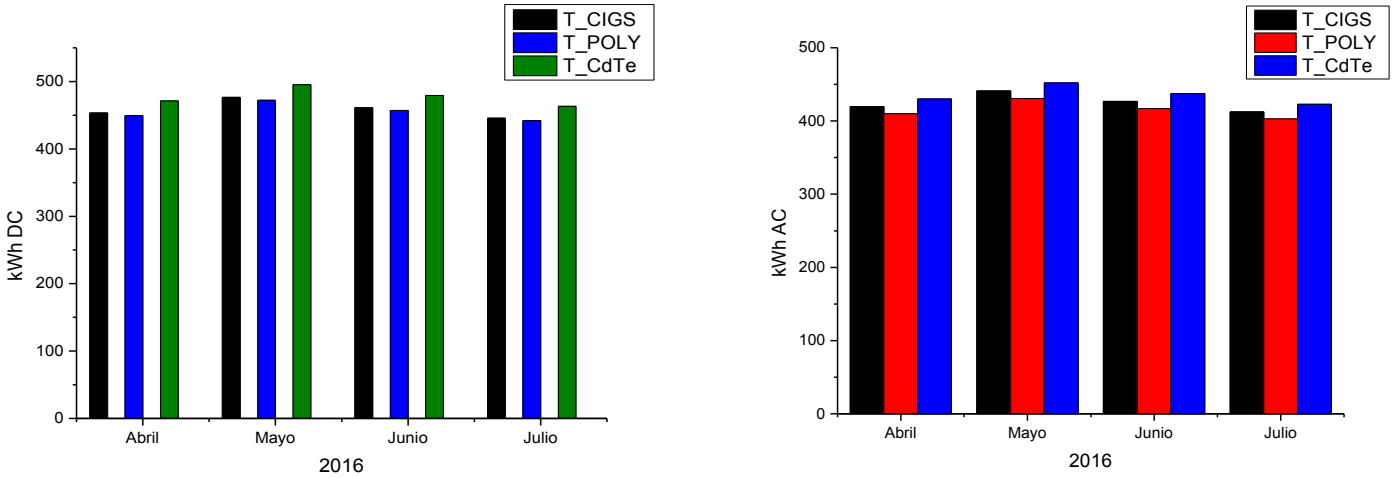


Tabla 4. Producción de energía generada de la planta Fotovoltaica interconectada a la red durante los meses bajo estudio

2016	Tecnología_CIGS		Tecnología_POLY		Tecnología_CdTe	
	kWh DC	kWh AC	kWh DC	kWh AC	kWh DC	kWh AC
Abril	453.368	419.637	449.382	409.9261	471.250	430.11
Mayo	476.419	440.973	472.232	430.77	495.212	451.98
Junio	461.053	426.75	456.998	416.874	479.248	437.41
Julio	445.684	412.525	441.765	402.978	463.263	422.82
Total	1836.524	1699.885	1820.377	1660.548	1908.973	1742.32

CONCLUSIONES

Del estudio realizado se derivan las siguientes conclusiones:

Durante los 4 meses que se estudió la tres diferentes tecnologías instaladas en las mismas condiciones en las instalaciones del IER-UNAM, se puede concluir que las que mejor rendimiento energético tiene bajo diferentes circunstancias tales como la irradicancia, temperatura ambiente y temperatura del módulo, velocidad del viento y el mismo inversor da como resultado que la tecnología de película delgada de material Teluro de Cadmio (CdTe) la cual tiene un rendimiento mayor a las tecnologías de CIGS y Silicio policri stalino del 5.48 % y 6.54 % respectivamente, con una producción total de 1836.524 kWh para el sistemas de tecnología CIGS, 1820.377 kWh para la de Silicio Policristalino y 1908.973 kWh para CdTe.

Como resultado del desarrollo de dicho trabajo, se puede argumentar diferentes situaciones que se observaron durante el análisis de las tecnologías. Durante los meses más calientes del año, abril y Mayo, se registraron temperaturas mayores a 70 °C y gracias a esas elevadas temperaturas en los módulos se vio muy claramente que el efecto de la temperatura golpea más fuertemente a la tecnología de silicio obteniendo rendimientos térmicos (Rt) de 0.81, pero conforme transcurría el día y la irradiancia descendía, la que eficiencia de los módulos de película delgada eran fuertemente afectados mientras que el eficiencia de los módulos de silicio se mantenían constantes e incluso aumentan conforme disminuía su temperatura, entonces cuando en el día se tenía una irrandiancia menor a 700 W/m^2 las tres tecnologías tenían un rendimiento similar.

Siempre es necesario tener un sistema de monitoreo en los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica de pequeños, medianos y grandes potencias, la presencia de un sistemas de monitores ayuda a tener datos del comportamiento de diferentes tecnologías de acuerdo al lugar donde sean instaladas ya que también ayuda a detectar el mal funcionamiento de algún sistema y una vez obteniendo datos de su comportamiento del SFV podrán ser de interés para investigaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por parte del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), a través del programa de apoyos para congresos para alumnos del programa de Posgrado de maestría y doctorado en ingeniera en Energía para la realización y presentación de este trabajo. También se le gradece al Dr. Aarón Sánchez Juárez por su gran ayuda para proporcionar el equipo necesario para el monitorear y analizar los datos obtenidos en estos 4 meses de largo trabajo para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

[1] Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements
A. Hunter Fanney, Mark W. Davis, Brian P. Dougherty, David L. King, William E. Boyson and Jay A. Kratochvil

[2] Sánchez Ju´arez A., Ortega Cruz J., Mart´ınez Escobar D., S´anchez P´erez M., Sistemas Fotovoltaicos Iluminación y Bombeo, ANES, (2009).

[3] Sánchez Juárez et al, sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, Temixco, Morelos, (2010).

[4] http://xml.ier.unam.mx/xml/se/cs/meteo1.xml

[5]TS_CIGS_series_C2_Datasheet_EU-EN_01-2015.pdf

[6]DesingBlack_poly_240-250-260_01-2015_En.pdf

[7]Calyxo_datenblatt_es_86.pdf

[8] rendimiento global de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, Luis Vilariño García, Javier Vilariño García, Cristina Arenas Rayo, Germán Núñez Rodriguez e Higinio F. Menéndez Milanés

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

CONTROL SUPERVISORIO PARA CARGA Y DESCARGA DE UNA BATERÍA

Carlos G. Temoltzin Caballero, José G. Pérez Luna, Abraham Flores Barreda, Yevi J. Olvera Martínez
Marco A. Zavaleta Barrales
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 14 sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, CP 72560, Puebla, Pue., México.
Tel. 222-2295500, Fax. 222-2295500, **carlostemoltzin@gmail.com.**

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un sistema de control supervisorio que permite optimizar el desempeño de una batería recargable. El sistema controla los niveles adecuados de voltaje durante los procesos de carga y descarga. De manera particular, este sistema está enfocado a cargar la batería con un panel fotovoltaico de 75 W; mientras que la descarga se efectúa con cargas de tipo resistivo como son las lámparas de LEDs. El circuito de carga se desarrolló mediante un comparador, el cual establece el nivel de voltaje máximo que puede permitirse a un batería; el sistema se desconecta cuando el voltaje se excede. El sistema de comparación se maneja con histéresis, para evitar las posibles oscilaciones que se presentan en el relevador, cuando éste se emplea como elemento de interrupción. El sistema de descarga emplea un circuito similar; sin embargo, en este caso cambia la referencia que permite la descarga mínima de la batería. Como comparador se emplea un circuito integrado LM311 y su señal de salida se envía al relevador por medio de un transistor, el cual refuerza la corriente de la señal. Los resultados muestran la factibilidad de obtener un adecuado control supervisorio mediante el comparador LM311. El sistema puede manejar corrientes de 10 A; por lo que es factible manejar potencias de hasta 250 W, tanto en la carga como en la descarga de la batería.

ABSTRACT

The development of a supervisory control system that optimizes the performance of a rechargeable battery is presented. The system controls the appropriate voltage levels during the loading and unloading. In particular, this system is focused to charge the battery with a photovoltaic panel of 75 W; while downloading is performed with resistive loads such as LED lamps. The charging circuit was developed through a comparator, which establishes the maximum voltage level that can afford a battery; the system is switched off when the voltage is exceeded. The system operates with hysteresis comparison to prevent possible fluctuations that occur in the relay when it is used as an element of interruption. The discharge system employs a similar circuit; however, in this case it changes the reference which allows minimum battery discharge. An LM311 integrated comparator and its output signal is sent to the relay through a transistor which reinforces the signal current circuit that is used. The results show the feasibility of obtaining an adequate supervisory control by the LM311 comparator. The system can handle currents of 10 A; so it is feasible to handle power up to 250 W, both the charge and discharge of the battery.

Palabras claves: Batería recargable, Control supervisorio, Panel fotovoltaico, Comparador, histéresis

INTRODUCCIÓN

Los paneles fotovoltaicos están cobrando cada vez mayor importancia debido a que son sistemas que generan energía eléctrica en forma limpia y amigable con el medio ambiente [1]. En muchas aplicaciones, sobre todo en comunidades rurales, se requiere guardar la energía generada, para poder ocuparla en la noche. Para realizar esta función se emplean baterías recargables que pueden operar con miles de ciclos de carga-descarga [2]. Un uso adecuado de la batería permite que ésta opere inclusive durante cinco años. Los daños que se pueden producir a una batería durante su operación pueden ser por exceso de corriente o bien por sobrecarga de la batería; lo cual ocasiona un sobrecalentamiento de las partes internas que la conforman. Otro tipo de daño se provoca si la batería se descarga a niveles inferiores a los 11 V, lo cual provoca daños irreparables. Para evitar el daño a una batería recargable se desarrolló un sistema de control supervisorio que evita que la batería se sobrecaliente por exceso de carga y también el posible daño por operar en condiciones de bajo voltaje; en particular, si éste se mantiene durante periodos prolongados. En este trabajo se presenta el desarrollo de un circuito que interconectado con el panel fotovoltaico y con la carga evita las condiciones de daño a la batería.

DIAGRAMA A BLOQUES DEL SISTEMA DE CARGA Y DESCARGA DE UNA BATERIA.

La figura 1 muestra el diagrama a bloques del control supervisorio que fue diseñado para optimizar el desempeño de una batería. Se observa en este diagrama que el panel fotovoltaico está conectado como entrada; mientras que, la carga está conectada como salida. La batería está conectada al sistema mediante un bus bidireccional; con el cual se establecen las funciones de carga y descarga de la batería. Internamente, el control supervisorio se diseñó empleando dos circuitos similares; uno es un sistema de carga que permite el paso de energía del panel hacia la batería y otro es el sistema de descarga que permite el paso de energía de la batería hacia la carga, muy similares porque realizan la función de comparación entre los niveles de voltaje en la batería y los voltajes de operación permitidos en la batería.

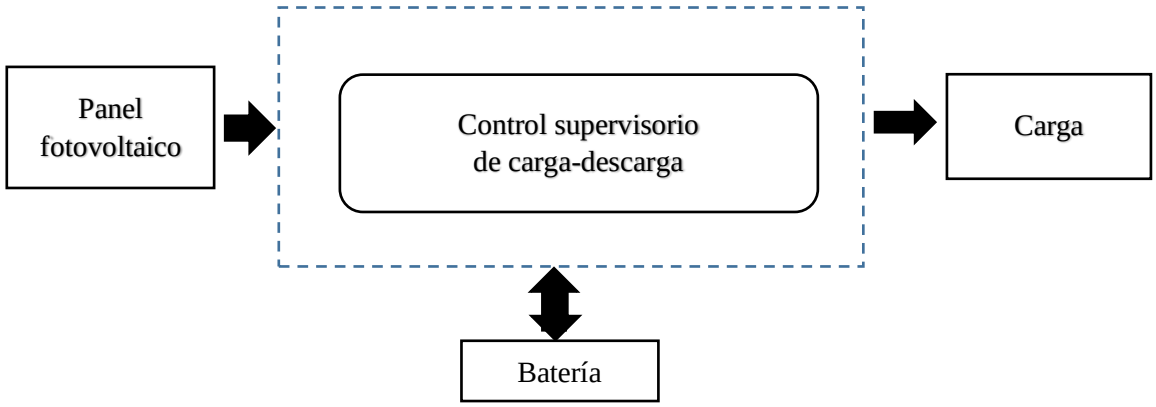


Fig. 1 Diagrama a bloques del control supervisorio de carga-descarga de una batería

DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL SUPERVISORIO

Para diseñar el control supervisorio para carga y descarga de la batería; se tomó en cuenta en primer lugar, que el sistema es autónomo y que la energía de que se dispone proviene de la misma batería. Considerando, además, que se van a emplear dos circuitos integrados LM311 como elementos de comparación y que estos a su vez requieren de referencias estables; se optó por incluir una fuente regulada de 5 V [3,4]. Esta fuente se implementó mediante el regulador LM7805, el cual se encuentra conectado directamente a la batería de 12 V. El voltaje regulado de 5 V permite obtener también las referencias estables requeridas por los comparadores mediante la implementación de un par de divisores de voltaje. Para diseñar el control de carga de la batería, se establecieron como voltajes de operación, un mínimo de 12 V y un máximo de 14 V; esto significa que cuando el panel cargue la batería, esta se va a desconectar cuando se rebasen los 14 V; mientras que, la descarga de la batería se va a permitir hasta un mínimo de 12 V. El manejo de estos voltajes en el comparador, requirió que el voltaje de la batería se adecuara a un cuarto de su magnitud, con el fin de que la referencia se pudiera diseñar con un divisor de voltaje alimentado por la fuente regulada de 5 V. El divisor de voltaje para la batería se implementó con los valores de resistencia de 33 KΩ y 10 KΩ; mientras que, el voltaje de referencia del comparador se implementó por medio de un potenciómetro de precisión y se ajustó a un valor próximo a 3.25 V, esta referencia está conectada a la terminal positiva del comparador LM311, que se encuentra en la parte superior del diagrama. El voltaje de 3.25 V corresponde a una cuarta parte de 13V; y es a partir de este voltaje que se manejan los voltajes de operación de 12 y 14 V, pues el comparador opera con un voltaje de histéresis de 0.5 V el cual se establece por medio de las resistencias de 100 KΩ y 1 MΩ conectadas en la entrada inversora del comparador. Una vez que ha quedado definida la condición de salida del comparador, esta señal se aplica a la resistencia de base del transistor empleado como refuerzo de corriente. Si el nivel de voltaje de la batería rebasa los 14 V, entonces el voltaje de salida del comparador está en nivel bajo y por lo tanto el relevador regresa a la condición de normalmente abierto. La condición de operación del relevador se estableció para que el relevador se active cuando hay energía solar disponible y se desactive cuando la batería se está descargando en exceso. El caso de descarga en exceso se presenta particularmente en las noches, cuando ya no se dispone de energía solar y se va a emplear la carga almacenada durante el día. En este caso entra en operación el segundo comparador, el cual se encuentra en la parte inferior del diagrama. Su operación es similar a la del primer comparador con las variantes que a continuación se indican. La referencia del comparador se introduce a la entrada inversora del comparador; lo cual permite operar el relevador mientras hay energía almacenada; es decir, cuando el nivel de voltaje de la batería disminuye a menos de 11 V, el relevador regresa a su condición de normalmente abierto, por tanto sin consumo de energía en el relevador. El sistema mantiene desconectada la carga, hasta que la disponibilidad de energía solar permita obtener un nivel mínimo de 12 V y la posibilidad de alimentar nuevamente una carga inclusive durante el día si así se desea. La figura 2 muestra también las condiciones de operación de los dos transistores; en particular, los resistores de 10 KΩ conectados a la base de los transistores permiten manejar las condiciones de corte y saturación para efectuar una adecuada conmutación de los relevadores. En los colectores de los transistores se incluyen diodos tipo LED para indicar que los relevadores están activos y los diodos de protección incluidos permiten inhibir la descarga súbita de las inductancias de los relevadores que pueden dañar a los transistores.

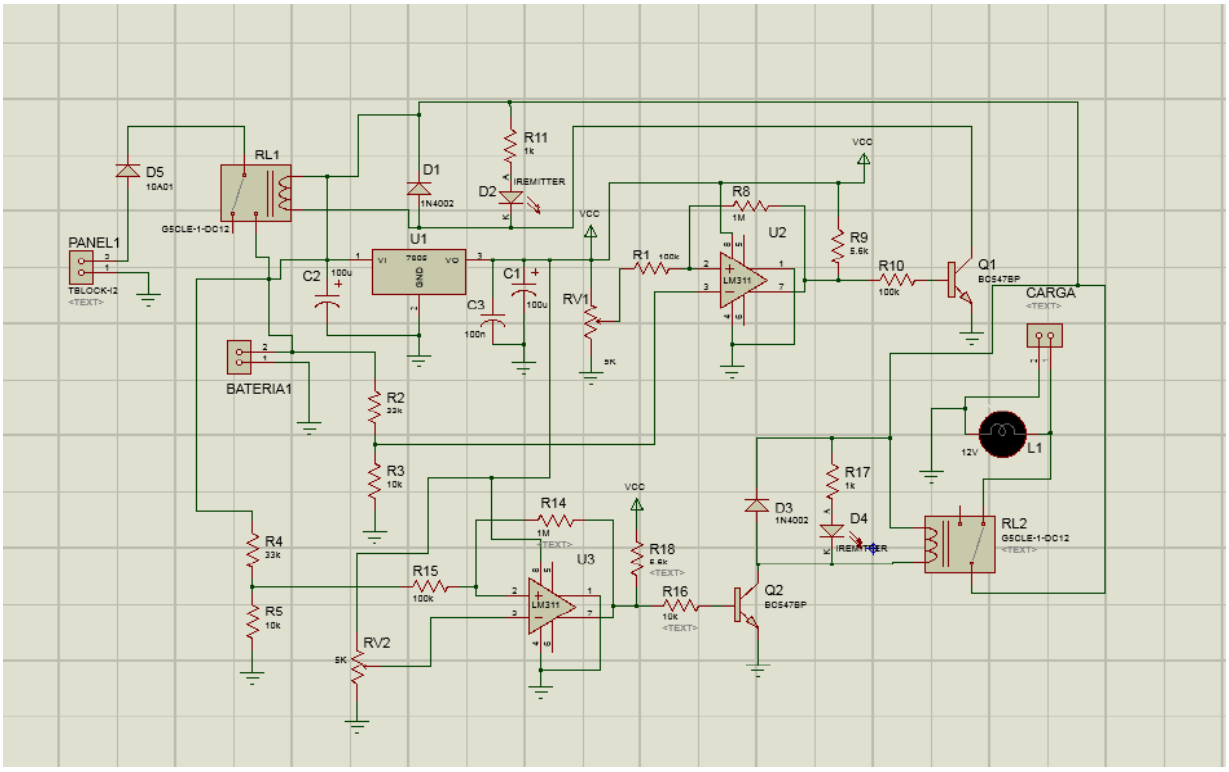


Fig. 2. Circuito para controlar la carga y descarga de una batería.

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con el fin de verificar el comportamiento adecuado del circuito se procedió a efectuar su calibración y caracterización. Se llevó a cabo una inspección general del circuito y se escogió como entrada de voltaje las terminales correspondientes de la batería. En estas terminales se conectó una fuente variable que podía barrer un voltaje entre 10 y 15 V. Se ajustó el voltaje en primer lugar a un valor de 12 V y con eta magnitud se verificó que el voltaje a la salida del regulador LM7805 fuese de 5 V. Posteriormente se ajustaron las referencias de los comparadores en 3.25 V y 3.0 V; tanto para el voltaje de carga como el de descarga respectivamente. Posteriormente se varió el voltaje de la fuente y se verificó que el diodo LED de carga se apagara en 14 V. También se verificó que este mismo LED se encendiera cuando el voltaje se redujera a 12 V. Con esto se verificó que el sistema evita la sobrecarga de la batería y que la recarga de la batería se reinicia una vez que el voltaje de la batería se ha reducido a menos de 12 V. De la misma manera se verificó la operación de descarga del sistema. En este caso el voltaje de la fuente se disminuyó hasta un valor inferior a los 11 V, en donde el diodo LED se apagó indicando la desconexión de la carga para evitar la sobre descarga de la batería. Posteriormente se subió nuevamente el voltaje de la fuente hasta alcanzar los 13 V y en esta condición se volvió a encender el LED para indicar que se conectaba nuevamente la carga.

CONCLUSIONES

Se diseñó, implementó y probó un circuito analógico para supervisar la operación correcta de una batería recargable. Se caracterizó la operación del sistema y se mostró que el circuito desarrollado puede operar con la energía propia de la batería en condición de autonomía.

Se mostró que la histéresis implementada en los comparadores, permite establecer las condiciones de operación de carga y descarga de la batería; en particular, que el sistema evita que la batería se sobrecargue a un voltaje superior a 14 V y se descargue a un voltaje inferior a 11 V. El sistema restablece las condiciones de carga y descarga en la batería una vez que se cuenta con energía eléctrica suficiente generada por el panel.

REFERENCIAS

[1] Cuce, E., Harjunowibowo D., Cuce P.M., Renewable and sustainable energy savings strategies for greenhouse systems: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Review, 2016.

[2] Faxas-Guzman J., Fernandez Romero A. J., Roa Escalante G., Tafur J. P., Urbina A., Longer battery lifetime provided by a priority load control algorithm on stand-alone photovoltaic system, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015.

[3] Robert F. Coughlin y Frederick F. Driscol, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Pearson Prentice Hall, 1999.

[4] Sergio Franco, Desing with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, Third edition, McGraw-Hill, 2002.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

MONITOREO WEB DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS EN MÉXICO

Bernd Weber, José Morelos M., Eduardo Yañez M., Iván G. Martínez Cienfuegos y M. Dolores Durán G.
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México,
Cerro de Coatepec s/n, Col. San Buenaventura, Toluca, México, Tel. 7222140855,
bweber@uaemex.mx

Ernst. A. Stadlbauer
University of Applied Sciences Giessen-Friedberg, Laboratory of Waste Treatment Processes,
Wiesenstrasse 14, 35390 Giessen, Germany, Tel.: 0049(641)309-2336, FAX: 0049(641)309-2337
ernst.a.stadlbauer@mni.thm.de

RESUMEN

Los servicios en línea en la generación de energía eléctrica a través de los sistemas fotovoltaicos (PV), vía WEB, proporcionan a los administradores de plantas PV (AP) información sobre el desempeño de uno o varios inversores con fines de que el usuario determine la clase de potencia, rendimiento energético y rentabilidad de los mismos. Además, le permite determinar y optimizar su autoconsumo potencial y así conocer la rentabilidad. El sitio WEB "Sunnyportal" no restringe la visualización a un solo usuario sino que permite al público acceder a los sistemas registrados en su portal, bajo autorización previa de los administradores de las plantas. Como el rendimiento de generación de energía eléctrica a través de PV depende primordialmente de factores como las condiciones meteorológicas, la contaminación y la irradiación solar del día pero también de la tecnología, ingeniería y mantenimiento empleada, se analizan las razones que causan una variación en el desempeño de los sistemas PV con la ayuda de la información disponible en los sitios web.

ABSTRACT

Online services in power generation through photovoltaic (PV) systems via WEB, provide information for the PV plants administrators (AP) about the performance of one or more power inverters with the purpose that the user determines the kind of potency, energetic performance and rentability. Besides, it gives them the opportunity to determine and optimize it potential auto consume. The web site "Sunnyportal" does not restrict the visualization to just one user, otherwise it permit the public to access to the registered systems in its portal by the previous authorization of the plants administrators. As the development of the electric energy by the PV depends primarily to some facts just like the meteorological conditions, pollution, solar irradiation of the day, but also the technology, engineering and the employed maintenance. The reasons which cause a variation in the performance of the PV helped with the information available in the web site are analyzed.

Palabras claves: Sunny Portal, Sistemas Fotovoltaicos, Inversores fotovoltaicos SMA, Monitoreo.

INTRODUCCIÓN

En estudios como el mostrado en la Prospectiva de Energías Renovables 2011-2025, México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional; esta característica resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar; la irradiación global media diaria en el territorio nacional es de alrededor de 5.5 kWh $m^{-2}d^{-1}$, siendo uno de los países con mayor potencial en aprovechamiento de energía solar en el mundo. La irradiación promedio cambia a lo largo de la república y depende también del mes en cuestión, descendiendo ligeramente por debajo de 3 kWh $m^{-2}d^{-1}$, y pudiendo alcanzar valores superiores a 8.5 kWh $m^{-2}d^{-1}$.

Sobre todo para el sector residencial la implementación de un sistema fotovoltaico es la alternativa más empleada para producir su propia energía eléctrica y es incluso económicamente viable para los usuarios a los cuales se les aplique la tarifa DAC (Domestica de Alto Consumo). Para su implementación es necesaria una inversión fuerte, la cual se recupera por la reducción que se refleja en el recibo de luz. Los usuarios que se centran en que el sistema se encuentre en funcionamiento, en el inversor y en los recibos de la compañía eléctrica no tienen una visión completa. La supervisión adicional aporta un valor añadido que le asegura obtener el máximo rendimiento de su sistema. La identificación rápida de problemas o averías puede evitar la pérdida de producción, mientras que las diversas lecturas disponibles ofrecen una óptima descripción detallada de su sistema. Mastervolt cuenta con la solución de supervisión ideal para cada sistema fotovoltaico [Mastervolt, 2016]. Dicha solución permite supervisar el sistema en la red inalámbrica doméstica. Otros sistemas establecen una conexión sobre un servidor de servicios de internet, lo cual informa al usuario sobre el estado de su sistema, aún alejado de su domicilio.

METODOLOGÍA

De los portales Web se pueden recopilar cantidades masivas de datos de generación de energía de todos los días, los datos están disponibles para todas las personas en el servicio de los portales en línea como en [Sunnyportal, 2016]. Sin embargo el análisis de grandes cantidades de datos, que comúnmente se llama también "data mining", puede ser confuso. Los datos extraídos se concentran en una tabla de Excel para aplicar a ellos diversos análisis estadísticos, los cuales se presentan en el siguiente capítulo.

Es de especial interés el parámetro de la productividad específica de una planta solar en kWh generado por kW instalada. Este parámetro nos permite comparar todas las instalaciones entre ellas. Además sobre su variación se puede encontrar la variación anual que tenemos en cada una de las plantas, además de poder visualizar si se encuentra, para algunas regiones del país, el máximo y el mínimo en diferentes meses.

La irradiación presente en los sitios de interés clasificados por su código postal se determinó con el programa RADII de la UNAM y se relaciona con la productividad de cada una de las plantas.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El mercado mexicano para la implementación de sistemas fotovoltaicos, en la actualidad, presenta un crecimiento exponencial, el cual en el 2011 representaba una tasa de crecimiento de 0.099 a^{-1} [Weber, 2012]. En el año 2014 la capacidad instalada se disparó aún más, el último dato reportado por el organismo IRENE es para el 2014, el cual refleja 131 MW instalados [IRENE, 2016]. El mismo comportamiento, con un desfase de aproximadamente un año, es el número de plantas que reportan en el "Sunnyportal" sus datos de producción. La figura 1 muestra el número de plantas que reportan datos de producción en "Sunnyportal" y la capacidad fotovoltaica instalada en México. Se puede observar que a partir del 2012 hasta la segunda parte del 2014 existe un crecimiento exponencial y parece que desde el 2015 se tiene un crecimiento lineal.

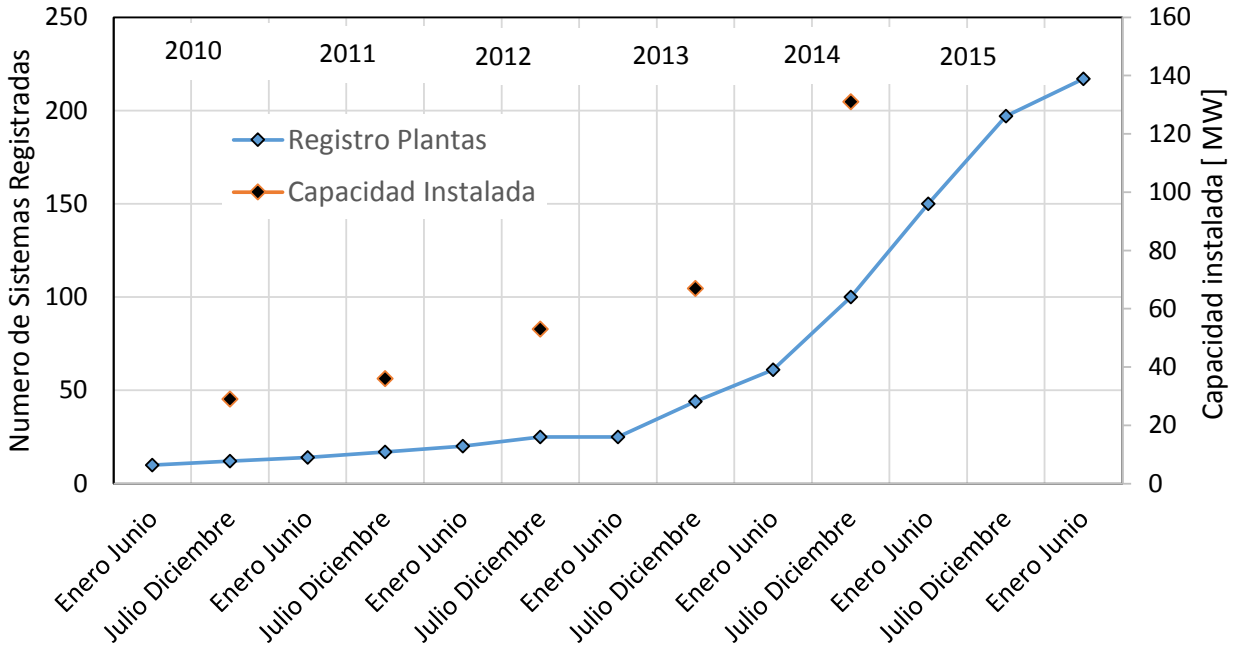


Figura 1: Numero de plantas que reportan datos de producción al Sunnyportal y la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos en México.

Hasta Junio 2016 se tiene acceso a los datos de producción de 297 plantas fotovoltaicos instalados aquí en México. Dichas plantas han entrado en operación en diferentes fechas, en las cuales la operación normal se refiere al reporte periódico de sus datos de producción por lo que se puede identificar una densidad mayor de datos en la Figura 2 para los últimos periodos. Esto quiere decir que se cuenta con más información en los últimos dos años y por tal razón los análisis presentados en las figuras 3, 5 y 6 se refieren al año 2015. Para los análisis estadísticos se pretende aprovechar el máximo de los datos que reporta el sistema, eso con fines de contar con una mayor confidencia de la productividad especifica debido a que el intervalo de confidencia decrece con un mayor número de datos. Por el otro lado se debe de descartar plantas que presentan menos de un año de datos registrados. En resumen de los 297 plantas el 60% cuenta con un año o más de registro, el 23% cuenta con 2 o más años de registro, el 7% cuenta con tres o más años de registro y solo el 4% cuenta con 4 o más años de registro.

Además la Figura 2, formada con los datos crudos, nos permite detectar algunos datos extraños que son, por ejemplo, la producción de la planta color café con una producción específica menor de 52 kWh kW^{-1} mes^{-1}, al consultar esta planta en "Sunnyportal" podemos darnos cuenta que se trata de una fachada de paneles fotovoltaicos, la cual está orientada de manera inadecuada, esto tiene como consecuencia una productividad menor. Otro ejemplo es la planta que presenta una productividad mayor a los 252 kWh kW^{-1} mes^{-1} en los meses 30 y 40, en este caso se trata de una planta con seguidor instalado, lo que permite el mejor aprovechamiento del sistema, generando una mayor tasa de

captación. Se supone algún dato erróneo para esta última planta, también con una producción superior a los 252 kWh kW^{-1}, entre el mes 20 y el mes 30, pues esta va anticipada por una producción mucho menor en el mes anterior, esto podría derivarse de algún cambio en la fecha del sistema. De acuerdo a las últimas observaciones descritas se debe de concluir que el análisis de datos subsecuentes no es libre de errores, sin embargo, debido al gran número de datos con los que se trabaja, se tiene la capacidad de describir la situación real de los sistemas fotovoltaicos operando en territorio Mexicano.

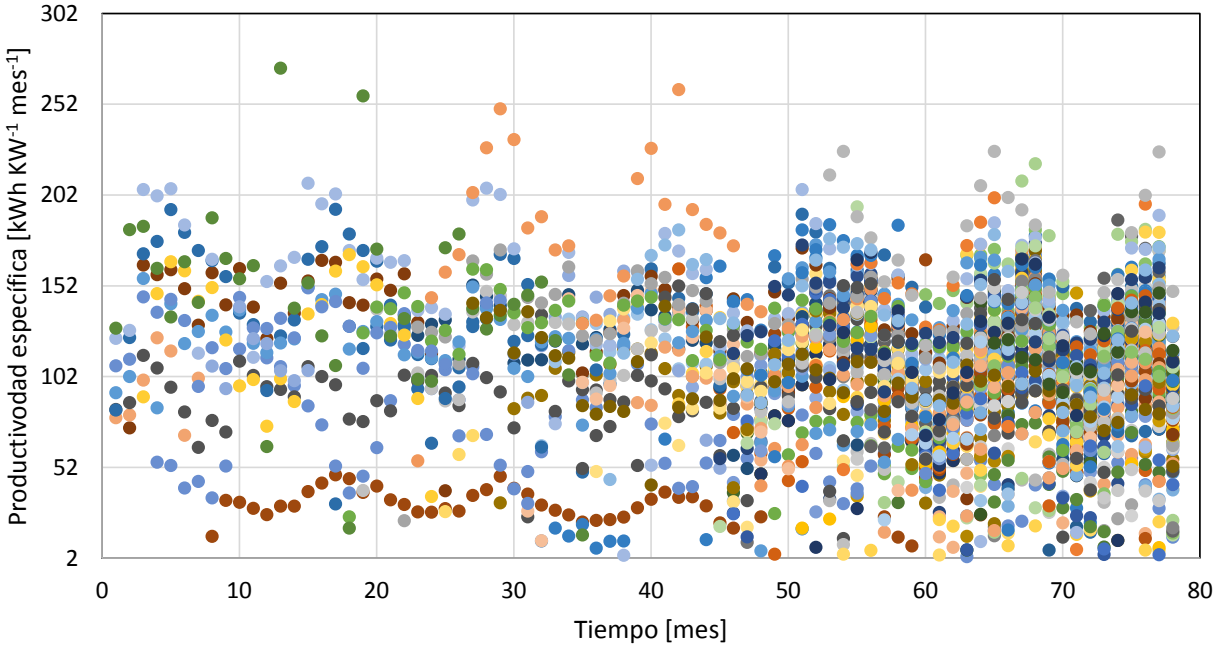


Figura 2: Datos crudos de las 2010 plantas registradas en el Sistema

Tomar en cuenta todos los valores obtenidos en la relación de los datos crudos y sacar un promedio junto la desviación estándar respectiva nos dará una idea acerca del rendimiento que tendrá una planta fotovoltaica, en promedio. El diagrama de los percentiles arroja mayor información acerca de las plantas que presentan una producción específica mayor a un valor escogido sobre el eje x. Se puede ver que existe una probabilidad muy alta de que la planta logra tener una productividad específica mayor a 90 kWh kW^{-1} mes^{-1}, sin embargo existe poca probabilidad de que su producción específica sea mayor a 120 kWh kW^{-1} mes^{-1}, ya que esto representa sólo el 18% de los casos, aproximadamente.

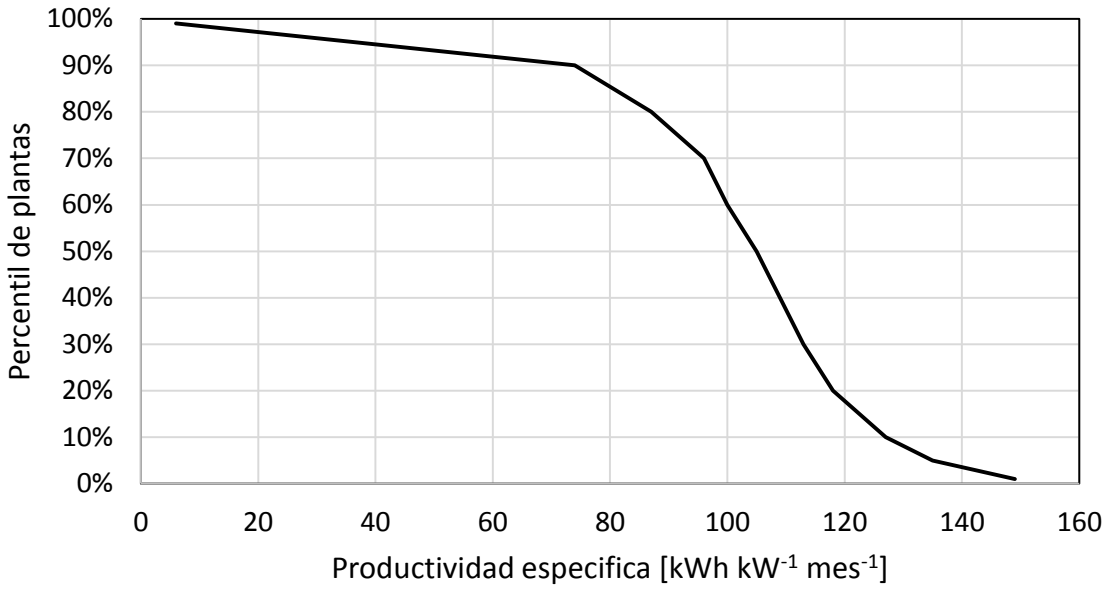


Figura 3: Percentil de plantas con productividad mayor a la especificada

La información que nos proporciona la Figura 3 no es para resignarse ante la situación actual, por el contrario, es un llamado a buscar más información en los datos crudos, y plantear preguntas como la siguiente: ¿Cuáles son los factores que rigen el desempeño de un sistema fotovoltaico? Sin duda en primer lugar está la irradiación presente en el sitio, pero no se deben de menospreciar los demás factores climáticos que influyen en la reducción de la eficiencia de los paneles, como lo son temperaturas elevadas o el depósito de polvo sobre el vidrio protector [Weber, 2013].

Por estos efectos secundarios la Figura 4 muestra la producción específica en diversos estados en la República Mexicana, no logra subrayar el factor de la irradiación, sin embargo esta sí varía entre los estados. Si el impacto de la irradiación se reflejara en la productividad especifica se presentaría un rendimiento mayor en la figura para el estado de Coahuila. Es importante mencionar que el número de plantas registradas en "Sunnyportal" tiene una gran variación entre los diferentes estados, lo que podría provocar distorsiones en los valores.

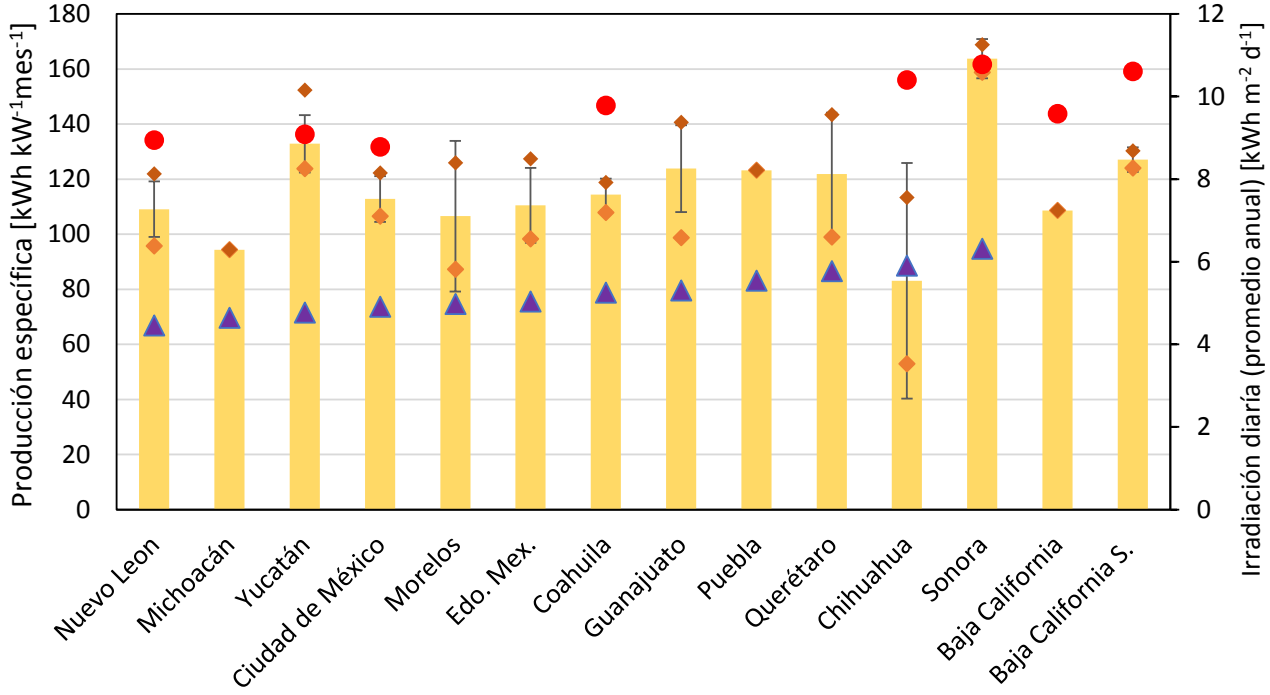


Figura 4: Producción específica en los estados de la república (las barras de error indican la desviación estándar y los diamantes el valor mínimo y máximo registrado), los triángulos corresponden a la irradiación diaria (registro del sitio según RADII) y la producción esperado según de Sunny Design Web (Circulos rójos) para una planta de 5 kWp con un Inversor SB 5000US 240VAC y con 20 paneles Solarworld California SW250 poly/pro

La Figura 5 muestra la relación de la productividad específica en función de la potencia instalada. En primer orden uno podría pensar que conforme más grande sea la potencia instalada se empleará mejor ingeniería, mejor equipo y se contará con un mejor mantenimiento, pero observamos un comportamiento contrario. Los autores contribuyen esa situación a factores técnicos, de ingeniería y también ambientales. Técnicamente, debido a las extensiones de la planta, se conecta el sistema con líneas más largas de corriente alterna provocando una mayor pérdida interna. Además, debido a que las capacidades de inversores disponibles en el mercado, las cuales se rigen mediante un escalamiento geométrico, es más probable, en comparación a plantas pequeñas, que no se logre tener el número óptimo de módulos solares en línea. Por último, como factor ambiental, se puede suponer que conforme más grande sea la extensión del conjunto de los módulos solares, más probabilidad habrá de un sombramiento parcial. Cabe mencionar que la línea de tendencia en la Figura 5 tiene un R^2 de sólo 0.00002, lo que es una correlación sin valor estadístico. Como información adicional la gráfica nos muestra la densidad de plantas sobre el intervalo de potencia y la mayoría de las plantas instaladas tiene una potencia menor de 10 kW.

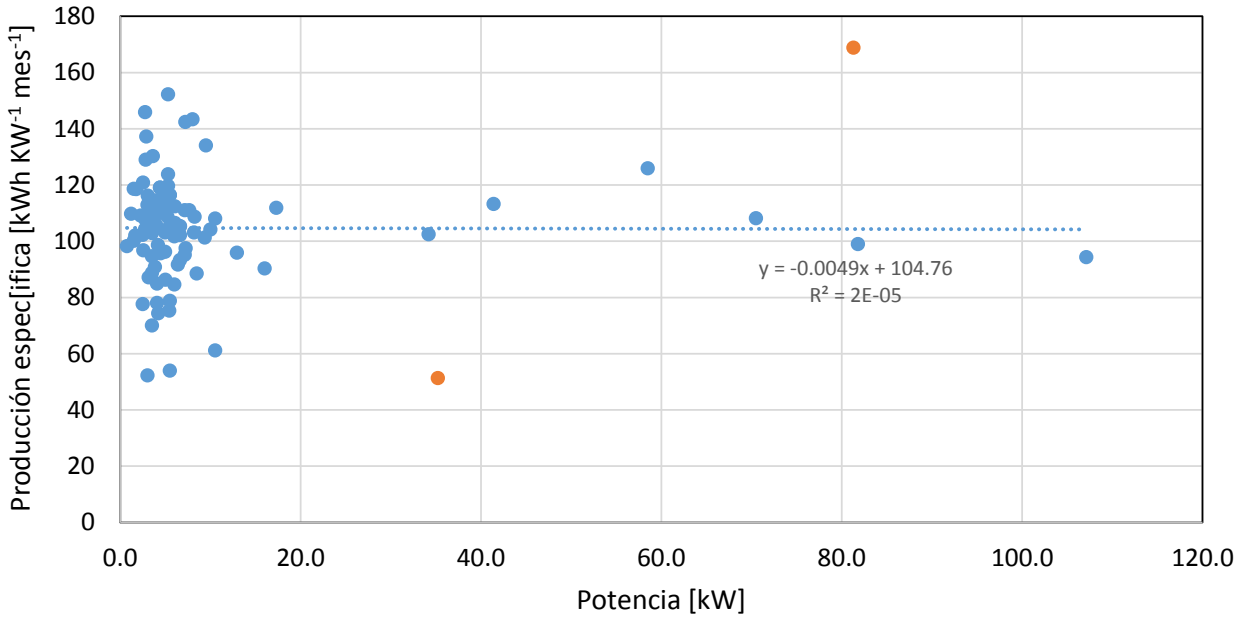


Figura 5: Producción especifica en relación con la potencia instalada (Los puntos de color café indican las plantas que tiene el sistema fotovoltaico integrada en la fachada y un sistema de seguimiento y por tal razón no consideradas en la estadística)

En la Figura 6 se filtró la productividad según de la irradiación anual presente en el sitio, y sorprendentemente se ve que tenemos un incremento muy leve de la productividad especifica con una irradiación anual presente en el sitio. A raíz de eso se debe de considerar que hay más factores a parte de la irradiación que reciben los paneles que finalmente definen el desempeño de plantas fotovoltaicas. Por lo menos para plantas de mayor tamaño se justifica la inversión de un análisis de desempeño por expertos y obtener una mejora por obtener una lista de sugerencias que resultarían en una mejora. La implementación de sistemas de seguimiento, limpieza de los módulos fotovoltaicos, así como sensores de temperatura, sensores para detectar fallas al interior de los módulos fotovoltaicos, o en las conexiones, que afecten el rendimiento de los mismos serían de gran ayuda para corregir posibles problemas a la brevedad, lo que resultaría en pérdidas menores de generación de energía. La mayoría de estos equipos se encuentran disponibles en territorio mexicano, y son de fácil instalación. La inversión para estos equipos se justifica en los estados para los que tenemos mayores valores de irradiación, sin embargo, al disminuir las pérdidas de generación resulta también redituable su implementación en estados con menores valores de irradiación, pues, como se mencionó el principio de este escrito, las características de localización geográfica del país resultan ideales para el aprovechamiento de la energía solar.

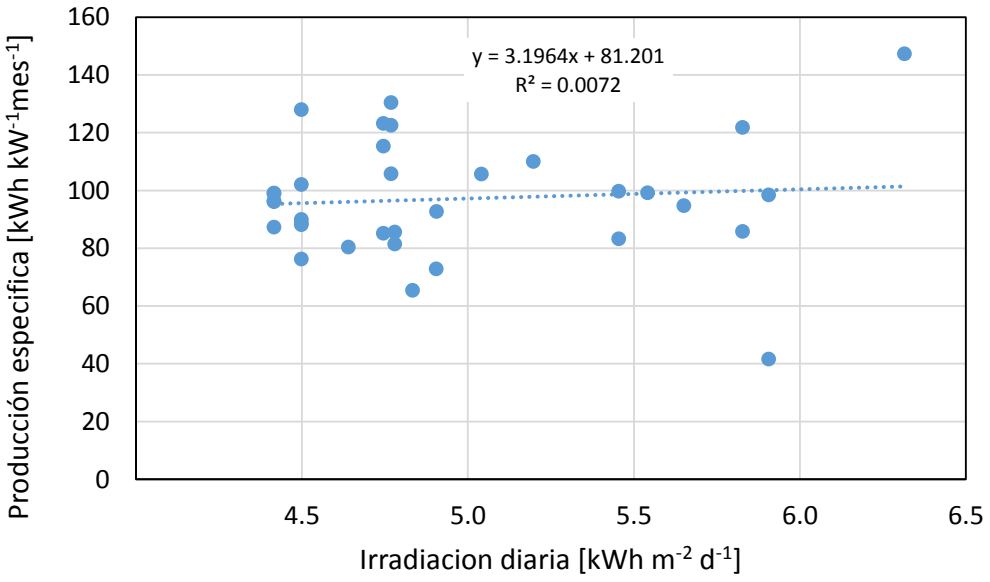


Figura 6: Producción especifica en relación con la irradiación diaria presente estimada con el programa RADI en el sitio del sistema fotovoltaico

CONCLUSIONES

La monitorización del autoconsumo, como se menciona en "Sunnyportal", es básica para que las plantas solares puedan estar en los flujos de energía tanto desde el punto de vista de consumo como de generación fotovoltaica. De esta forma el usuario puede pensar en la mejor forma de aprovechar la energía fotovoltaica desplazando ciertos consumos para que se produzcan durante la generación.

El análisis estadístico de este estudio muestra claramente que la aportación de la irradiación solar presente está sobreestimada sobre otros factores como son tecnológicos, de ingeniería y climatológicos. A raíz de esto no se aprovecha la energía ofrecida de manera óptima. Un camino para la mejora es la educación con fines de formar ingenieros con buenos conocimientos acerca de los sistemas fotovoltaicos y de esa manera mermar la falta de productividad, que va contribuida por ingeniería aplicada inadecuadamente.

REFERENCIAS

Mastervolt (2016), www.ecoenergycorporation.com/#!monitoreo/cba7.

IRENE (2016) International Renewable Energy Agency, http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=MEX.

Messina, S.; Hernández Rosales, Paz; Saldaña Durán, C. E.; Quiñones, J.; Nair, P.K. (2014) Comparative Study of System Performance of Two 2.4 kW Grid-connected PV Installations in Tepic-Nayarit and Temixco-Morelos in México. Energy Procedia doi:10.1016/j.egypro.2014.10.020.

Sun Edison. 2016. Obtaining Accurate Energy Harvest Estimations from SunEdison Modules Using PVSyst v6.23 Solar Simulator. Disponible en: http://www.sunedison.com/sites/default/files/file-uploads/solar-material-resource/SE_PVSyst_Tech_Note_0.pdf.

Sunny home manager. Reinventando el autoconsumo, http://www.sma.de/en/products/monitoring-control/sunny-home-manager.html.

Sunny portal SMA, 2016. Energy that changes. SMA Smart home. Direct data exchange with Sunny Portal and Sunny Places. Disponible en: http://www.sma.de/en/products/monitoring-control/webconnect.html.

Weber, B.; Stadlbauer, E.A.; Chávez, G; Durán, M.D. (2010) El transporte eléctrico como motor en la implementación de sistemas fotovoltaicos residenciales. Presentación en la XXXV Semana Nacional de Energía Solar, 4 de Octubre, Cuernavaca, Morelos.

Weber, B.; Quiñones, A.; Almanza, R.; Durán, M. D. (2014) Performance Reduction of PV Systems by Dust Deposition. Energy Procedia (57) 99-108, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.013, (ISSN: 1876-6102).

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO ISLA E INTERCONECTADO A LA RED.

García Fernández Jhoany y Zúñiga Álvarez Aldo Zaúl
Energías renovables, Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Av. La Palma No. 125 Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, C.P. 76800, México,
Tel. (427) 129 20 00, Ext. 269, **jhoanygf@gmail.com.**

Marroquín de Jesús Ángel
Energías renovables, Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Av. La Palma No. 125 Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, C.P. 76800, México,
Tel. (427) 129 20 00, Ext. 269, **a_marroquin2003@yahoo.com.mx.**

RESUMEN
En el presente trabajo se muestra el desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en la modalidad tipo isla e interconectado a la red, para el caso de los sistemas tipo isla se considera la potencia de la carga instalada, el tiempo de utilización de los equipos. Para el caso del sistema interconectado a la red se ha utilizado la información que proporciona el recibo por concepto de energía eléctrica que envía la Comisión Federal de Electricidad a los usuarios en tarifa doméstica de alto consumo (DAC), se realiza el análisis técnico-financiero, la herramienta computacional, proporciona la cantidad de paneles, inversor, controladores de carga, baterías, una vez que los componentes han sido dimensionados e instalados, se evalúa la calidad de la energía y los resultados se evalúan de conformidad con la especificación CFE-G0100-04. La herramienta contribuya al proceso de enseñanza aprendizaje de los sistemas fotovoltaicos para los estudiantes de la carrera de energía renovable de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río.

ABSTRACT
In this paper the development of a computational tool shown for sizing photovoltaic systems on the island type mode and interconnected to the network, in the case of the standard systems island is considered the power of the installed load, time of use of the teams. For the interconnected system to the network has been used the information provided by the receipt concept of power that sends the Federal Commission of Electricity users in domestic rate guzzling (DAC) , the analysis is performed technical and financial the computational tool provides the number of panels , inverter , charge controllers , batteries, once the components have been sized and installed , the power quality and the results are evaluated in accordance with the specification is evaluated CFE- G0100 -04 . The tool contributes to the process of learning of photovoltaic systems for students studying renewable energy at the Universidad Tecnológica de San Juan Del Río..

1. INTRODUCCIÓN
Para la región de América Central, las tecnologías de energía renovable a pequeña escala presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a comunidades rurales remotas y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente.
Adicionalmente, estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales, que utilizan combustibles fósiles, como el carbón y productos derivados del petróleo. Estos gases contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global de nuestro planeta.
Sin embargo, existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de energía: la falta de conocimiento de las tecnologías y las capacidades institucional y técnica aún incipientes. (FOCER, 2002).
San Juan del Río se ubica en las coordenadas 20°23′ N, 99°59′ W, con una altitud de 1920 msnm, una precipitación anual promedio de 450 mm a 630 mm. Se considera que tiene un clima semi seco templado con temperaturas medias anuales entre 16 °C a 18 °C.
Potencial anual de energía solar en San Juan del Río, Qro. (Wikipedia , 2016) (GeoHack, s.f.)

2. ANTECEDENTES
Actualmente es posible encontrar aplicaciones para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en la modalidad tipo isla e interconectado a la red, algunas en forma de software libre, con los inconvenientes de que han sido desarrollados por programadores de

otros países tales como Alemania, España y Estados Unidos entre otros. Para dimensionar un sistema fotovoltaico en la modalidad tipo isla, es decir que no está interconectado a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad para el caso de nuestro país, se hace necesario el listado de cargas que se van a conectar, es decir el dato de la potencia en Watts, el voltaje, y el número de horas que estará en funcionamiento. Como datos adicionales se requieren las horas pico de sol en el lugar de la instalación, la latitud y longitud del hogar, los valores de la radiación solar en el sitio de instalación. (Tonda, 2003) (Valentin Software , 2015)

3. ¿QUÉ ES UNA TARIFA DAC?

Esta tarifa se aplica cuando el consumo bimestral promedio registrado en los últimos 12 meses es superior de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1 Tarifa DAC

Tarifa	Límite para ingresar a tarifa de alto consumo
1	500 kWh/ bimestre
1ª	600 kWh/ bimestre
1B	800 kWh/ bimestre
1C	1,700 kWh/ bimestre
1D	2,000 kWh/ bimestre
1E	4,000 kWh/ bimestre
F	5,000 kWh/ bimestre

(CFE, 2012)

4. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de la aplicación es poner a disposición de los estudiantes un conocimiento básico acerca de los fundamentos de la tecnología fotovoltaica a través de un enfoque práctico del tema, desarrollando únicamente los puntos más relevantes del aspecto teórico. De este modo, el alumno será capaz de dimensionar, instalar, inspeccionar sistemas fotovoltaicos. Por último, aprenderá a realizar mediciones y a detectar errores en el sistema.

5. OBJETIVO ESPECIFICO

Un prototipo de una herramienta electrónica para instalación de sistemas fotovoltaicos y que sea funcional para:

- Investigación aplicada y servicios tecnológicos al sector productivo.
- Un informe técnico detallado de la programación y caracterización.
- Un manual de operación del prototipo.
- Un trabajo de divulgación.

Todo esto fortalecerá de manera integral al cuerpo académico de Energías Renovables de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río.

6. DESARROLLO

6.1 Análisis De La Carga

El análisis de las cargas eléctricas es el primer paso y el más importante en el dimensionado de lo sistemas fotovoltaicos; el consumo de la energía y la demanda de potencia dicta la cantidad de electricidad que se debe producir.

Se debe considerar todas las cargas existentes y futuras cargas potenciales, una baja estimación de las cargas da como resultado un sistema que es demasiado pequeño y que no puede operar las cargas con la confiabilidad que es requerida, pero por otra parte, una sobre estimación de la carga da como resultado un sistema grande, que resulta de mayor costo que el necesario.

Si el perfil de la carga no es muy parecido para todo el año, conviene que se haga el análisis de la carga cada mes. Las cargas semejantes se pueden agrupar por categorías, tal es el caso de las luminarias con los mismos requerimientos de potencia.

6.1.1 Consumo De Energía. El consumo de energía eléctrica está basado en la demanda de potencia durante un cierto periodo de tiempo. Las cargas raramente operan en forma continua, de modo que se debe determinar el tiempo de operación de cada carga.

El tiempo de operación para cargas que tienen ciclos de operación Dentro-Fuera (ON-OFF) en forma automática está determinado en forma típica por su ciclo de trabajo, que representa el porcentaje de tiempo que una carga está en operación. Aun cuando las cargas estén conectadas todo el tiempo, como es el caso de los refrigeradores y los equipos de aire acondicionado, que tienen un requerimiento variable de potencia basado en su ciclo de trabajo.

Las cargas operadas manualmente por el usuario se conectan y desconectan manualmente, la determinación del tiempo de operación de estas es relativamente sencillo si solo operan una vez al día; sin embargo, cuando se conectan y desconectan varias veces al día, probablemente la mejor forma de determinar el ciclo de trabajo es midiendo con un aparato.

El consumo de energía diario para cada carga se determina por la demanda de potencia multiplicada por el tiempo de operación diario.

6.2 Selección Del Inversor

Cuando el sistema incluye cargas en C.A. se debe seleccionar un inversor, por lo que se consideran varios factores cuando se selecciona. En primer lugar, el inversor debe tener una potencia continua máxima a la salida de al menos la demanda total en C.A., generalmente se recomienda un inversor ligeramente sobre dimensionado para tomar en consideración futuras adiciones de carga.

El inversor también debe ser capaz de suministrar corrientes de arranque a las cargas de motores, como es el caso de bombas y compresores, cualquier carga con demanda de corrientes de arranque, se le debe estimar o medir para asegurar que el inversor seleccionado sea capaz de suministrar estas corrientes mientras alimenta a otras cargas del sistema. El voltaje de salida es otra

consideración, la mayoría de los inversores operando instalados producen ya sea 120v para sistemas monofásicos o 120/240v para salida con fase dividida o tap.

6.2.1 Eficiencia Del Inversor. Los inversores no tienen una eficiencia del 100%, se pierde alguna potencia en el proceso de convertir energía de C.D. en energía de C.A., por lo tanto, se requiere de más energía en C.D. para producir una cantidad de energía en C.A. Los requerimientos de demanda de energía en C.A. y C.D. se usan para determinar la cantidad total de energía en C.D. requerida.

7. METODOLOGÍA CIENTIFICA

Es posible desarrollar una herramienta de dispositivos móviles para dimensionar un sistema fotovoltaico para producción de energía eléctrica, para abastecer las necesidades de una vivienda ubicada en zonas rurales de nuestro país, considerando la carga en Watts a instalar, los valores de radiación solar, la longitud y latitud del lugar, que permita medir la energía producida, así como las toneladas de CO2 que se dejaran de emitir a la atmósfera, modificando los ángulos de inclinación de los paneles fotovoltaicos y seleccionar los componentes para su posterior cotización. (International Energy Agency, 2015).

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 Diseño De La Aplicación

1. Contiene una breve introducción y un navigation drawer activity (menú lateral).

Fig. 1 Inicio de aplicación

2. Contiene dos botones el cual manda al método de recibo de luz y manualmente.

Fig. 2 Pantalla de método de calculo

3. Contiene información necesaria para que el usuario sepa cómo utilizar la APP.

Fig. 3 Pantalla de ayuda

4. Contiene un EditText en el cual se introduce el consumo en “KWh” y tres botones dependiendo del tipo de modulo

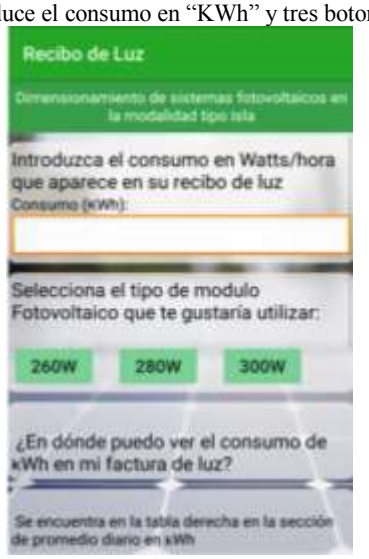


Fig. 4 Pantalla método de recibo de luz

5. Contiene un tab (pestañas) Para introducir elementos de CA y CD

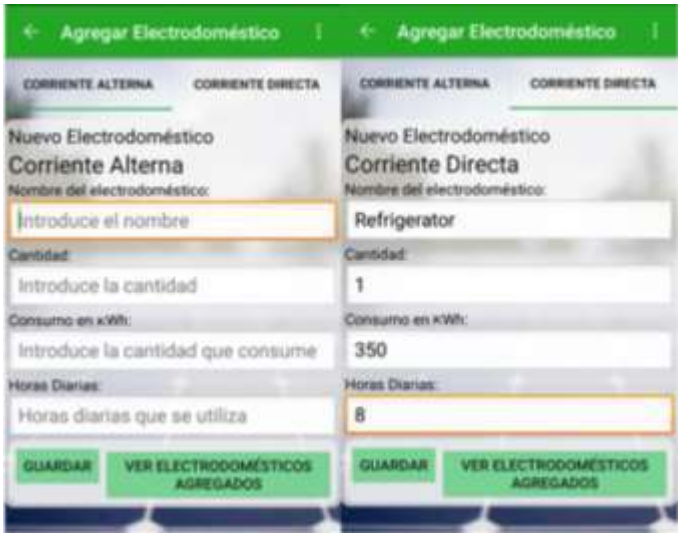


Fig. 5 Pantalla método manual

5.1. Contiene dos ListView en la cual se muestran los elementos agregados de CA y CD

Fig. 6 Pantalla de listado

5.2. En esta pantalla puedes modificar los registros que has guardado

Fig. 7 Pantalla de modificar

6. Esta pantalla muestra las especificaciones del sistema que necesita y contiene tres botones: Generar pdf, enviar pdf y regresar. (Trejo Guerrero & Flores Ruíz, 2016)

Fig. 8 Pantalla generadora de cotizaciones

9. CONCLUSIONES

Hoy en día son muchas las aplicaciones que facilitan el trabajo de cálculo para todo tipo de instalaciones fotovoltaicas, introducimos los datos, pulsamos un botón y, listo, ya tenemos nuestra instalación calculada es por eso que esta aplicación será muy útil para todos aquellos que deseen hacer el dimensionamiento de su sistema fotovoltaico Ya que este tipo de software pretende hacer de los cálculos una tarea más fácil se buscará que sea de dominio público subiéndola en PLAYSTORE pretendiendo dotar de conocimientos a las personas que la aplicación como también fomentar el uso de una instalación fotovoltaica pues los sistemas son sencillos y de fácil instalación.

Nuestro principal objetivo fue la reducción de costos a los acreedores de tarifas DAC ya que se podría considerar el mejor ramo para disminución en su consumo y en el mejor de los casos ser completamente sustentables de CFE ya que sus consumos energéticos representan un gran gasto económico que las pequeñas empresas pueden reprimir de forma fácil y eficiente ; todo el esfuerzo para el presente proyecto se verá reflejado en el buen funcionamiento de la aplicación y el nuevo campo que se busca abrir para las energías renovables para crear conciencia y demostrar que no es solamente una moda pasajera si no que es un camino hacia el futuro de la generación de la energía.

10. REFERENCIAS

- Arivilca, M. S. (2010). Manual técnico para instalaciones domiciliarias.
- CFE. (15 de septiembre de 2012). CFE. Obtenido de http://www.cfe.gob.mx/casa/4_Informacionalcliente/Paginas/Tarifa-DAC.aspx
- FOCER. (septiembre de 2002). Manuales sobre energía renovable. San José, Costa Rica.
- GeoHack. (s.f.). GeoHack. Obtenido de San Juan del Río: http://tools.wmflabs.org/geohack/geohack.php?language=es&pagename=San_Juan_del_R%C3%ADo_(Quer%C3%A9taro)&params=20.388888888889_N_-99.996388888889_E_type:city
- International Energy Agency. (2015). Energy and Climate Change. Francia: Graphic Obsession.
- Sitiosolar.com. (s.f.). Obtenido de Portal de energías renovables: http://www.sitiosolar.com/la-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica/
- Tonda, J. (2003). El Oro solar y las Fuentes de Energía. México: FCE.
- Trejo Guerrero, C., & Flores Ruíz, D. (26 de junio de 2016). FOTO-VOLT. San Juan del Río, Querétaro, México.
- Valentin Software. (2015). Valentin Software. Obtenido de Energía fotovoltaica: http://www.valentin-software.com/
- Wikipedia. (22 de mayo de 2016). Wikipedia. Obtenido de San Juan del Río: https://es.wikipedia.org/wiki/San_Juan_del_R%C3%ADo_(Quer%C3%A9taro)

EFECTO DEL SOMBREADO EN CELDAS Y MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO

Autor: José Luis Zaratustra Ramírez Cruz.

Instituto de Energías Renovables (IER), Xochicalco, Azteca, 62588 México, Temixco, Mor.

Tel: 777 362 0090, Correo electrónico: jolzar@ier.unam.mx

RESUMEN

En este artículo se reporta el efecto del sombreado controlado sobre un módulo de silicio cristalino de 36 celdas de 145 W para poder predecir el rendimiento en la salida de los parámetros eléctricos de las celdas cuando se sombrea con un objeto un módulo en una cadena eléctrica de módulos. Esta investigación es para poder saber cuantitativamente la perdida por sombra en los módulos, puesto que por lo regular se estiman valores de potencia que entrega la cadena pero no se consideran aspectos como el sombreado, las nubes, polvo, etc… Este trabajo tiene por objetivo conocer el rendimiento por sombreado controlado para saber si un módulo en cuanto a su sombra tiene muchas o pocas perdidas de potencia.

ABSTRACT

This article reports the effect of shading on a crystalline silicon module (36 cells) to predict performance at the output of the electrical parameters of the cells when an object is shaded with a module in an electric chain modules. This research is to know quantitatively the shadow efect in the modules, the values of power delivered don´t consider aspects such as shading, clouds, dust, etc … This work has the objective to know the performance by controlled shading, if a module in the shadow has many or few power losses.

1. Antecedentes

La energía solar empleada para el uso eléctrico se ha utilizado en forma aislada en lugares donde no hay una red eléctrica y se ocupa por lo regular un banco de baterías para poder entregar energía en la noche a los usuarios, por otro lado la energía interconectada a la red se usa para lugares donde se ofrece el servicio eléctrico.

Las instalaciones eléctricas fotovoltaicas tienen perdidas, es decir, no siempre la energía de potencia máxima que dice por parte del fabricante entregará lo establecido en su hoja o placa de datos. Estas limitantes tienen muchas variantes debido a que los valores de la energía por parte del sol están cambiando constantemente, esto siempre ha sido muy difícil de poder saber en que momento el cielo nos va a entregar la luz del sol mayor tiempo, es decir, cuando los cambios climáticos no son muy fuertes. En tales casos donde la energía por parte del sol es atenuada debido a los cambios de clima, es cuando los módulos fotovoltaicos entregaran muy difícilmente los valores máximos que en la placa de datos dice que van a ser inyectados a la instalación eléctrica. En estos cambios climáticos además de variar la luz de sol, también hay cambios en la temperatura estos cambios influyen en los valores eléctricos y sobretodo en la potencia que suministrara el modulo fotovoltaico, estos cambios en los parámetros eléctricos afectaran en relación a la energía que inyectan los módulos fotovoltaicos a la red o a las cargas eléctricas dependiendo del tipo de instalación fotovoltaica.

Un factor importante que también hay que considerar es la sombra que llega a un módulo fotovoltaico por cualquier objeto cercano a la instalación fotovoltaica, por ejemplo: una casa, un árbol, una chimenea, una torre, etc… Este detalle también es importante considerar en el rendimiento de la instalación puesto que afectará a los valores eléctricos que por parte del fabricante son los que van a ser útiles para el suministro eléctrico. Este detalle que se suscita puede variar a lo largo del año debido a que el sol está moviéndose durante el día y por cada mes del año, este es una particularidad importante que se tiene que considerar cuando se tiene pensado instalar una cadena de módulos en cualquier lugar determinado. En este artículo vamos a hablar de este detalle cuando se presenta una sombra y vamos a hablar de un módulo de 36 celdas de 145 W, donde mencionaremos que tanto es la pérdida del módulo en cuestión del tamaño de la sombra.

Otro factor que influye en el rendimiento de la instalación son las pérdidas en el cableado y por los dispositivos electrónicos que se ocupan, por ejemplo: regulador de baterías, inversor. Este detalle es importante de considerar para la evaluación de un sistema eléctrico fotovoltaico además de los ya antes mencionados en los párrafos anteriores, además de ser considerados significativamente para el dimensionamiento, van a afectar en la producción de energía que va a entregar la cadena de módulos.

2. Curva I-V.

Una de las características principales que mejor describen un módulo fotovoltaico es la relación corriente- voltaje (I-V). Es necesario entender como la radiación solar, la temperatura de las celdas y las cargas eléctricas afectan el comportamiento de la curva I-V. De este conocimiento depende el buen diseño, instalación y evaluación de sistemas fotovoltaicos y sus diferentes aplicaciones.

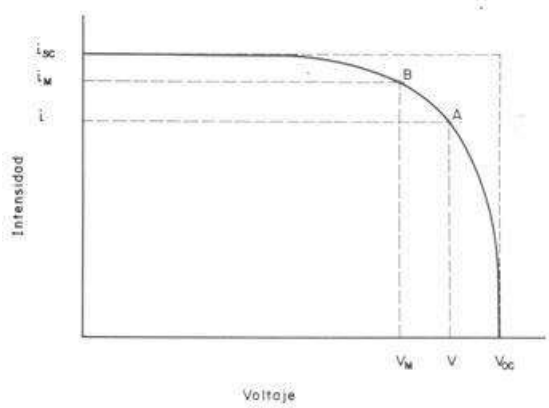


Figura 1. Curva I-V.

3. Descripción del estudio.

Para poder evaluar el sombreado se observa que una sombra tiene cualquier forma y distintos tamaños que es muy difícil saber qué forma y tamaño va a estar incidiendo en el módulo fotovoltaico, es por ello que se hace un sombreado controlado, es decir, se sombrea el módulo de tal modo que podamos saber el rendimiento del módulo en proporción al número de celdas, en celdas individuales, en dimensión al área sombreada, etc..

El modulo tiene 36 celdas y el fabricante le asigna 2 diodos de paso que evitan la corriente de retorno a las celdas solares que causen un aumento de temperatura. Las 36 celdas se dividen en 18 celdas para cada diodo.

Los sombreados controlados se fraccionaron en estos 2 grupos debido a los resultados del módulo que se presentan cuando se efectúan los sombreados.

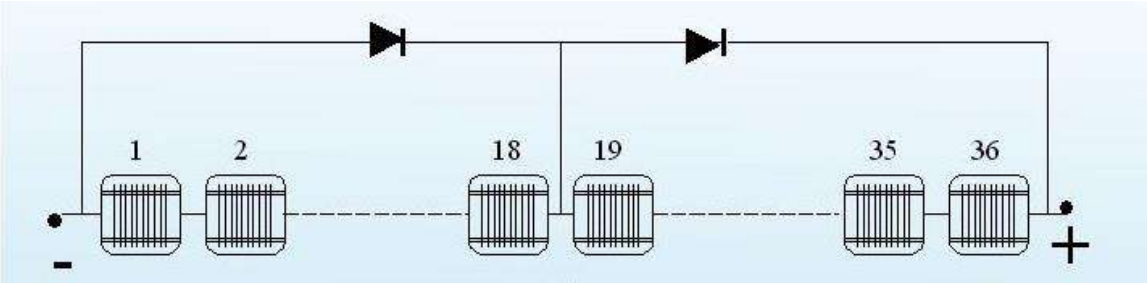


Figura 2. Asignación de los diodos de paso en las 36 celdas del módulo fotovoltaicos.

A causa de los valores de salida por parte del módulo fotovoltaico como ya mencionamos antes, se dividió en 2 grupos las celdas solares, y voy a describir los comportamientos que se adquirieron en cada una de las mediciones.

El modulo sin sombra muestra el siguiente comportamiento:

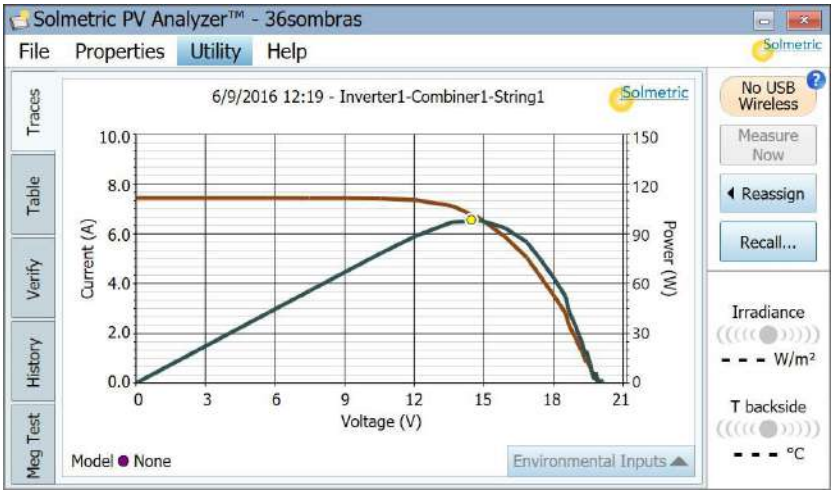


Figura 3. Modulo sin sombra a 862.4 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 59.4 °C.

Se tapó el modulo a 1/4 de sombra para una sola celda y se tuvo el siguiente comportamiento:

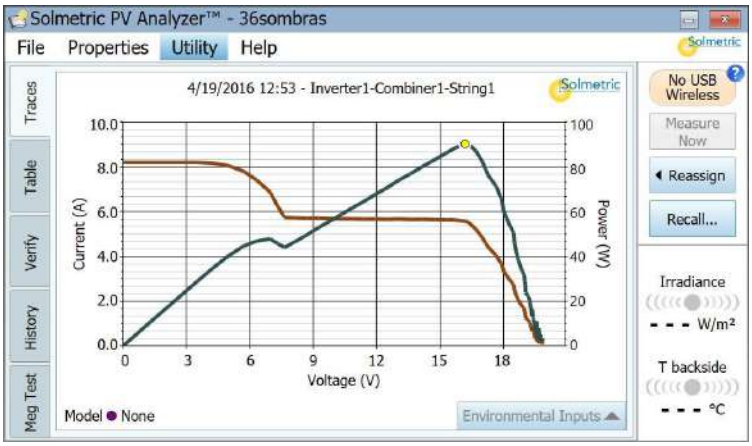


Figura 4. Modulo a 1/4 de sombra a una Irradiancia de 962.5 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 63.3 °C.

Después se mostrará la salida del módulo con un sombreado controlado a la mitad de la celda.

Figura 5. Mitad de una celda del módulo de 36 celdas a una 952.3 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 65 °C.

Y por último se muestra la curva con una sombra controlada de 3/4 para una sola celda.

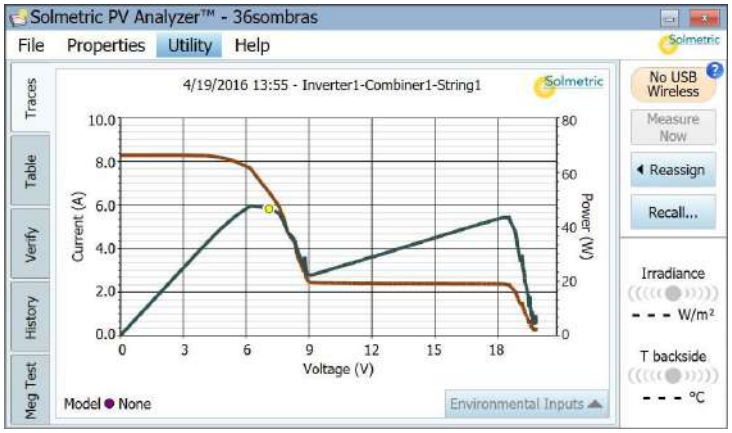


Figura 6. Curva I-V para una sombra de 3/4 para una sola celda 971.6 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 62.7 °C.

Y por último se muestra la sombra completa de una sola celda.

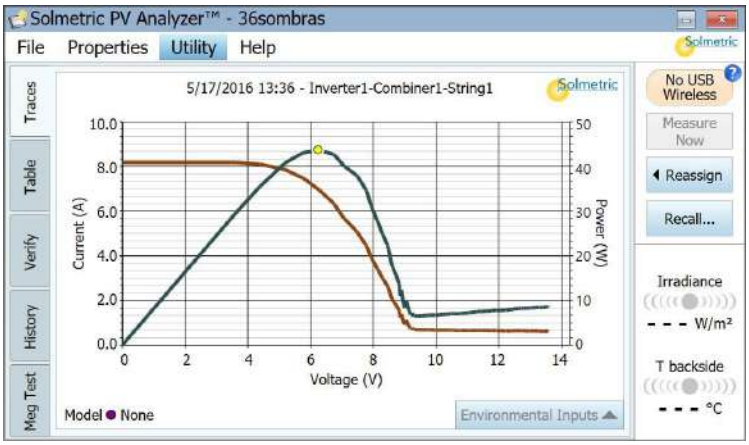


Figura 7. Curva para una sola celda con una sombra completa a una Irradiancia de 958.6$\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 66.1 °C.

Ahora si tapamos el módulo 2 celdas por fila de una sola sección en general el resultado que se obtiene en la curva I-V es el siguiente:

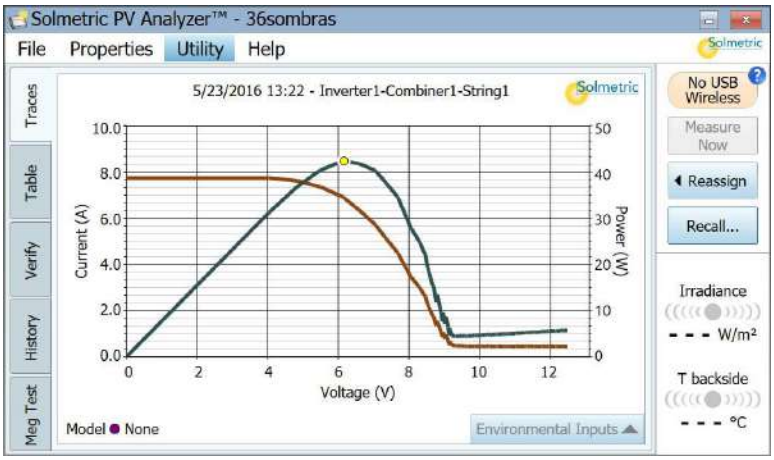


Figura 8. Curva de 2 celdas solares por fila de un módulo de 36 celdas a una irradiancia de 877.6 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 63.8 °C.

La curva anterior se presenta en todas las filas tapadas para una sola sección de las 36 celdas solares y es el mismo resultado para un sombreado controlado de una sola celda, **figura 7**.

Por último se sombrea en las 18 celdas, 2 celdas por columna, el resultado que se midió es el siguiente:

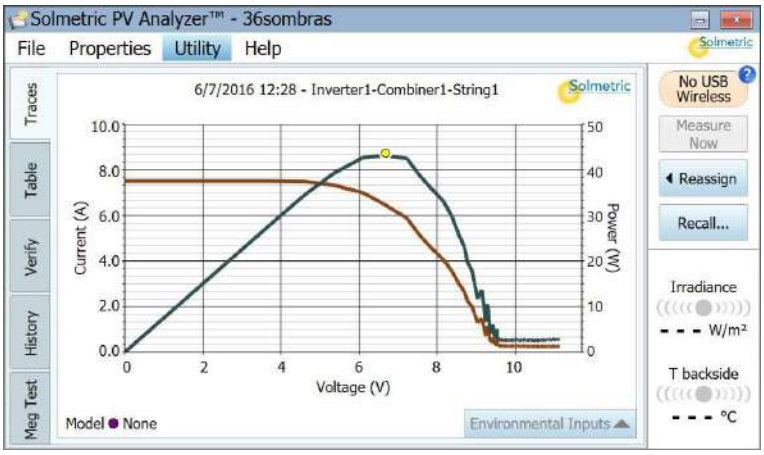


Figura 9. Curva I-V de la sombra efectuada para 2 celdas solares por cada columna del módulo fotovoltaico en una sola sección a una irradiancia de 863.2 $\frac{W^2}{m}$ a una temperatura de 55.5 °C.

Si sombreamos una celda completa de un solo cuadrante o toda la zona de 18 celdas, con una sola sombra completa en la segunda zona de 18 celdas para el módulo de 36 celdas, se tiene la siguiente gráfica:

Figura 10. Comportamiento de los parámetros eléctricos si se sombrea una sola celda o toda una sección de las 18 celdas, con una sombra completa para la sección 2 de las 18 celdas, la gráfica tiene una irradiancia de 953.6 $\frac{W^2}{m}$ y 57.2 °C.

Se puede ver en la **figura 10** que cuando se sombrea dos celdas por cada sector de las 18 celdas solares se puede decir que las pérdidas en el módulo son muy altas y se está generando alrededor del 2% de lo que genera el módulo de 36 celdas. Esta producción de potencia se puede estimar demasiado pequeña para lo que está destinado un módulo.

Cuando sombreamos la segunda sección de 18 celdas a 3/4, 1/2, 1/4, y sombreamos toda la primera sección de 18 celdas se tienen las siguientes graficas:

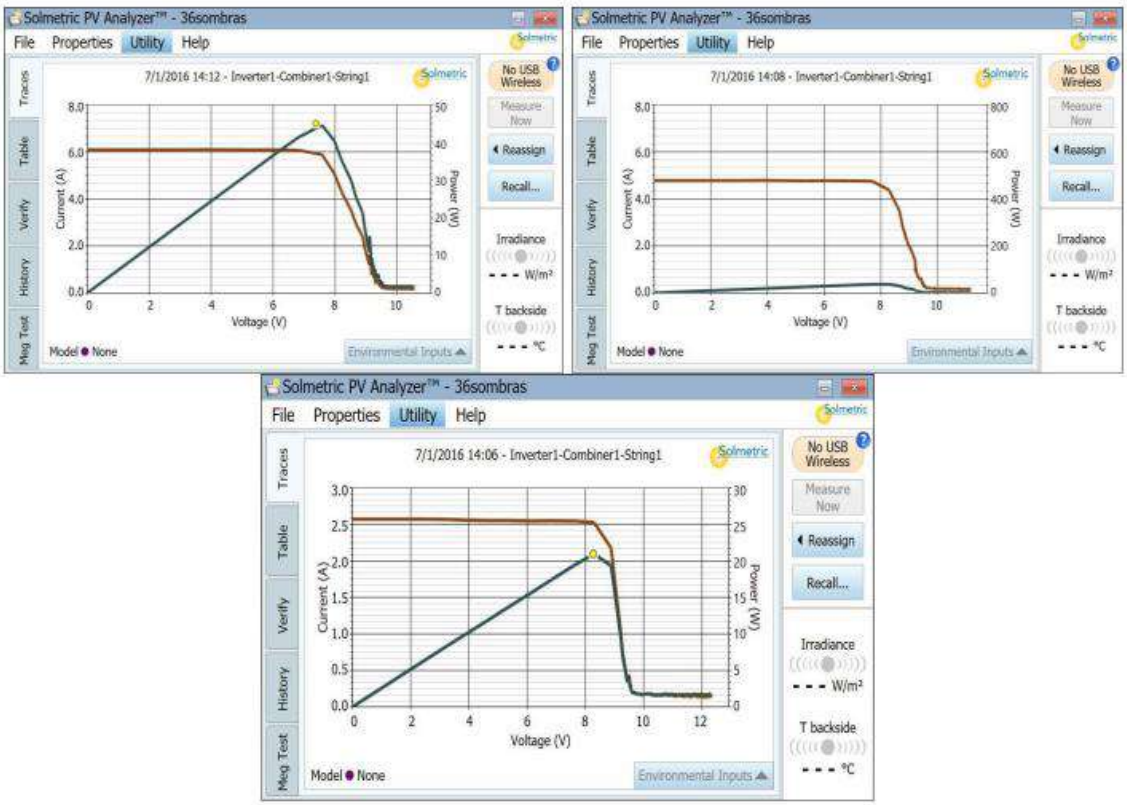


Figura 11. Grafica de un sombreado completo en la primera sección de 18 celdas y un sombreado en la segunda zona a ¼, ½, ¾ respectivamente.

En la **figura 11** se ve que la corriente comienza a decrecer en proporción al aumento de sombra hasta llegar a la disminución de corriente como en la gráfica de la **figura 10**.

4. Resultado

Con las gráficas obtenidas es más fácil ver que las curvas tienen comportamientos en relación a la sombra que este sobre la celda, es decir, si una celda es sombreada en una sola zona del módulo toda la curva I-V será de la forma como mencionamos para la primera sección del módulo, sin importar que se sombre de cualquier forma esa sección, una sombra que tenga un sin número de formas o tamaños tendrá como resultado la curva de la **figura 7** teniendo la atenuación en la porción donde se encuentra la curvatura de la gráfica.

Si una sombra de cualquier tamaño o cualquier forma sin importar cuál pero que no sombré una celda completa, la curva I-V comenzara a tener atenuación en proporción al tamaño de la sombra, es decir, si la sombra tiene en la primera sección una forma de tal manera que la sombra de mayor proporción sea de ¾ de celda, curva será como de la **figura 6**. Si la distribución de la sombra es en la primera zona y sombrea las demás celdas, la curva tendrá como resultado la sombra predominante en las 18 celdas de la primera sección, es decir, si una sombra tiene ¾ de sombra en una sola celda pero en la otra celda es de ½ de sombra en una celda de su alrededor, la curva I-V será de un sombreado de ¾.

Si una sombra de cualquier tamaño o forma cae sobre el modulo en las 2 secciones tapando una celda completa y la otra sección es tapada ¼ de celda, la curva I-V del módulo es representada en la **figura 11**, las demás figuras ilustran muy bien que sucede si vamos sombreando el modulo en la otra sección, la Isc (corriente de corto circuito) disminuye su valor hasta llegar al valor de la sombra de la primera sección, es decir hasta tener una curva que es mostrada en la **figura 10**, una línea casi recta.

En conclusión la primera sección atenuara la curvatura de la grafica en donde se encuentran los valores de máxima potencia hasta llegar a un valor menor a 1 cercano al 0.2 en el valor de la corriente conservando los valores de tension hasta llegar al Voc (Voltaje de circuito abierto) dependiendo de la sombra en su forma y medidas.

La segunda sección modificara la Isc (corriente de corto circuito), es conveniente aclarar que esto solamente sucederá si la primera sección es sombreada de cualquier forma o dimensión, reduciendo su valor hasta obtener un valor nulo en la producción de electricidad, es útil saber si un sombreado perjudicará mucho la curva I-V puesto que es una guía útil para saber a simple vista que tanto es la atenuación en la representación de los valores que ofrece el modulo a sus distintos estados de operación. Este articulo tiene como alcance conocer las atenuaciones en los valores eléctricos de los módulos y dependiendo del tipo de sombra que tape el modulo el usuario podrá saber dónde están los cambios en la curva y dependiendo de las dimensiones de la sombra se podrá saber en dónde se localizan los valores de máxima potencia.

5. Referencia.

Estudio de la afectación de la sombra en un panel fotovoltaico. Jordi Pallejá Cabré. Universitat Rovira i Virgili. Septiembre 2012.

Palabras clave: parámetros eléctricos, curva I-V, sombra, irradiancia, diodo.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO RECONFIGURABLE PARA SUMINISTRAR ENERGÍA A UN SISTEMA DE TRACCIÓN

Moisés García Juárez, Cristian Grano Romero, José F. Guerrero Castellanos, Roberto C. Ambrosio Lázaro, Wuiyevaldo F. Guerrero Sánchez, Gerardo Mino Aguilar, Victor Rodolfo González Díaz
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 4 Sur No. 104, Puebla, Puebla, 72000, México, +52(222)2295500, moises.garciaj@alumno.buap.mx .

Mario Moreno Moreno
Microelectrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro No.1, Santa María Tonantzintla, Puebla, 72840, México, 2474306, mmoreno@inaoep.mx .

RESUMEN

El presente artículo presenta el modelado y la simulación utilizando MATLAB/SIMULINK de un arreglo fotovoltaico reconfigurable junto con un sistema de tracción eléctrico. El sistema de tracción está compuesto de un motor de CD y una carga mecánica. La reconfiguración de éste arreglo es llevada a cabo para satisfacer la corriente y el voltaje necesarios para el sistema de tracción [1]. La reconfiguración está basada en los siguientes principios:

1. Configuración Paralelo, suple mucha corriente y bajo voltaje, ésta es apropiada para los movimientos iniciales.
2. Configuración Serie-Paralelo, provee una corriente y un voltaje moderados, ésta es apropiada para una baja aceleración.
3. Configuración Serie, suple baja corriente pero un alto voltaje, ésta es apropiada para mantener una velocidad constante.

Los resultados de simulación muestran que la estrategia propuesta cumple con los requerimientos de potencia para que el sistema de tracción alcance determinado perfil de velocidad.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation using MATLAB/Simulink of a photovoltaic reconfigurable array together with an electrical traction system. The traction system is composed of a DC motor and mechanical load. The reconfiguration of this array is carried out to meet the current and voltages needs to the traction system [1]. This reconfiguration is based on the following principles:

1. **Parallel type provides much current and low voltage, then appropriate to initial movements.**
2. **Parallel- Series provides moderate current and voltage, then appropriate to small accelerations.**
3. **Series type provides low current but high voltage, then appropriate to maintain a constant speed.**

Simulation results shown that the proposed strategy meets the power requirements and profile velocity for the traction system is reached.

Palabras claves: Arreglo fotovoltaico reconfigurable, espacio de estados, picos de corriente, SimElectronics, velocidad de respuesta.

INTRODUCCIÓN

Las energías más rentables en la república Mexicana actualmente son: la hidráulica y la eólica, pero la solar tiene mucho más potencial, por ejemplo con el 1% de la radiación solar que recibe el estado de Sonora se podría abastecer la demanda eléctrica de todo el país que asciende a 234, 219 GWh al año, de acuerdo con las cifras del Sector Eléctrico 2013-2027, realizado por el SENER (Secretaría de energía) [2], por esta razón es importante enfocar las distintas áreas de investigación de la República Mexicana en buscar aumentar la eficiencia de los generadores fotovoltaicos. A nivel mundial, el control de los generadores fotovoltaicos se está utilizando para lograr aumentar la eficiencia de éstos [1].

Uno de los problemas más drásticos de los generadores fotovoltaicos es el efecto que tiene el sombreado parcial, debido a que la corriente eléctrica proporcionada por un grupo de celdas conectadas en serie es igual a la corriente de la celda que se encuentra bajo el grado más alto de sombreado, porque la corriente es la misma en un circuito en serie; la celda con el grado más alto de sombreado también es llamada punto caliente, porque a la vez se comporta como una resistencia. La forma más sencilla para reducir este efecto es conectar un diodo en anti-paralelo a un grupo de celdas conectadas en serie o en los mejores casos un diodo en anti-paralelo por cada celda, por este diodo será desviada la corriente en vez de pasar por las celdas que están sombreadas, pero entre mayor sea la cantidad de diodos conectados anti-paralelo se tendrán diferentes puntos de máxima potencia (PMP) en un el arreglo fotovoltaico completo. Para mejorar el rendimiento de los generadores fotovoltaicos se están utilizando los sistemas seguidores del punto de máxima potencia (SPMP) del acrónimo en inglés (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*), que se encargan de que el generador fotovoltaico suministre su máxima potencia. Diversas técnicas de

SPMP han sido propuestas para llevar a un generador fotovoltaico a su PMP, entre ellas las más destacadas son: Perturbar y Observar, Incremento de la conductancia y algunas más sofisticadas donde se ven involucradas la inteligencia artificial o técnicas de control no lineal [3]. Comúnmente, cuando un generador fotovoltaico tiene varios PMP los sistemas comerciales SPMP solo seguirán un PMP local.

La idea de cambiar la interconexión (también puede ser llamada: reconfiguración) de los paneles fotovoltaicos, recientemente ha resurgido debido al avance tecnológico en los interruptores y los sistemas de procesamiento de información [1]. Actualmente existen reportes donde se utilizan transistores MOSFET de potencia configurados como interruptores, que permiten que un generador fotovoltaico se reconfigure a alta velocidad [4],[5]. También los nuevos sistemas para procesar información, como por ejemplo los micro-controladores (MCs) son precursores de que la idea de reconfigurar un generador fotovoltaico esté resurgiendo con fuerza, entre muchas de sus ventajas los MCs hacen cálculos matemáticos con gran velocidad y lo mejor es que no son muy caros. Existen dos [1] propósitos par reconfigurar un generador fotovoltaico, en el que existen más reportes científicos es para disminuir los efectos del sombreado y el otro es para atender la demanda de potencia por parte de la carga. Para mitigar los efectos de sombreado, en algunos casos reportan [6] cambiar la interconexión de las celdas y en otros casos se propone agregar celdas conectadas en paralelo, para que de esta manera se compense la corriente de las celdas que están bajo el efecto del sombreado [7]. La idea de cambiar la configuración de los módulos fotovoltaicos para atender la demanda variable de potencia de una carga, comenzó a surgir con el trabajo [8] reportado en1986, donde se reporta un estudio de las características en el arranque y en el estado estacionario de un motor alimentado por celda solares, posteriores a este trabajo han surgido diferentes trabajos, por ejemplo en [9] se reporta la reconfiguración de un generador fotovoltaico para cargar baterías de diferentes capacidades. Otro reporte muy interesante es [10], éste reporta que un generador fotovoltaico se reconfigura para suplir la potencia a un motor CD en sus diferentes estados, cuando el motor arranca el generador se configura en paralelo para que éste de su máxima corriente y de esta manera pueda vencer la inercia, después se configura en serie-paralelo para aumentar un poco la velocidad mientras proporciona una corriente media y finalmente el arreglo se configura en serie para que se incremente la velocidad del motor al aumentar el voltaje del arreglo FV .

En este trabajo se reporta el estudio de consumo de energía de un motor de DC, que forma parte del sistema de tracción de la marca INTECO, posteriormente se muestra la representación en variables de estado del sistema de tracción del sistema de tracción. En MATLAB/SIMULINK es simulado el control de velocidad del sistema de tracción, un arreglo FV reconfigurable es utilizado para disminuir los picos de corriente de un sistema de tracción.

ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE UN SISTEMA DE TRACCIÓN

Los sistema de tracción son utilizados en la mayoría de los sistemas tecnológicos, prácticamente éstos sistemas utilizan un motor eléctrico que mueve una carga mecánica, de ahí el interés en el enfoque de este trabajo en un sistema de tracción. En esta sección se realiza el estudio del consumo de energía en el arranque y en el estado estacionario de un sistema de tracción.

El banco de pruebas utilizado para el estudio de consumo de energía de un sistema de tracción se muestra en la figura 1. El "Modular Servo System" está formado por: un motor de CD acoplado a una carga, un módulo que suministra energía al motor de acuerdo a el valor de la señal de control que es calculado mediante MATLAB/SIMULINK, una tarjeta RT-DAC/PCI que es la interfaz entre la computadora y el módulo de suministro de energía. El analizador de calidad de energía Fluke 43B se utiliza para hacer el análisis de corriente, voltaje y potencia que consume el motor de CD desde que éste se arranca, hasta que el motor llega a su estado estacionario.

Figura 1. Banco de pruebas para el análisis del consumo de energía de un sistema de tracción, desde que un motor de CD arranca hasta que llega a su estado estacionario.

En MATLAB se construye una señal de referencia que tiene una rampa de aceleración y una rampa de desaceleración de 5 segundos. Esta señal representa que el motor acelera en hasta llegar a los 150rad/s y después desacelera.

Se utiliza un control PID para controlar la velocidad del motor. En la figura 2 a) se muestra como la velocidad actual del motor sigue la velocidad de referencia, en la figura 2 b) se muestra que cuando el valor de la señal de referencia aumenta y disminuye, la señal de control aumenta y disminuye con una pendiente de aceleración y desaceleración. El pico de corriente que demanda el motor en su arranque se muestra en la figura 2 c), después de que el motor vence la inercia, la corriente disminuye hasta aproximadamente 250 mA, mientras que el voltaje aumenta a medida que la velocidad del motor va incrementando, cuando el motor comienza a desacelerar el voltaje disminuye mientras que la corriente no presenta un incremento.

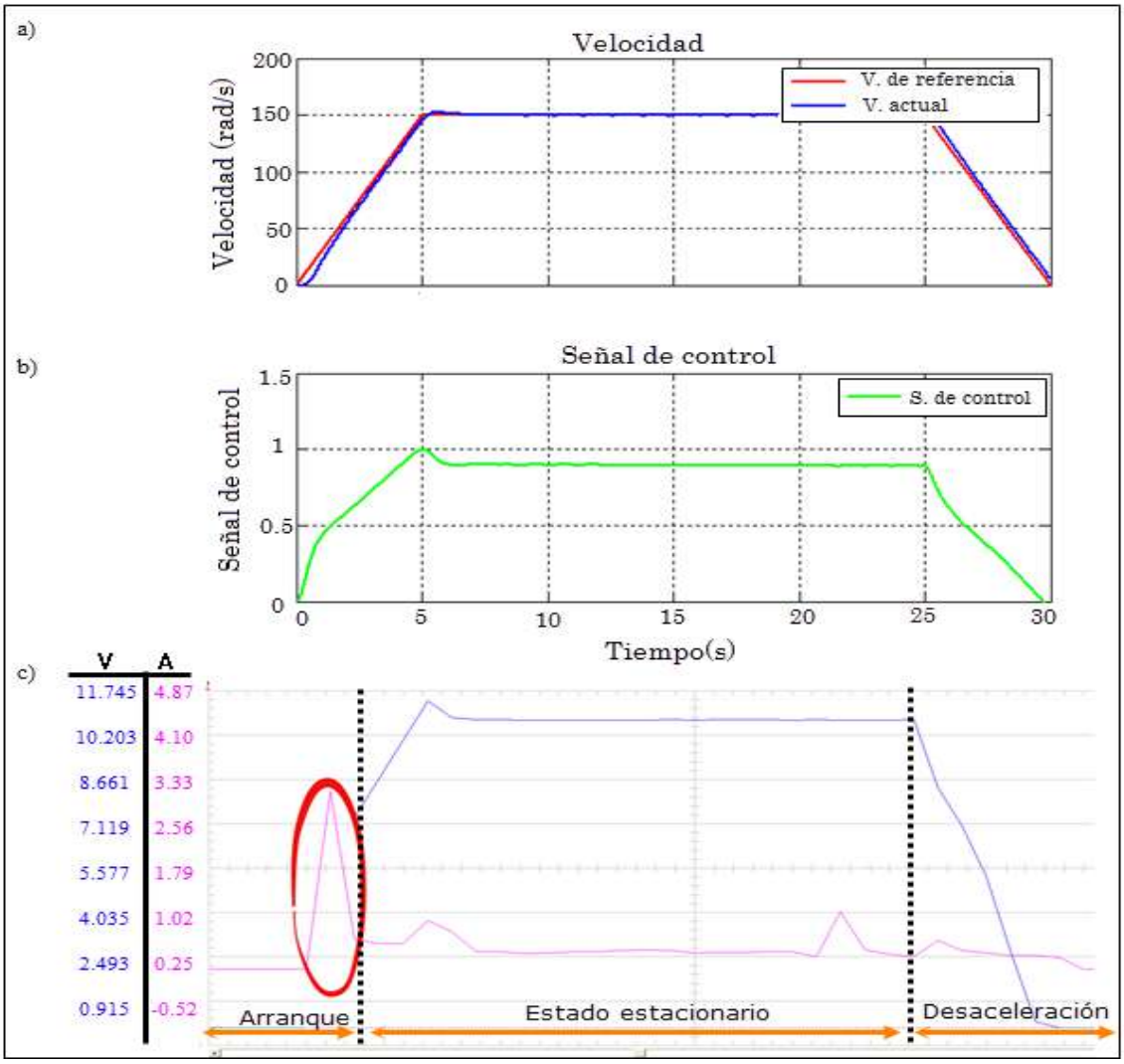


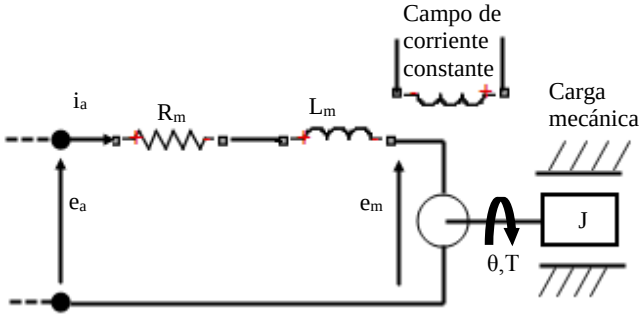
Figura 2. Análisis del consumo consumo de energía de un motor de CD desde su arranque, estado estacionario y desaceleración.

REPRESENTACIÓN EN ESPACIO DE ESTADOS DEL SISTEMA DE TRACCIÓN

En esta sección se decriben los modelos matemáticos de la parte mecánica de un motor de CD y despues se describe la parte eléctrica del motor. Ya con los modelos matemáticos se representa en espacio de estados el sistema de tracción completo.

Representación en espacio de estados del sistema de tracción

Un motor CD puede ser representado por el diagrama que se muestra en la figura 3. En el lado derecho se nombra la nomenclatura de los símbolos que son utilizados en el modelo matemático del motor. En este trabaja no se toma en cuenta el coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y cojinetes (b_m), por que su valor es muy pequeño.



$e_a(t)$ Voltaje de armadura,
$e_m(t)$ Fuerza contra electromotriz producida por el motor,
$i_a(t)$ Corriente de armadura,
R_m Resistencia del motor,
L_m Inductancia del motor,
T Par producido por el motor,
J Momento de inercia equivalente del motor,
θ(t) Desplazamiento angular del eje del motor,
K_m Constante del torque del motor,
K_b Constante contra electromotriz.

Figura 3. Circuito electromecánico de la armadura de un motor de CD.

Tomando en cuenta las leyes de Kirchhoff (LVK) para la parte eléctrica del motor y las leyes de Newton para la parte mecánica el motor puede ser representado en espacio de estado considerando las siguientes variables de estado:

$$x_1 = i_a, \qquad x'_1 = i'_a, \qquad x_2 = \theta, \qquad x'_2 = \theta', \qquad x_3 = \theta', \qquad x'_3 = \theta''$$

Un motor de CD puede representarse en espacio de estados de la siguiente forma:

$$x' = \begin{bmatrix} -Rm/Lm & 0 & -Kb/Lm \\ 0 & 0 & 1 \\ Km/J & 0 & -bm/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x_1} \\ \boldsymbol{x_2} \\ \boldsymbol{x_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Lm} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e_a(t) \qquad (1)$$

Para controlar la velocidad del motor de CD se considera la salida y de la siguiente forma:

$$y = [0 \; 0 \; 1] \begin{bmatrix} \boldsymbol{x_1} \\ \boldsymbol{x_2} \\ \boldsymbol{x_3} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK

El sistema de tracción a simular es el sistema MODULAR SERVO SYSTEM, de la marca INTECO, se considera que el motor está conectado a una carga constante como se muestra en la figura 1, el motor que incluye éste sistema es un motor de CD: Bühler 1.13.044.235, las características de este motor se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características del motor de CD Bühler 1.13.044.235

Parámetros	Valor	Unidad
Voltaje	12	V
Velocidad	429.35	rad/s
Corriente nominal	6.2	A
R	0.5	Ω
L	0.5 x 10^{-3}	H
K_b	0.0277	V/(rad/s)
K_m	0.027	Nm/A
J_m	18 x 10^{-6}	Kg.m^2

En la simulación del sistema de tracción se considera que J=7 x 10^{-4} Kg.m^2, tomando en cuenta que J=Jm+Jl, donde Jl es el momento de inercia de la carga y tiene una valor de 6.82 x 10^{-4} Kg.m^2.

Diseño y simulación del arreglo fotovoltaico reconfigurable

Considerando las especificaciones del fabricante y que en el arranque el motor consume hasta 5 veces su corriente nominal, el arreglo FV debería ser capaz de poder suplir al sistema de tracción Vmax=12V, Imax=25A. Pero si se utiliza la técnica mencionada en [10], que en un inicio se le proporcione al sistema de tracción toda la corriente (conexión paralelo), después la mitad de la corriente y la mitad del voltaje (conexión serie-paralelo), y finalmente el máximo voltaje (conexión en serie); se propone que el arreglo FV reconfigurable tenga 4 módulos FV (MFV), cada uno con las siguientes característica eléctricas: una corriente en corto circuito I_{SC} =6.75 A, voltaje en circuito abierto V_{OC}=3.6V. En la figura 4 a) se muestra un esquema del arreglo FV reconfigurable propuesto, los cuatro módulos FV están conectados a la matriz de interruptores que está conformada por nueve interruptores (S1...S9), la cantidad de interruptores fue definida por la ecuación 3 [5], N es el número de módulos a ser reconfigurados, las terminales positiva y negativa irán conectadas a la entrada del motor de CD. En la figura 4 b) se muestran las curvas características corriente contra voltaje (I-V) del arreglo FV en cada caso de reconfiguración, y también en la parte inferior de la figura se muestran los interruptores que se accionan en cada configuración del arreglo FV.

$$Ninterruptores = 3(N-1) \qquad (3)$$

Simulación del sistema de tracción alimentado por el arreglo FV reconfigurable

La simulación se hizo con bloques de MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE/SIMELECTRONICS, considerando los parámetros del motor mencionados en la tabla 1 y el arreglo FV reconfigurable propuesto para este trabajo. En la figura 5 se muestra el sistema simulado en diagrama a bloques.

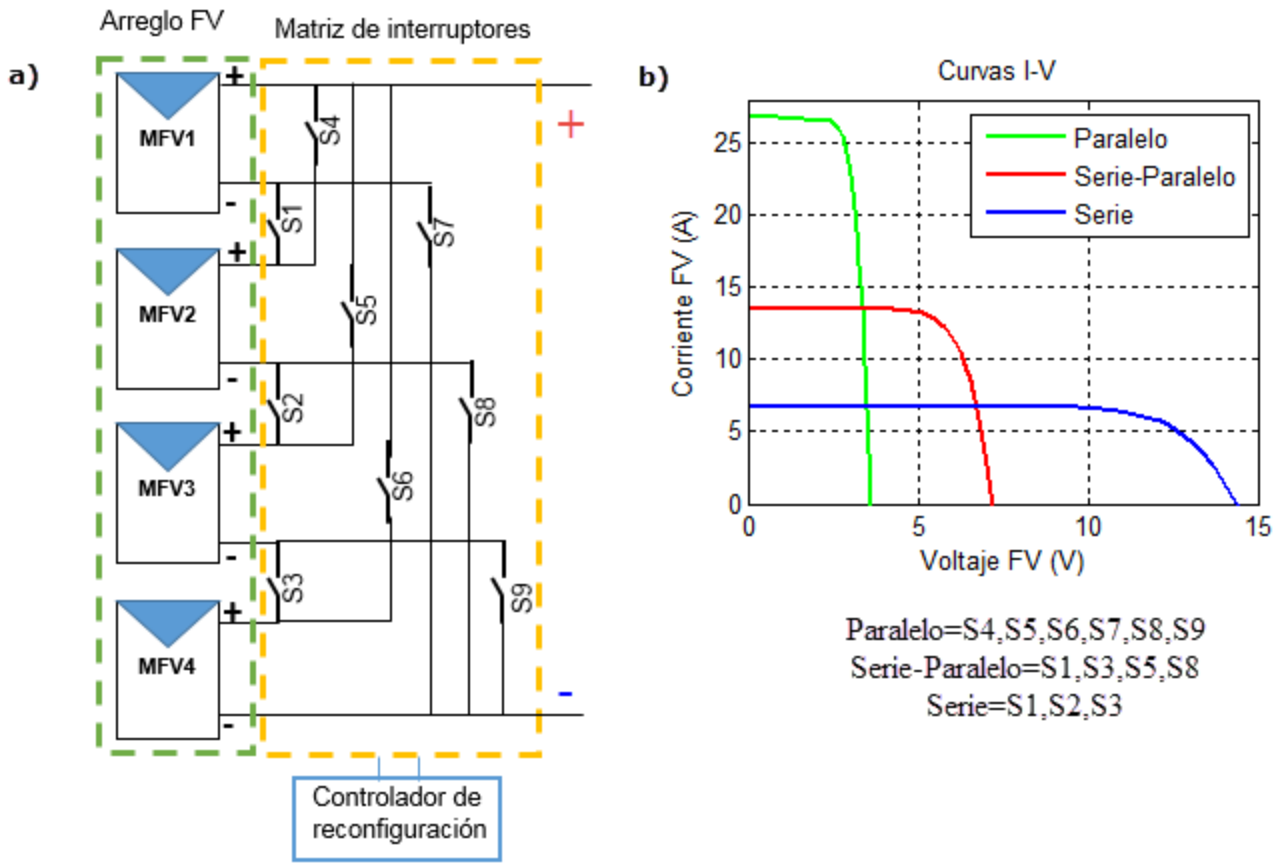


Figura 4. a) Arreglo FV reconfigurable para el sistema de tracción INTECO, b) Curvas características I-V en cada uno de los casos de reconfiguración del arreglo FV simulado.

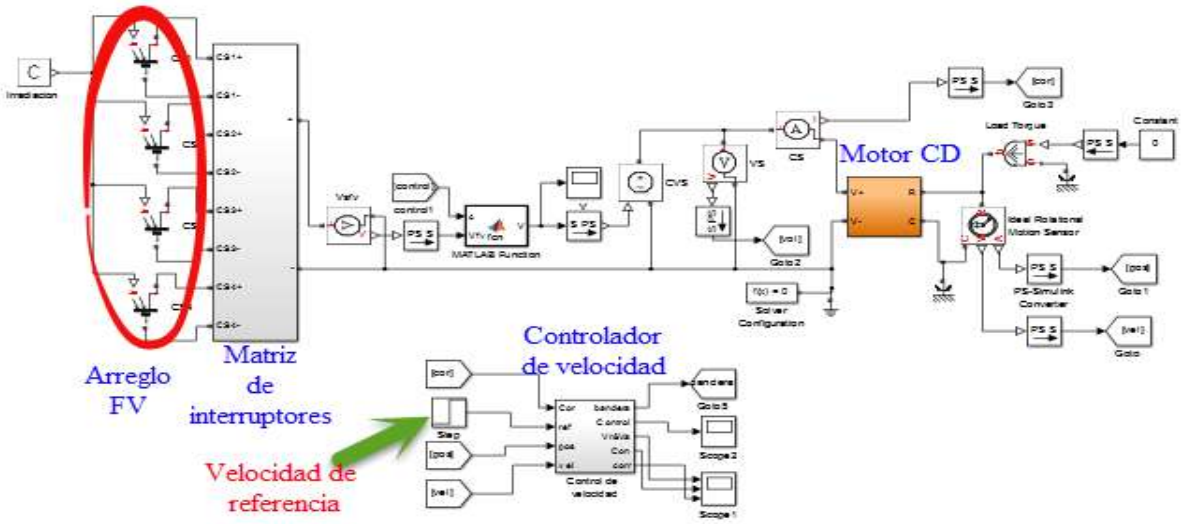


Figura 5. Simulación en MATLAB del control de velocidad del sistema de tracción alimentado por un arreglo FV reconfigurable.

El sistema de la figura 5 se simuló considerando una velocidad de referencia de 300rad/s. En la Figura 6 se muestra la comparación de velocidad, voltaje y corriente entre el arreglo estándar (no es reconfigurable) y el arreglo reconfigurable. Puede apreciarse que el motor con el arreglo FV estándar requiere un pico de corriente de aproximadamente 16 A y con el arreglo FV reconfigurable el motor requiere tres picos de corriente que son mucho menores a 16 A. Reducir un pico de corriente implica disminuir la velocidad de respuesta del sistema, los tres cambios tanto en la velocidad como en la corriente son debido a las tres configuraciones que toma el arreglo FV.

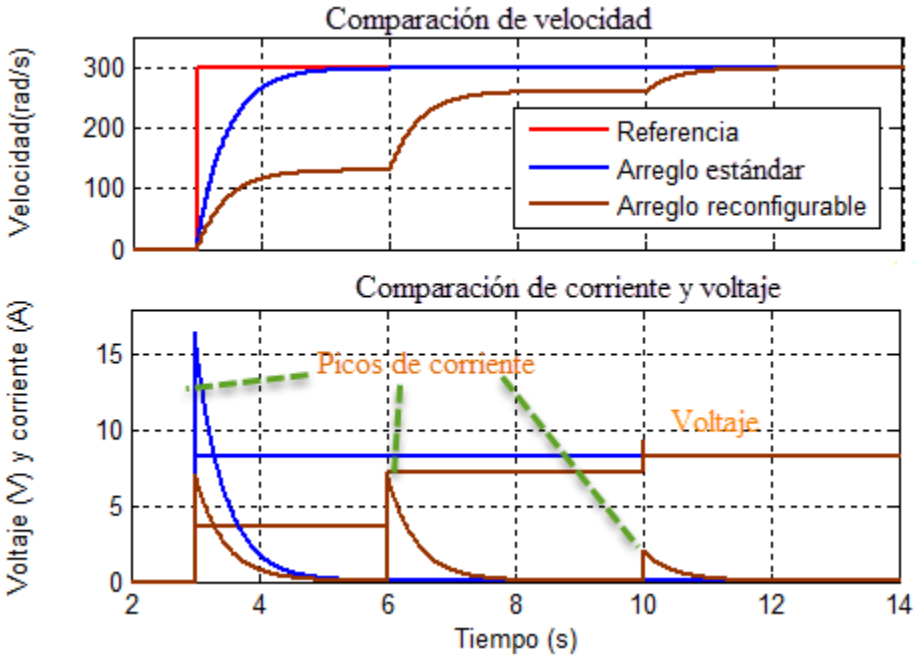


Figura 6. Comparación del consumo de corriente y voltaje, en el caso de un arreglo estándar y un arreglo reconfigurable, al suplir energía para atender la demanda de la señal del control de velocidad de un motor de CD.

CONCLUSION

En este trabajo se presenta lo que es el estudio del consumo de energía de un sistema de tracción, donde se encuentra que al arrancar el motor de CD se presenta un pico de corriente, mientras el requerimiento de voltaje no es tan drástico. Se presentó una representación en espacio de estados de un motor de CD. Posteriormente se presentó la simulación de un motor de CD alimentado por un arreglo FV reconfigurable, donde se observó que la reconfiguración si ayuda a disminuir los picos de corriente, pero disminuye la velocidad de respuesta del sistema. Al lograr disminuir los picos de corriente mediante un arreglo FV reconfigurable, también podrá disminuirse el tamaño del arreglo FV reconfigurable y de esta forma el costo del generador FV, porque la corriente que puede suplir un sistema fotovoltaico depende del área de cada una de las celdas que conforman a éste.

REFERENCIAS

Las referencias deberán ser colocadas en el mismo tipo de letra del texto del artículo, algunos ejemplos se muestran a continuación.

[1] Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Ye Zhao, Brad Lehman, Carlos A. Ramos Paja and Martha L. Orozco Gutiérrez (2015). Control of Photovoltaic Arrays, IEEE Industrial Electrics Magazine, p. 65-76.

[2] Verenise Sánchez (2014). Sonora podría abastecer de energía a todo México con tecnología fotovoltaica. Agencia informativa CONACYT, 2014.

[3] Trishan Esram and Patrick L. Champan (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on energy conversion, Vol 22, No.2, JUNE 2007.

[4] Yanzhi Wang, Xue Lin, Massound Pedram, Jaemin Kim and Naehyuck Chang. Capital Cost-Aware Design and Partial Shading-Aware Architecture Optimization of a Reconfigurable Photovoltaic System. EDDA 2013.

[5] Lew Andrew R. Tria, Miguel T. Escoto, Jr. Carl Michael F. Odulio. Photovoltaic Array Reconfiguration for Maximum Power Transfer. TECNON 2009.

[6] Guillermo V. Quesada, Francisco G. Gispert, Roberto P. López, Manuel R. Lumbreras and Alfonso C. Roca. Electrical PV Array Reconfiguration Strategy for Energy Extraction Improvement in Grid-Connected PV Systems. Transactions on industrial electronics, Vol. 56, No. 11, November 2009

[7] Ze Cheng, Zhichao Pang, Yanli Liu and Peng Xue. An Adaptive Solar Photovoltaic Array Reconfiguration Method Based on Fuzzy Control. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, China, July 6-9 2010.

[8] J. Appelbaum. Starting and steady-state characteristics of DC motors powered by solar cell generators. IEEE Transactions on energy conversion, Vol. EC-1, No. 1, March 1986.

[9] Ye Zhao, Ling Yang, and Brad Lehman. Reconfigurable Solar Photovoltaic Battery Charger Using a Switch Matrix. IEEE 2012.

[10] Yingrak Auttawaitkul, Boonnua Pungsiri, Kosin Chammongthai and Makoto Okuda. A Method of Appropriate Electrical Array Reconfiguration Management for Photovoltaic Powered Car. IEEE 1998.

[11] Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderna. PEARSON, 5ª edición, 2010.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DEVELOPMENT OF A FABRICATION PROCESS OF C-SI SOLAR CELLS TOWARDS A OWN TECHNOLOGY OF HIGH EFFCIENCY AND LARGE AREA

Mario Moreno, Jesús Martínez, Pedro Rosales, Alfonso Torres, Dulce Murias, Netzahualcoyotl Carlos, Adrián Itzmoyotl, Leticia Tecuapetla, Armando Hernández, Ignacio Juárez, Pablo Alarcón
Laboratorio de Microelectrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, Calle Luis Enrique Erro No. 1, Tonantzintla, Puebla, Puebla, 72840, México,
Teléfono +52 (222) 2663100, Fax +52 (222) 2472580, **mmoreno@inaoep.mx.**

Roberto Ambrosio
Facultad de Electrónica, BUAP, 18 Sur y Avenida San Claudio, San Manuel, Puebla, Puebla, 72850, México,
Teléfono +52 (222) 2295500, **roberto.ambrosio@correo.buap.mx**.

RESUMEN

En este trabajo se reportan los avances en un proceso de fabricación de celdas solares basadas en la tecnología de silicio, el cual es desarrollado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, Puebla, México. Se busca que el proceso sea simple, de alta eficiencia, que pueda ser implementado en área grande (100 cm^2) y que sea compatible con la industria. Los resultados preliminares son muy satisfactorios, ya que se han fabricado hasta éste momento celdas solares de 1 cm^2 en sustratos de bajo costo (silicio crecido por el método Czochralski), con eficiencias de hasta 14%, las cuales han sido medidas usando un simulador solar AA que provee radiación solar tipo Masa de Aire 1.5 (100 mW/cm^2).

ABSTRACT

In this work is reported the progress of a fabrication process of solar cells based in the silicon technology, which is developed in the laboratory of microelectronics of INAOE, Puebla, Mexico. We are pursuing a simple process, of high efficiency, that could be implemented in large area (100 cm^2) and compatible with industry. Our preliminary results are very satisfactory, since at this moment we have fabricated solar cells of 1 cm^2 in low cost silicon substrates (silicon grown by the Czochralski method), with an efficiencies of 14%, which have been measured using a solar simulator AA, which provides a solar radiation Air Mass 1.5 (100 mW/cm^2).

Palabras claves: Celdas Solares, Silicio, cristalino, Czochralski, Masa de Aire 1.5.

INTRODUCTION

Nowadays in the world there is a growing interest in the development of technologies for the production of renewable and clean energy in order to reduce the pollution and the global warming, due to excessive production of CO_2, which is result of high consumption of fossil fuels, as oil and carbon. Among the different technologies developed for the production of renewable energy, solar energy is one of the most promissory, since the life of the sun is of about 5,500 millions of years and every day arrives to earth more energy than the necessary in the world for one year. Practically, the sun is an inexhaustible and free source of energy.

Close to 90 percent of the solar PV modules which are fabricated around the world are based on silicon (Si) as polycrystalline silicon (poly-Si) or mono crystalline silicon (c-Si) as is shown in Figure 1 [1]. The above is related to the fact that silicon is the second most abundant element on the earth surface, it is not toxic and there is a well established technology for the production of Si wafers. As well, the silicon solar cells and modules have a very large time of life, which is larger than 20 years and the record efficiency of this kind of technology is of about 25% [2-3].

Two main technologies for the fabrication of c-Si solar cells have been developed; the first one (which is the first generation) consists in the formation of a PN junction in the Si wafer surface, by the diffusion of doping atoms in the Si wafer. The doping atoms are contained in gases as B_2H_6 (for boron atoms) and PH_3 (for phosphorous atoms) and atomic diffusion furnaces are used for the diffusion of the atoms in the Si wafers, at temperatures of about 900 °C - 1000 °C. The record efficiency of this kind of solar cells is of 24.7 % [2].

The second technology for the fabrication of c-Si solar cells (also second generation) consists in the formation of a PN junction by the deposition of doped hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) on a c-Si wafer. The a-Si:H film is deposited by the Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) technique at lower temperatures (< 300 °C). In this technology, the PN junction is a combination of a-Si:H and c-Si, and that is the reason of why those cells are called heterojunction solar cells. The record efficiency of this kind of solar cells is of 25.6 % [3].

One of the drawbacks of silicon solar cells is the price of the crystalline silicon (c-Si) wafers which consequently increases the price of the cells and modules. However, continuously there is research in the solar cells fabrication processes in order to reduce the

fabrications cost, maintaining relatively high efficiencies. One way is to reduce the thickness of the silicon wafers (which usually is of 300 - 400 μm), for instance Panasonic (previously Sanyo) has demonstrated solar cells using wafers of 70 μm of thickness.

Another approach is the use of cheaper wafers as polycrystalline silicon and silicon wafers grown by the Czochralski method, those wafers have lower quality than the wafers used in very high efficiency solar cells (grown by the Float Zone method), but still are very suitable for solar cells with relatively high efficiencies (> 15%) and its cost is of about 5 times lower.

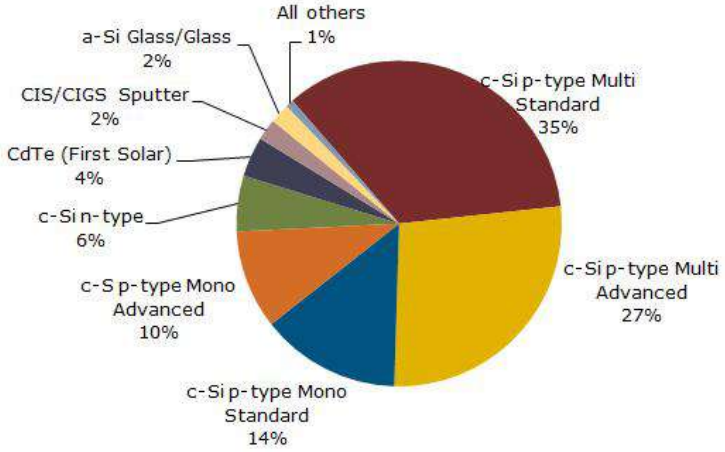


Figure 1. Solar PV module production by technology in 2014 [1].

Other solar cell technologies developed are those known as thin film solar cells, mainly based on amorphous silicon (a-Si:H) or Cadmium Sulfur / Cadmium Tellurium (CdS / CdTe), among others. The advantages are their lower cost, since are fabricated on glass substrates, and consequently there is not necessity of crystalline wafers, however those cells also have drawbacks. Amorphous silicon solar cells have lower efficiencies (< 13 %) and also they are degraded due to the sunlight radiation. On the other hand CdS / CdTe solar cells have demonstrated high efficiencies (22 %), however they are composed of carcinogenic compounds, which restrict its storage once that its utility life has been finished. Also, their components are not abundant on the earth surface, which means that this technology is not very suitable for meet the requirements of a growing PV industry in a long term.

In the present work we report our preliminary results in the development of a crystalline silicon solar cell fabrication process, using Spin-On-Dopant (SOD) as doping source for the solar cell emitter formation [4-5], by this method we avoid the use of dangerous gases as phosphorusoxy-chloride (POCl3) or phosphine (PH3), which are commonly used on the PV industry [6-7]. We are developing a simple process for the fabrication of crystalline silicon solar cells, of relatively high efficiency, that could be implemented in large area (100 cm^2) and compatible with industry. Our preliminary results are very satisfactory, since at this moment we have fabricated solar cells of 1 cm^2 in low cost silicon substrates (Czochralski silicon wafers), with efficiencies of 14%.

For this work we have taken the advantages of the clean room facilities of INAOE, particularly of the laboratory of microelectronics, where there is a clean room class 1000 with a process compatible with the silicon CMOS transistors, where we can produce silicon solar cells in wafers of 5 cm of diameter. Moreover, for larger solar cells we have the Laboratory of Innovation in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), LI-MEMS, where it is possible to process wafers of 10 cm of diameter. Figure 2 shows some images of the clean room facilities (class 100 and 1000) of the microelectronics laboratory and LI-MEMS of INAOE, Puebla, Mexico.

A) B) C)

Figure 2. Clean room facilities at INAOE: A) Clean room class 1000 of the microelectronics laboratory. B) Clean room class 100 of LI-MEMS. C) Wet bench in the clean room of LI-MEMS.

EXPERIMENTAL PART

The solar cells were fabricated on low cost, p-type (boron doped), <100>, Cz c-Si wafers of resistivity 5-15 Ωcm and thickness of 300 µm. Figure 3 shows the simplified process flow for the fabrication of crystalline silicon solar cells using the spin on dopant (SOD) technique. First the wafers were chemically cleaned by a step based on trichloroethylene and acetone, the native thin oxide film was etched with buffered hydrofluoric acid (BHF) followed by the standard cleaning RCA1 and RCA2.

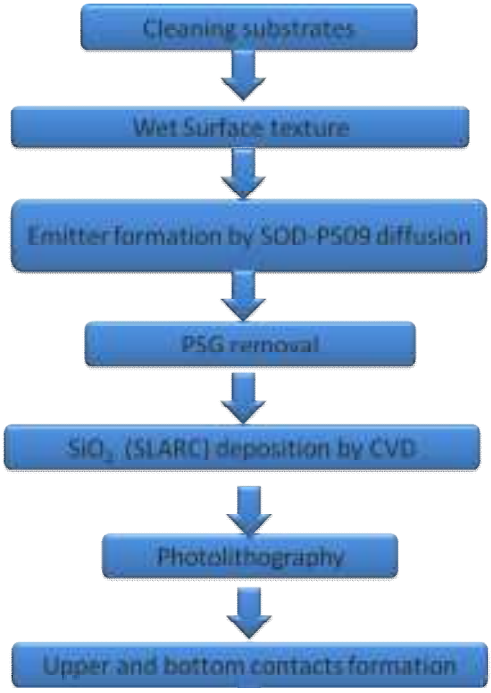
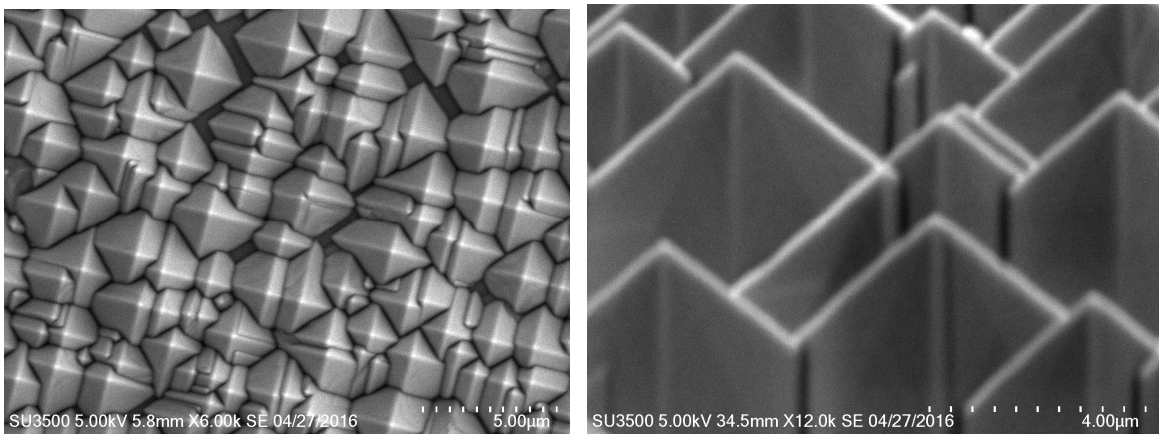


Figure 3. Process flow for the fabrication of crystalline silicon solar cells using the spin on dopant technique.

After the cleaning step the wafers were textured with optimized conditions previously developed by our group [8], in order to minimize the reflectance losses. The etchant solution was based on KOH / IPA / H_2O. Figure 4A) shows the top view of a textured silicon wafer using our developed process, where we can see the formation of pyramids of different sizes. Figure 4B) shows a cross section view of the pyramids formed in the silicon wafer surface.

The n-type emitter was formed by the SOD solution deposited on the surface wafers by spin coating. The diffusion process was carried out in an atomic diffusion furnace (Figure 5). The diffusion process was optimized at different temperatures, ranging from 900 °C to 1100 °C and different times, in the range of 10 minutes - 30 minutes. The phosphosilicate glass (PSG) formed in this step was removed by an etching step in a BHF solution.



A) B)

Figure 4. A) Textured surface of a crystalline silicon wafer. B) Cross section view of the pyramids.

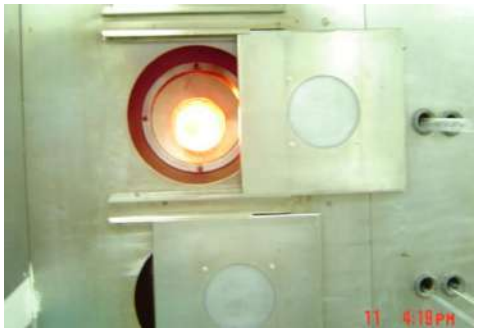
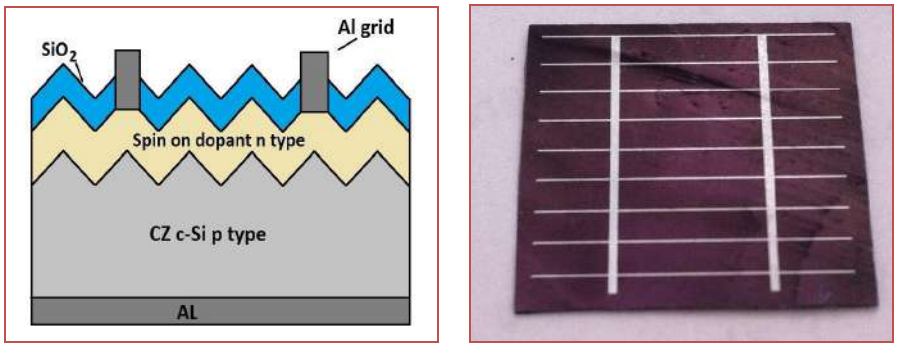


Figure 5. Atomic diffusion furnace used for form the emitter of the solar cell.

The Single Layer Anti-Reflection Coating (SLARC) was formed by the deposition of 100 nm of a silicon oxide layer (SiO_2) on the wafers surface, using the Chemical Vapor Deposition (CVD) technique. A photolithography step was performed, in order to open windows on the surface of the wafer in order to form the aluminum grid. Aluminum evaporation (using the e-beam technique) in the front grid was made to form the upper contacts, followed by full area deposition of aluminum on the rear wafer side. Finally, the wafers were cut in order to produce four cells of area of 1 cm^2. Figure 6 A) shows a draw of our simple solar cell, and Figure 6 B) shows a solar cell fabricated in our facilities.



A) B)

Figure 6. A) Schematic draw of the simple solar cell fabricated. B) Photograph of a solar cell fabricated by the spin on dopant technique.

RESULTS

The diffuse reflectance of the textured silicon wafer was characterized, using a spectrophotometer with an integrating sphere (X-Rite, ColorEye 7000A), which measures diffuse reflectance in the range of 400 nm - 700 nm. We measured three different samples in order to observe the reduction on the diffuse reflectance. Figure 7 shows the average reflectance of a polished silicon wafer, which has an average reflectance of 36%. It means that from the 100 % of the light that arrives to the wafer, just 64 % is absorbed. The textured wafer with the KOH solution has an average reflectance of 12%. However, the largest reduction in reflectance was achieved in the wafer that was textured by the KOH solution, and contains a thin SiO_2 film of 100 nm, which works as SLARC. This wafer has a 5% of average reflectance, which means that 95% of the light is absorbed. The above will result in a very large short circuit current (I_{sc}) of the solar cell.

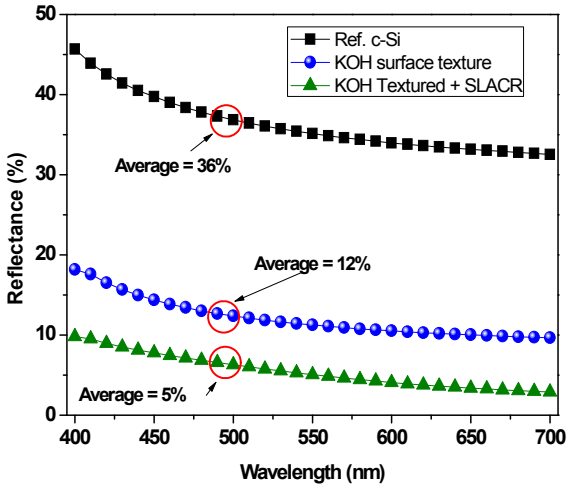


Figure 7. Diffuse reflectance as a function of the wave length.

As well we have optimized the atomic diffusion process using the spin on dopant technique; our objective is to produce very shallow diffusion depths. The parameters that have been optimized are the deposition process of the SOD solution by spin coating, the temperature of the atomic diffusion furnace and the diffusion time. The phosphorus atoms concentration on the wafer surface and the diffusion profiles of the electrically active atoms, were measured by the electrochemical capacitance-voltage technique using the wafer profiler ECVP-21.

In Figure 8 is shown the diffusion profile of the electrically active phosphorous atoms in the silicon wafer surface. The diffusion profile has a very high peak concentration (close to $1x10^{21}$ cm^{-3}) in the surface. Then the phosphorus concentration decreases fast in about four orders of magnitude. The shallow junction depth (Xj) produced is of 0.4 µm.

The shape of the diffusion profile is very suitable for high performance solar cells, since in the surface the maximum doping atoms concentration (C_{max}) is large ($1x10^{21}$ cm^{-3}), which produce a low wafer surface resistance, and consequently provide the formation of an ohmic contact with the metal grid. Also, in the diffusion profile deeper than 0.1 µm, the doping atoms concentration decreases fast, which is also very suitable in order to avoid large recombination of the photo-generated carriers, which would reduce the short circuit current (I_{sc}) and consequently the efficiency of the solar cell.

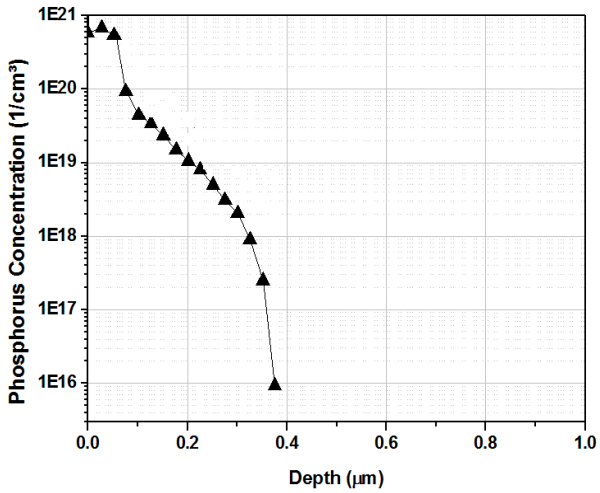


Figure 8. Profile of the phosphorous diffusion for produce the n-type emitter of the solar cell.

The electrical characterization of the devices was performed using a Newport Oriel Sol AA solar simulator as is shown in Figure 9 A), which provides radiation type Air Mass 1.5 (100 mW/cm^2). Figure 9 B) shows a solar cell ready to be characterized using the solar simulator.

Figure 9. A) Solar simulator Oriel Newport AA. B) Solar cell characterized.

Figure 10, shows the current - voltage characteristics (under radiation AM 1.5) of a crystalline silicon solar cell fabricated in the microelectronics laboratory of INAOE. Table 1 shows the performance characteristics of the solar cell fabricated. The efficiency of the solar cell is of 14%, the open circuit voltage (V_{oc}) is of 0.58 V, which is still low and can be increased by improving the passivation of the wafer surface, with the deposition of a higher quality SLARC layer. The short circuit current density (J_{sc}) is of 35 mA/cm^2, which in fact is large and is consequence of the very suitable texturing step combined with the SiO_2 SLARC layer. The fill factor (FF) is of 0.69, which is quite low and is result of a still large series resistance (R_s) of the metal/semiconductor contacts of the solar cell. The FF can be improved with a formation of better metal /semiconductor contacts by the incorporation of a back surface field (BSF).

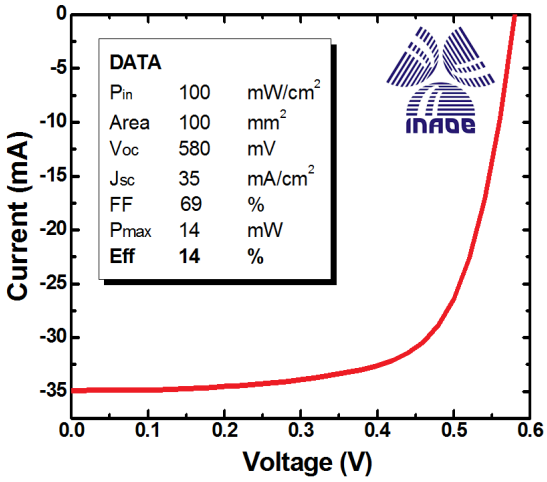


Figure 10. Current-Voltage curve of the solar cells measured under AM 1.5 conditions.

Xj (µm)	Voc (mV)	Jsc (mA)	FF (%)	Efficiency (%)
0.4	580	35	69	14

Table 1. Performance characteristics of the solar cell fabricated

CONCLUSIONS

In this work we report the progress of a fabrication process of solar cells based in the silicon technology, which is developed in the laboratory of microelectronics of INAOE, Puebla, Mexico. We have developed a solar cell fabrication process using the Spin-On-Dopant technique (SOD) as a liquid source for the n-type emitter formation. By this method we avoid the use of dangerous gases, that are commonly used on the PV industry.

The solar cells fabricated on low cost Czochralski wafers have an efficiency of 14 %, but still we are working in order to improve some parameters of the solar cells, as the V_{oc} with the implementation of a better surface passivating layer, and the fill factor, with the implementation of a BSF. Therefore the efficiency of the solar cells reported in this work can be improved, making this process very suitable for the development of solar cells of larger area, with a compromise between low cost and relatively high efficiency.

ACKNOWLEDGES

This research was also supported by the project of Basic Science SEP-CONACYT, No. 154112.

REFERENCES

[1] http://cleantechnica.com/2013/10/29/multicrystalline-silicon-modules-dominate-solar-pv-industry-2014/
[2] Martin A. Green, Crystalline and thin film silicon solar cells: state of the art and future potential, Solar Energy 74 (3), 181 -192, 2003.
[3] Panasonic, Panasonic HIT solar cell achieves world's highest conversion efficiency of 25.6 % at research level, Press Release; April 10 2014.
[4] Yi-Yu Lee, Wen-Jeng Ho, Jhih-Kai Syu, Quan-Ru Lai, and Cheng-Ming Yu, 17.9% Efficiency Silicon Solar Cells by Using Spin-on Films Processes, in Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium, 12-16, 2011.
[5] K. Kim, S. K. Dhungel and J. Yi, Effect of Novel Surface Treatment on Large-Area Low-Cost SOD Diffused Monocrystalline Silicon Solar Cells, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 47, No. 6, pp. 1035-1040, 2005.
[6] H. Ghembaza, A. Zerga, R. Saïm, "Efficiency Improvement of Crystalline Silicon Solar Cells By Optimizing The Doping Profile Of Pocl3 Diffusion", International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 3 , Issue 1 , 2014.
[7] K. Murukesan, S. Kumbhar , A. K Kapoor , A. Dhaul, Saravanan S. , R. Pinto, and B. M. Arora, "POCl3 diffusion process optimization for the formation of emitters in the crystalline silicon solar cells", in 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 2014, pp. 3011 - 3013.
[8] M. Moreno, D. Murias, J. Martínez, C. Reyes, A. Torres, R. Ambrosio, P. Rosales, P. Roca, M. Escobar, "A Comparative Study of Wet and Dry Wexturing Processes of c-Si Wafers for the Fabrication of Solar Cells" Solar Energy 101 182-191 , 2014.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS MONO CRISTALINOS EN SISTEMAS AUTÓNOMOS EN BAJA CALIFORNIA

Edgar González San Pedro y Nicolás Velázquez Limón
Centro de Estudios de las Energía Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California
, Calle de la normal s/n col. Insurgentes, Mexicali, B. C, 21280, México,
Tel (653) 1033723 E-mail gonzalez.edgar@uabc.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta el estudio del comportamiento operativo de paneles fotovoltaicos monocristralinos sunpower, bajo condiciones climáticas típicas para Mexicali, baja california. se realizo un análisis térmico con ayuda de una cámara termografías para identificar los puntos calientes de los paneles y su afectación en el rendimiento. para evaluar el rendimiento general se utilizo el pv-analyzer en base a las condiciones climatológicas y las instalaciones eléctricas como le afecta el sombreado permanente, intermitente por el movimiento aparente del sol y la reducción de generación afectación del polvo. con este estudio se da pauta para tener un conocimiento empírico de la generación real en condiciones de clima desértico y que sea de ayuda para un correcto dimensionamiento en instalaciones de sistemas con generación distribuida.

Palabras claves: Energias renovables, Energia solar, paneles solares, rendimiento, generación, decaimiento.

ABSTRACT

this paper describes the study of the operating behavior of monocristaline sunpower photovoltaic solar panels, under typical weather conditions for Mexicali, Baja California. a thermal analysis was made using a thermal imaging camera which was conducted to identify hot panels spots and their effect on performance. pv-analyzer was used to evaluate the overall performance based on the weather conditions and electrical installations; how it is affected, flashing by the apparent movement of the sun and reduced dust generation involvement of permanent shading. this study guide is given to have an empirical knowledge of the actual generation in desert climate conditions and become helpful for proper sizing installations with distributed generation systems.

Keywords: Renewables energies, Solar energy, Solar panels, Performance, Generation, decline.

INTRODUCCIÓN

En el mundo existen más de 1200 millones de personas que se encuentran sin acceso a la electricidad (Zomers, 2014), aunando a eso, existe un grave problema de contaminación debido al uso de combustibles fósiles(Mohammed et al., 2014; "Off-grid," 2012; Siddaiah and Saini, 2016). El uso de las energías renovables (ER) como el camino hacia la sustentabilidad energética ha sido un detonante para la investigación en el desarrollo de Micro Redes (MR) (Neves et al., 2014; Shivarama Krishna and Sathish Kumar, 2015) por eso, al tener una MR experimental, nos permite estudiar su comportamiento bajo diferentes escenarios.

A los sistemas de generación eléctrica híbridos autónomos, suele referirse como micro redes ("IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems," 2011), la cual consiste en un conjunto de cargas interconectadas y fuentes de energía distribuida (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, microturbinas) que pueden ser operadas de manera coordinada y controlada a la red eléctrica o de manera aislada (CIGRE MicroGrid Working Group, 2010).

En el mundo se han instalado varias MR con fines de investigación, algunas a nivel laboratorio(Fossati, 2011), otras abastecen campus universitarios o centros de estudios. En México existen pocas MR que permitan experimentación con las diferentes tecnologías de generación eléctrica, sistemas de almacenamiento de energía e inversores que existen en el mercado.

El objetivo de este artículo es plantear analizar el comportamiento operativo de paneles fotovoltaicos mono cristalinos en la región de Mexicali, Baja California, México. Bajo condiciones climatológicas normales. Con esto se pretende evaluar el rendimiento de acuerdo la temperatura ambiente, la afectación en la generación por sombreados parciales y el polvo. De esta forma se busca tener resultados que permitan un mejor dimensionamiento en la instalación de este tipo de tecnologías en el región de Mexicali.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La MR experimental está planteada para trabajar con diferentes fuentes de ER, tales como la energía solar fotovoltaica, eólica y biomasa (biogás), además de un banco de baterías como almacenamiento. En la figura 1 se observa la descripción gráfica y como se conectan al cargador/inversor.

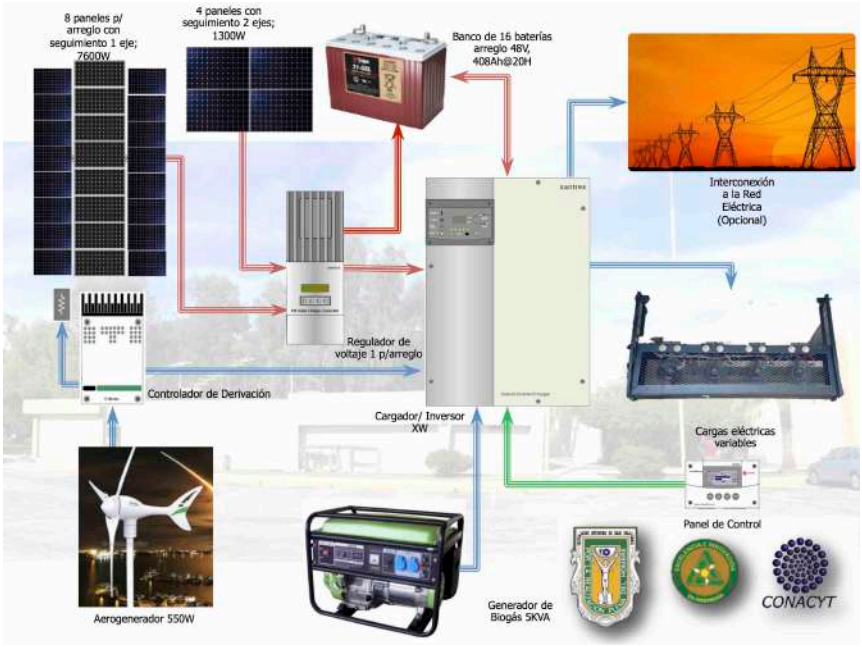


Figura 1, Diagrama esquemático de la micro red

La MR se compone por 20 Paneles Sunpower de 327 Watts c/u, 8 paneles solartec de 300 Watts c/u, 1 Aerogenerador Apollo de 550 Watts, 1 Generador eléctrico de Biogás de 5KVA, 16 baterías trojan de 12 V 1.3 kWh de almacenamiento c/u. 8 cargas eléctricas variables de 1.5 kW c/u, 4 controladores de carga solares, 1 controlador de carga eólico y 2 inversores híbridos de 6 kW c/u. Se observa en el esquema de conexiones, que se compone de 3 arreglos de 8 paneles c/u, con sistema de seguimiento en un eje, 2 de ellos con 2.61 kW de potencia pico con paneles SunPower y 1 de 2.4 kW con Solartec. Un sistema de seguimiento en 2 ejes con 1.3 kW de potencia y paneles SunPower. Un aerogenerador horizontal de 3 aspas instalado a 16 metros de altura con una capacidad nominal 0.550 kW de potencia pico a una velocidad de viento de 13 m/s. 5 kVA de generación eléctrica a biogás, 20.8 kWh de almacenamiento en baterías y 12 kW de carga eléctrica variable.

Metodología

Para obtener los resultados deseados se realizaron 3 estudios:

1. Análisis térmico de los paneles para detección de puntos calientes y temperatura de operación.
2. Análisis del rendimiento eléctrico de los paneles fotovoltaico en condiciones de operación.
3. Corridas experimentales de generación eléctrica bajo diferentes escenarios de operación.

Para el estudio se contempló utilizar los arreglos 1 y 3 de un eje con una inclinación de 20 grados, los cuales tienen paneles mono cristalinos sun power.

El primer estudio se realizó con una cámara de infrarroja termo grafica para medir la temperatura de los módulos fotovoltaico y detectar posibles puntos calientes. Las mediciones se hicieron panel por panel.
El segundo estudio requiere la desconexión de los arreglos fotovoltaicos de los controladores de carga solares. Después se desconectan los fusibles de cada cadena de 2 paneles para conectar el sistema PV-Analyzer, también se utiliza un sensor de radiación solar en el plano inclinado de los paneles y un par de termocuplas para la temperatura de las celdas del panel. Conectados estos componentes en cada cadena de paneles, se configura en el software del pv-analyzer con las especificaciones de los paneles e inversores de una base de datos con la que cuenta para tomar las mediciones, dando como resultado el rendimiento de los paneles en base a la radiación en el plano de los paneles, la temperatura de celda y la energía producida en base a la carga inducida por el pv-analyzer.
El tercer estudio consiste en producir energía eléctrica con los paneles de los arreglos 1 y 3 bajo 2 condiciones principales y con la premisa de que el arreglo 1 tiene los paneles limpios y el arreglo 3 no se han limpiado durante 3 meses(Abril-Julio) (ver figura 2). La acumulación de polvo se debe a que Mexicali es una zona desértica donde el polvo se incrusta en carros, ventanas de casas y edificios y este caso, paneles fotovoltaicos.

Figura 2, Arreglo 1 limpio y 3 sucio con sombreado parcial

La primera es con los 8 paneles ya que debido a la posición y el movimiento aparente del sol provocan sombreados en los 2 últimos paneles del arreglo 3.

Resultados

La figura 3 nos muestra la temperatura del panel y se observa como es uniforme a lo largo del modulo. Los mínimos de temperatura se dieron por los puntos donde no hay celda. Caso similar se observo con todos los paneles, a excepción de los últimos 2 paneles del arreglo 3, ya que presentaban suciedad por residuos de pájaros. Lo que provoca un aumento en la temperatura de ciertas áreas de dichos paneles.

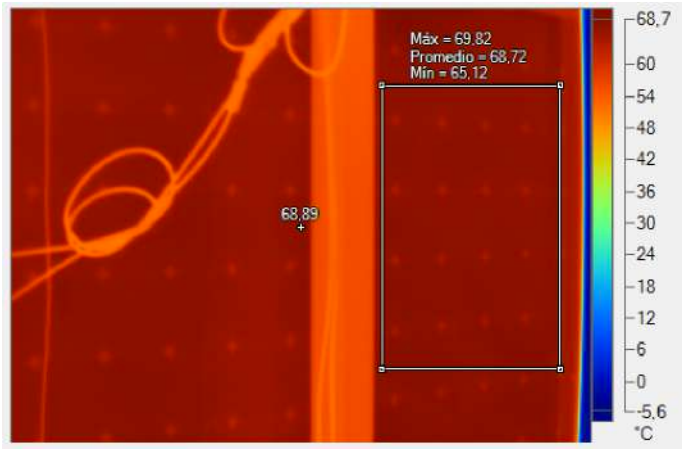


Figura 3, Imagen termografíca del panel

La figura 4 se observa el resultado de las pruebas realizadas con el PV-Analyzer de una cadena de 2 paneles en serie. Donde se observa que el rendimiento(performance en ingles) del panel tiene casi un 100%, con un decaimiento normal considerando que los paneles sufren una perdida anual de 1%. Para dar esta estimación el sistema PV-Analyzer toma en cuenta la radiación incidente en el panel, la temperatura y la curva I-V del panel. Dando como resultado un 98.4% de rendimiento de los paneles con respecto a las condiciones de radiación y temperatura que se tienen.

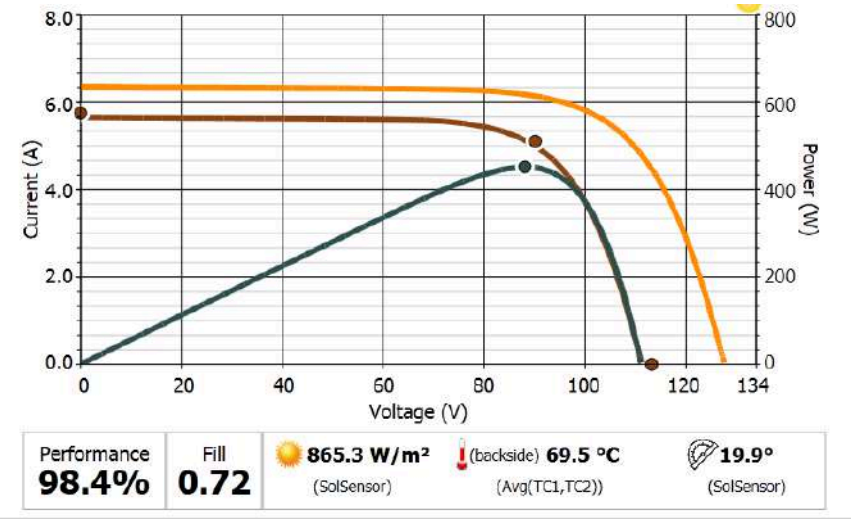


Figura 4, Análisis con PV-Analyzer

Para los paneles del arreglo 3 se tuvo un rendimiento promedio de 91%, esto era esperado debido a la afectación del polvo en la conductividad de semiconductores, en este caso, las celdas fotovoltaicas. Por lo que se da diferencia del 7% en rendimiento entre los paneles limpios y con polvo.

La figura 5 muestra la corrida experimental de los arreglos 1 y 3 al 5 de Julio de 2016. Las pruebas se realizaron con 8 paneles por arreglo y se observa que durante las primeras horas el A3 tiene una producción de un 20% menos que A1, esto se debe a que los últimos paneles se encuentran sombreados parcialmente y conforme el movimiento aparente del sol, la producción de A3 sube hasta que a las 13:50 desaparece el sombreado. A partir de esta hora y hasta las 16:20 no se tienen sombreados y el delta promedio es de 8%. Luego se da una caída gradual por sombreado, pero ahora en A1, a tal punto que la generación en A3 es mayor después de las 16:45.

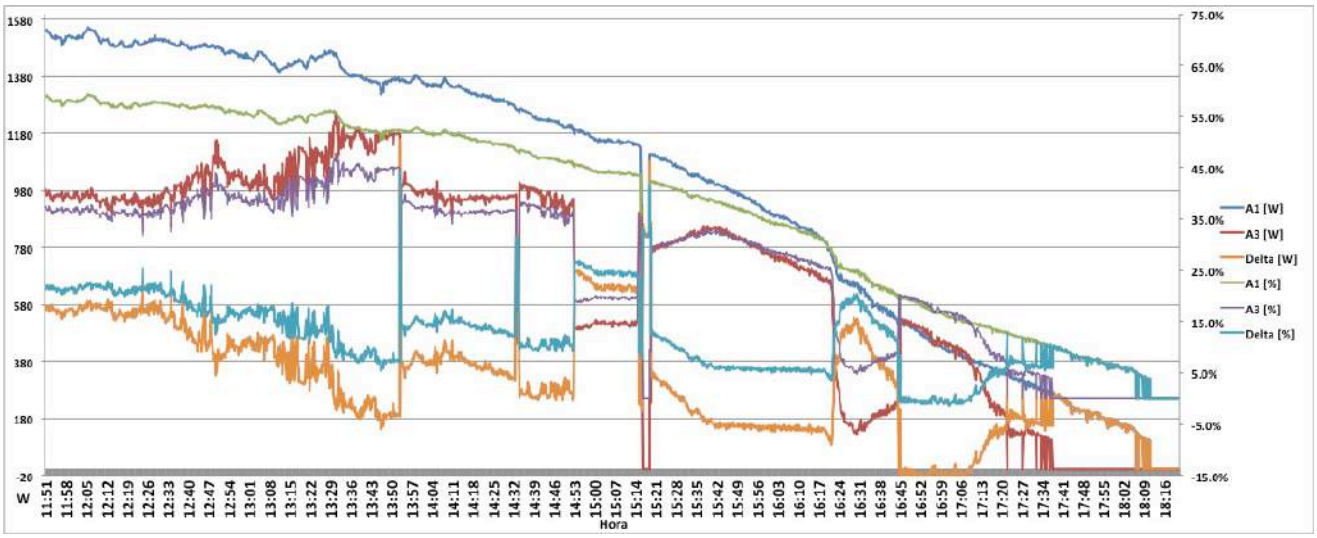


Figura 5, Pruebas experimentales con sombreado y 8 paneles en cada arreglo.

La corrida experimental con 6 paneles por arreglo(ver figura 6), se observa una diferencia constante entre las 14:24 y las 17:27, dando un promedio aproximado de 15% mas generación en A1 con paneles limpios que el A3 con paneles sucios. Entre las 17:31 y las 17:43 se muestra como A3 empieza a generar mas que A1 por cuestiones de sombreado. Analizando datos puntuales se observa que los paneles de

A1 producen en promedio un 40% menos debido a que se encuentra a 69 °C y 860 W/m^2, este resultado se observa al aplicar la ecuación 1 y compáralo con la capacidad instalada.

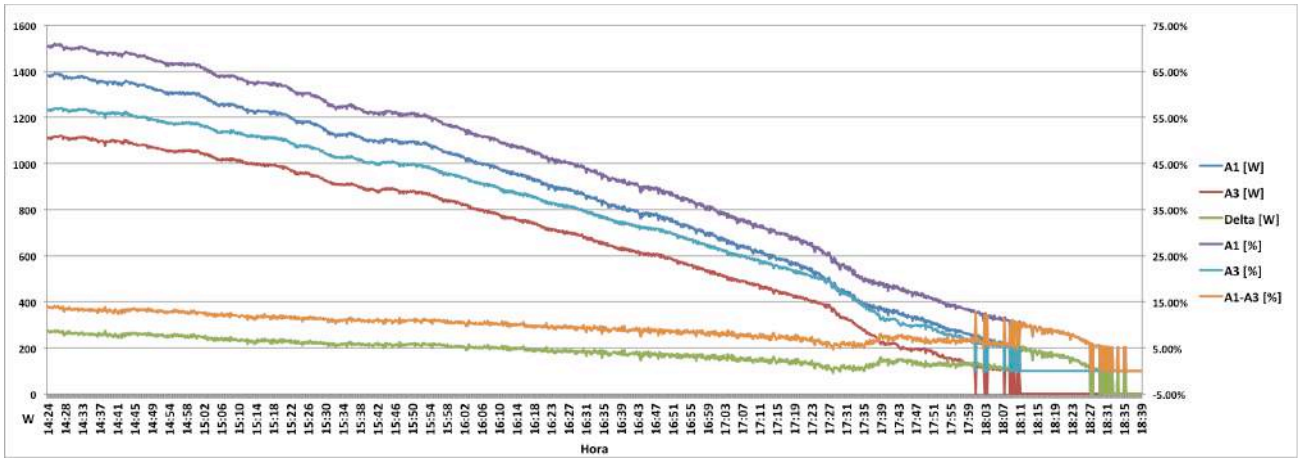


Figura 6, Pruebas experimentales con 6 paneles por arreglo.

La ecuación 1 uno da como resultado la potencia máxima de un panel en condiciones de operación, donde la radiación es la incidente en el panel (W/m^2), la eficiencia es la cantidad de energía solar que puede convertirse en energía electica (%), el Área es espacio de captación de radiación que tiene el panel (m^2), el DeltaTemperatura es la diferencia entre la temperatura ambiente nominal y la temperatura del panel (°C) y la potenciaPico es la potencia máxima que puede dar el panel en STC.

Ecuación 1, potencia máxima

$$Pmax = \left(Radiación * Eficiencia * Área\right) + \left(DeltaTemperatura * Coef * PotenciaPico\right)$$

Conclusiones

A partir de los resultados se llega a las siguientes conclusiones sobre el comportamiento de paneles fotovoltaicos mono cristalinos bajos condiciones de operación naturales:

- Las temperaturas del panel alcanzadas durante verano afectan en promedio un 40% de la capacidad de producción en base a la capacidad instalada.
- El sombreado parcial durante el día, provocado por arboles o estructuras aledañas a la instalación fotovoltaica, puede disminuir en promedio un 10% de la generación.
- El polvo acumulado durante un periodo de 3 meses puede afectar en promedio un 15% de la generación, visto desde una acumulación natural por la condiciones climáticas de la región. En trabajos futuros se espera revisar el espesor del polvo para poder extrapolar los resultados.
- La limpieza de los paneles de manera mensual utilizando micro fibra y agua potable es optima para mejor el rendimiento del sistema sin la necesidad de equipo especializado.
- Un correcto estudio de instalación FV debe contemplar los impactos en el decaimiento por temperatura y un estudio de sombras para no tener perdidas por sombreados parciales durante el día. Aunando a un mantenimiento de limpieza para obtener el mejor aprovechamiento de estas tecnologías.

Referencias bibliográficas

Fossati, J.P., 2011. Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica, núm. 9 13–20.

IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, 2011. . IEEE Std 15474-2011 1–54. doi:10.1109/IEEESTD.2011.5960751
Mohammed, Y.S., Mustafa, M.W., Bashir, N., 2014.

Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues. Renew. Sustain. Energy Rev. 35, 527–539. doi:10.1016/j.rser.2014.04.022

Neves, D., Silva, C.A., Connors, S., 2014. Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: A review on case studies. Renew. Sustain. Energy Rev. 31, 935–946. doi:10.1016/j.rser.2013.12.047

Off-grid: an end to diesel dependency?, 2012. . Renew. Energy Focus 13, 14–15. doi:10.1016/S1755-0084(12)70127-8

Shivarama Krishna, K., Sathish Kumar, K., 2015. A review on hybrid renewable energy systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 52, 907–916. doi:10.1016/j.rser.2015.07.187

Siddaiah, R., Saini, R.P., 2016. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 58, 376–396. doi:10.1016/j.rser.2015.12.281

Zomers, A., 2014. Remote Access: Context, Challenges, and Obstacles in Rural Electrification. IEEE Power Energy Mag. 12, 26–34. doi:10.1109/MPE.2014.2315916

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH! TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO Y SÍNTESIS DE UN FOTOÁNODO ZnO/AuCu/PEDOT:PSS PARA SU POSIBLE APLICACIÓN EN CELDAS FOTOELECTROQUÍMICAS

Paola Israde Burrola[1], Lourdes Isabel Cabrera Lara[2]

[1]Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. C.U. Toluca, Estado de México, México. C.P.50110. Teléfono: +52 (722) 2154512. **paoisrade@hotmail.com**.
[2]Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEMex-UNAM. Km. 14.5 Carretera Toluca-Atlacomulco. Toluca, Estado de México, México. C.P. 50200. Teléfono: +52 (722) 2766610 ext. 7730. **lourisa@unam.mx**

RESUMEN

El uso de celdas solares promete tener un gran alcance en los próximos años. Hasta ahora su comercialización se ha limitado debido a una gran cantidad de inconvenientes que estos presentan, tales como los altos costos de fabricación e instalación y su baja eficiencia. Tomando en consideración estas desventajas se busca diseñar un fotoánodo que permita la generación de electricidad con mayor eficiencia con costos menores y métodos de obtención sencillos. Se plantea la fabricación de ánodos de PEDOT:PSS/ZnO/AuCu para sistemas fotoelectroquímicos con fin de mejorar la eficiencia de conversión de energía de los dispositivos fotoeléctricos por medio del uso de diferentes nanopartículas de óxidos metálicos semiconductores como ZnO y nanopartículas de metales nobles como Au y Cu sobre electrodos de PEDOT. Estos materiales pueden mejorar el comportamiento de celdas fotovoltaicas, ya que su morfología unidimensional permite incrementar el transporte electrónico y disminuir el fenómeno de recombinación de pares electrón-hueco al manipular el tamaño de partícula. Se utilizaron metodologías electroquímicas y de química coloidal para desarrollar estos sistemas. Así, el estudio comprende una búsqueda de las mejores condiciones para preparar un electrodo de nanopilares de ZnO sobre PEDOT con nanopartículas de AuCu. Se exploran las propiedades ópticas, eléctricas y de transporte de carga obtenidas en distintas condiciones experimentales, por medio de métodos de caracterización como análisis termogravimétrico, espectroscopia de luz infrarroja, entre otros. Los resultados obtenidos muestran la formación de nanopartículas bimetálicas AuCu que serán incrustadas en los nanopilares de ZnO para aumentar la eficiencia del sistema.

Palabras claves: *nanopartículas, semiconductores, celda solar, fotoánodo, eficiencia*.

ABSTRACT

The use of solar cells has compelling promises in the coming years. Until now, its marketing has been limited due to a lot of problems they face, such as the high costs of manufacture and installation and low efficiency. Taking into consideration these disadvantages, the design of a photoanode that allows electricity generation more efficiently with lower costs and simple procurement methods is highly desirable. It is proposed the anode manufacture of PEDOT:PSS/ZnO/AuCu for photoelectrochemical systems to improve the efficiency of energy conversion of photoelectric devices by using different semiconductor nanoparticles metal oxides such as ZnO and noble metal nanoparticles including Au and Cu on PEDOT electrodes. These materials can improve the performance of photovoltaic cells, since its dimensional morphology allows to increase electron transport and reduce the phenomenon of electron-hole recombination to manipulate the particle size. Electrochemical and colloidal methods were used to develop these systems. Thus, the study includes a search for the best conditions to prepare an electrode of ZnO nanorods on PEDOT with nanoparticles of AuCu. Optical, electrical and charge transport properties obtained under different experimental conditions were explored, through characterization methods such as thermogravimetric analysis, infrared light spectroscopy, among others. The results show the formation of bimetallic AuCu nanoparticles to be embedded in the ZnO nanorods to increase system efficiency.

Keywords: *nanoparticles, semiconductor, solar cell, photoanode, efficiency*

INTRODUCCION

El uso de celdas solares y en particular el de las celdas solares basadas en colorante (DSSC) en la vida cotidiana promete tener un gran alcance en los próximos años, a pesar de su corto periodo de vida y su baja eficiencia de conversión eléctrica. Tomando en consideración estas desventajas se busca diseñar un fotoánodo que permita la generación de electricidad con mayor eficiencia a costos menores y métodos de obtención sencillos.

La búsqueda de dispositivos fotoelectroquímicos que empleen materiales rentables, abundantes y de alta estabilidad química y física es de importancia actual, además de ser favorables para el medio ambiente, y el que sean de bajo costo resulta atractivo. La inclusión de nanomateriales en estos dispositivos es atractiva, ya que cumplen con estos requisitos y algunos compuestos con componentes metálicos que presenten el fenómeno de resonancia plasmónica de superficie han sido fuertemente estudiado en los últimos años. Dichas características

pueden ser utilizadas para el diseño de un nuevo fotoánodo utilizando materiales como el semiconductor ZnO, los metales oro y cobre y un recubrimiento de un polímero conductor conocido como PEDOT:PSS.

Nomenclatura

AuCu	Oro y cobre
ITO	Óxido de indio-estaño
PEDOT:PSS	Polímero conductor de tipo Poli (3,4-etilendioxitiofeno)-poli (estireno sulfonato)
ZnO	Óxido de zinc

ANTECEDENTES

Los semiconductores de óxidos metálicos como lo son los de TiO_2, V_2O_5, WO_3, SnO_2, Cr_2O_3 y ZnO han sido aplicados en las celdas solares tipo Grätzel o celdas sensibilizadas por colorantes. Estos materiales en conjunto con otros como las nanoestructuras metálicas y los colorantes a base de rutenio, constituyen composites que poseen propiedades que incrementan la capacidad de absorción de los fotones incidentes, las cuales no se observan comúnmente en materiales de tamaño mayor a nanómetros [1]. Todos los trabajos que a continuación se presentan, tienen en común lo que ha sido el mayor reto a superar que es el de obtener mayores eficiencias en la transferencia electrónica.

Celdas solares fotoelectroquímicas

Se sabe que las celdas fotoelectroquímicas pueden alcanzar eficiencias entre 15 y 17% [2] y un tipo de celdas solares pertenecientes a esta categoría son las llamadas celdas Grätzel o celdas DSSC (Dye Sensitized Solar Cells). Michael Grätzel utilizó en 1991 un electrodo anódico transparente poroso de TiO_2 nanocristalino cubierto con una monocapa de colorante de rutenio (Figura 1). Cuando la radiación solar atraviesa al electrodo simple, que el colorante absorbe a los fotones (pasando a un estado excitado) y cede un electrón al TiO_2, siendo este momento cuando el colorante se oxida. La monocapa del colorante, contraria al TiO_2, es capaz de absorber un amplio rango del espectro electromagnético pero vuelve a su estado original recuperando el electrón perdido mediante el primer electrodo de vidrio [3]. La monocapa de colorante, contraria al TiO_2, es capaz de absorber un amplio rango del espectro solar y a partir de su estado excitado, puede transferir electrones hacia el TiO_2. El electrolito utilizado (Figura 1) contiene el par redox I^-/I_3^- en un disolvente orgánico [1]. Las celdas Grätzel tienen la ventaja de presentar efecto fotoeléctrico con niveles de radiación relativamente bajos y ser fáciles de sintetizar, al igual de requerir métodos de construcción sencillos [3, 4]. Sin embargo, su eficiencia sigue siendo muy baja de alrededor de 11%, llega a presenta problemas de recombinación y fugas del electrolito líquido [5].

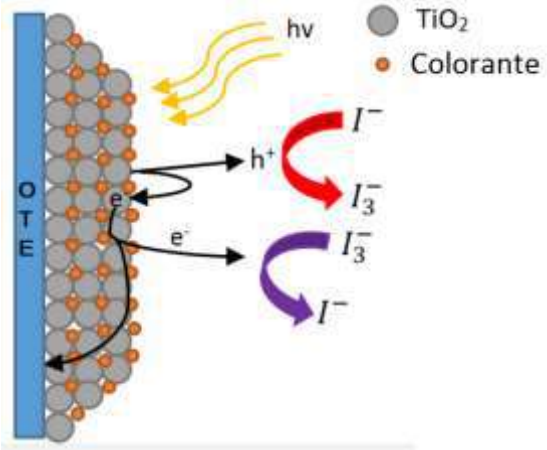


Figura 1. Sistema de un Electrodo ópticamente transparente/TiO_2/colorante y su funcionamiento como fotoánodo en una celda solar Grätzel. Las flechas roja y violeta indican la regeneración (Reacción e^-) de los huecos fotogenerados (h^+) en el sensibilizador (colorante) y los electrones inyectados (e^-) al TiO_2 nanoporoso por el par $I^{3-}|I^-$, respectivamente [1].

Uso de nanocompuestos metálicos en celdas solares

Se sabe que, para mejorar la eficiencia de las celdas solares al evitar la recombinación, es necesaria la introducción de un óxido metálico semiconductor en forma de nanopartículas, como puede ser el TiO_2, ZnO y ReO_3 y dependiendo de su morfología unidimensional y tamaño se puede aumentar el transporte electrónico y disminuir el fenómeno de recombinación de pares electrón-hueco [6-8]. Uno de los óxidos más utilizados como ánodo semiconductor en celdas fotovoltaicas es el de TiO_2, que llega a tener eficiencias del 11%; no obstante, es complicado hacer crecer anisotrópicamente estructuras ordenadas de dicho material, pues se requieren temperaturas muy altas para su síntesis y es un proceso costoso [7, 8].

Se han depositado metales nobles en semiconductores con el fin de favorecer la separación de electrón – hueco y evitar la rápida recombinación. Dicho proceso puede mejorar la eficiencia catalítica [6]. Algunos de los nanocompuestos metálicos depositados en el semiconductor de ZnO son ZnO/Pt [6], ZnO/Au [6, 9], ZnO/Pd [10] y ZnO/Ag [10]. Estudios como el de Huang *et al*., (2011) demuestran que el óxido de zinc en su forma de nanopilares ha obtenido resultados extraordinarios en aplicaciones de celdas fotovoltaicas [11], además que la morfología de las nanoestructuras pueden determinar la eficiencia de la celda fotovoltaica, siendo ésta mayor cuando su arreglo es en forma vertical [7].

JUSTIFICACION

El uso de celdas solares y en particular el de las celdas solares basadas en colorante (DSSC) en la vida cotidiana promete tener un gran alcance en los próximos años, a pesar de su corto periodo de vida y su baja eficiencia de conversión eléctrica. Tomando en consideración estas desventajas se busca diseñar un fotoánodo que permita la generación de electricidad con mayor eficiencia a costos menores y métodos de obtención sencillos.

La búsqueda de dispositivos fotoelectroquímicos que empleen materiales rentables, abundantes y de alta estabilidad química y física es de importancia actual, además de ser favorables para el medio ambiente, y el que sean de bajo costo resulta atractivo. La inclusión de nanomateriales en estos dispositivos es atractiva, ya que cumplen con estos requisitos y algunos compuestos con componentes metálicos que presenten el fenómeno de resonancia plasmónica de superficie han sido fuertemente estudiado en los últimos años. Dichas características pueden ser utilizadas para el diseño de un nuevo fotoánodo utilizando el semiconductor ZnO y los metales oro y cobre.

HIPOTESIS

Un fotoánodo cuya arquitectura integra nanoestructuras de óxido de zinc y nanopartículas de oro-cobre sobre un sustrato de vidrio recubierto con oxido de indio-estaño (vidrio-ITO) puede ser obtenido mediante técnicas electroquímicas y coloidales para su futuro empleo como fotoánodos en celdas fotoelectroquímicas.

MATERIALES Y METODOLOGIA

Este trabajo se llevó a cabo en cinco etapas, consistiendo la primera en la síntesis de nanopartículas de AuCu, seguido de la síntesis de nanoestructuras de ZnO y crecimiento de nanopilares de ZnO, posteriormente la construcción del sistema ZnO/AuCu y finalmente, la deposición del material semiconductor PEDOT:PSS.

1. Síntesis de nanopartículas bimetálicas de oro y cobre (AuCu)

En esta síntesis se utilizó como precursor ácido tetracloroáurico (III) trihidratado ($HAuCl_4\,3H_2O$) (Sigma Aldrich, 99% de pureza), el cual es un material sensible a la luz y a cambios de temperatura, por lo que debe estar resguardado en un lugar oscuro y con temperatura controlada. De igual manera, dicho compuesto es altamente higroscópico[1], por lo cual, se manipuló bajo atmósfera inerte [12]. Para ello, se metió en una bolsa de atmósfera inerte una báscula electrónica, una espátula de plástico (para evitar contaminación de $HAuCl_4\,3H_2O$ con el metal de una espátula de acero inoxidable) y el material a pesar; posteriormente se cerró la bolsa y se purgó tres veces con N_2 gaseoso para eliminar la presencia de agua atmosférica. En un matraz bola se mezclaron 1.5 ml de ácido oléico (Sigma Aldrich, 99% de pureza) con 3.5 ml de oleilamina (Sigma Aldrich, 70% de pureza, grado técnico) y se calentó a 80°C bajo agitación constante. Paralelamente, 32 mg de $HAuCl_4\,3H_2O$ se añadieron a 1 ml de la mezcla oleilamina: hexano 1:1 v/v. Después, se agrega a la primera mezcla bajo N_2. La mezcla de reacción cambió de color amarillo (figura 2-a) a un color vino oscuro (figura 2-b).

Por otro lado, 16 mg de acetato de cobre monohidratado ($Cu(CH_3COO)_2$) (Sigma Aldrich, 99% de pureza) se disolvieron en 1 ml de la mezcla oleilamina: hexano 1:1 v/v y se adicionó a la mezcla de reacción, y nuevamente cambió su coloración a morado oscuro. La temperatura se incrementó a 120°C y se mantuvo a esta condición por 20 minutos. Posteriormente, la temperatura se incrementó a 300°C durante 80 minutos [13]. Finalmente, la mezcla se dejó enfriar y las partículas se lavaron con etanol.

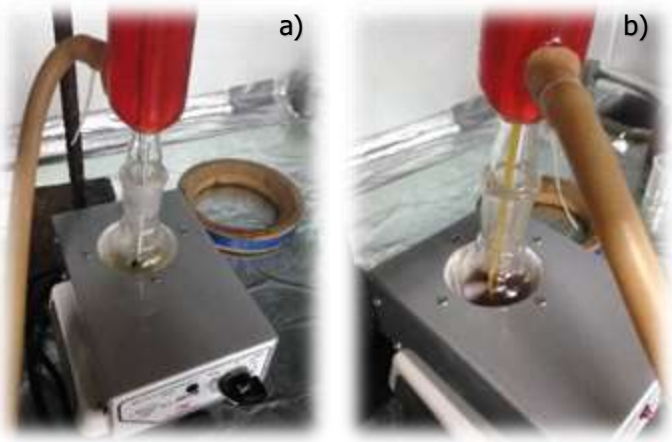


Figura 2. a) Mezcla de oleilamina y ácido oléico a 80°C y b) al agregar el $HAuCl_4\,3H_2O$ y aumentar la temperatura a 120°C, cambia su color a vino oscuro.

2. Deposición de película de ZnO

El siguiente paso del proceso es la síntesis de nanoestructuras de ZnO, las cuales requieren primeramente de la electrodeposición de una película de dicho compuesto sobre un sustrato de vidrio-ITO, que sirve como base para que se propicie el crecimiento de las nanoestructuras de ZnO.

[1] Capaz de absorber humedad del medio.

Para lograr el depósito de la película de ZnO sobre el sustrato de vidrio-ITO, se preparó una disolución precursora que contiene 0.151 g de nitrato de zinc hexahidratado ($Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$) (Sigma Aldrich, 98% de pureza) y 0.745 g de cloruro de potasio (KCl) (Sigma Aldrich, 99% de pureza) aforadas en un recipiente de 100 ml con agua desionizada. Dicha disolución se utilizó como electrolito soporte. El sistema electroquímico consistió en un arreglo de dos electrodos, donde el CE (ánodo) es el Pt y el WE (cátodo) es la placa de vidrio-ITO. La distancia entre ambos electrodos es entre 5 y 10 mm, lo que permitió que el intercambio iónico fuera eficiente. Se empleó una fuente de poder de corriente directa (DC) para llevar a cabo la electrodeposición. El sistema de dos electrodos se ensambla, donde la cara conductora de WE se coloca de frente al CE . En los electrodos se conectan las terminales de la fuente, aplicando un volaje entre ambos electrodos de 1.8 V durante una hora (figura 3).

Figura 3. Configuración del sistema electroquímico para la de electrodeposición de película de ZnO.

Terminado el tiempo de electrodeposición, se limpió el WE sometíendolo a ultrasonido por pulsos durante 10 minutos en un recipiente con agua desionizada.

3. Síntesis de nanoestructuras de ZnO

Se usó un sistema de tres electrodos utilizando como RE el ESC, como CE la lámina de Pt y el WE el electrodo sobre el cuál se depositó previamente la película de ZnO. El electrolito soporte consistió de una disolución 5 mM de $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ y óxido de polietileno (OPE) (Sigma Aldrich, Mv 100,00) al 1%. Una vez montado el sistema, se llevó a una temperatura de 80°C, empleando un baño de aceite (figura 4), asistiéndose de un termopar para monitorear la temperatura durante el tiempo de reacción de una hora.

Figura 4. Transferencia de calor del aceite hacia el electrolito soporte.

Para evitar la formación de burbujas de aire durante el calentamiento del sistema, se aplicó agitación magnética a baja velocidad durante todo el proceso de electrodeposición. La electrodeposición se logra empleando la técnica de cronoamperometría utilizando potenciostato-galvanostato Autolab PGSTAT100 aplicando un potencial constante de -0.9 V vs ESC durante 3600 s.

4. Anclaje de nanopartículas de AuCu en nanoestructuras de ZnO

Se preparó una suspensión que contiene 0.5 ml de nanopartículas de AuCu obtenidas previamente y dispersadas en 12 ml de hexano. El electrodo vidrio-ITO/ZnO se sumergió en el sobre la suspensión durante un tiempo definido, habiendo primero retirado el cable de cobre, la resina de plata y el esmalte. Los tiempos de inmersión estudiados fueron 1, 5, 10, 20 y 30 s. (figura 5).

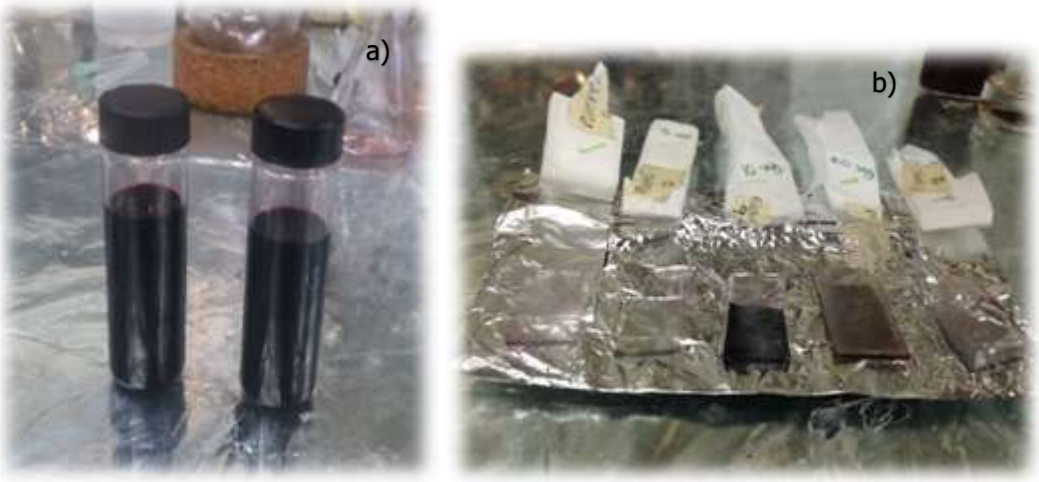


Figura 5. a) Suspensión de nanopartículas en hexano; b) electrodos de vidrio-ITO/ZnO/AuCu sumergidos durante 1, 5, 10, 20 y 30 segundos (de izquierda a derecha).

5. Recubrimiento del sistema con PEDOT:PSS

Se añaden 20 μL de PEDOT:PSS sobre el sistema fotoanódico y se somete a spin coating a 400 rpm durante 30 s. Después el sistema se deja secar a 110 °C durante 30 min.

RESULTADOS

Para poder identificar la naturaleza de funcionalización superficial del sistema creado, fue necesario hacer las respectivas caracterizaciones para cada una de las etapas antes mencionadas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

1. **Caracterización de nanopartículas de AuCu:**
   - **Espectroscopía infrarroja:** permite obtener detalles sobre los grupos funcionales de cualquier molécula orgánica presente. En el espectro de FTIR se muestran las señales para sustancias orgánicas presentes en la superficie de las nanopartículas de AuCu, que en este caso se trata de oleilamina y ácido oleico, cuyos números de onda más representativos correspondiente al metil asimétrico ($-CH_3$) que se encuentra alrededor de los 2955 cm^{-1} y también para el número de onda del metileno asimétrico ($-CH_2$) que aparece en los 2925 cm^{-1}.
   - **Espectroscopia UV-VIS:** Las nanopartículas de AuCu se pueden identificar fácilmente por medio de espectroscopia UV-VIS debido a que la resonancia plasmónica de superficie de cada elemento produce un espectro de extinción que está en función del tamaño y forma de las nanopartículas. Considerando que la banda del plasmón de superficie característico del cobre se localiza a partir de los 560 nm y la del Au, a partir de los 520 nm [4], el valor de un material bimetálico conformado por oro y cobre mostrará una respuesta (y no dos), ya que se trata de una interacción sinérgica entre ambos elementos [14].
   - **Voltamperometría cíclica:** Con la finalidad de determinar si las nanopartículas poseen oro y cobre en su estructura, se procedió a realizar un análisis electroquímico, empleando la técnica de voltamperometría cíclica en el que se varían el electrolito soporte (como $HClO_4$ y KNO_3), así como el potencial y la corriente en un periodo determinado de tiempo.
   - **Análisis termogravimétrico:** (TGA), se pudo determinar la proporción de masa orgánica presente en la superficie de las nanopartículas de AuCu, pues éste es un método térmico que nos ayuda a volatilizar los componentes en una muestra, mostrados en forma de degradaciones.
   - **Calorimetría de barrido diferencial:** mide principalmente la entalpía en una muestra [15]. Las curvas de barrido diferencial brindan señales que se desvían de la línea base y pueden ser endotérmicas o exotérmicas, que, en conjunto con el TGA, nos proporciona datos sobre los elementos absorbidos en una muestra.
   - **Difracción de rayos X:** nos proporciona datos confiables en cuanto a los picos de difracción correspondientes para determinar la fase cristalina en la muestra. Por el tipo de distribución de los picos se puede predecir que la estructura cristalina que se obtuvo corresponde a una cúbica centrada en las caras (FCC), como se podía suponer por la estructura característica de Au y Cu.

2. **Caracterización de nanoestructuras de ZnO:**
   - **Microscopia electrónica de barrido:** Se realizó la caracterización morfológica y dimensional de las nanoestructuras de ZnO mediante SEM. Se puede observar una morfología de pilares hexagonales con una distribución homogénea sobre la película, y cuyo diámetro promedio es de 348 nm con una desviación estándar (σ) de 54 nm. (figura 6).
   -

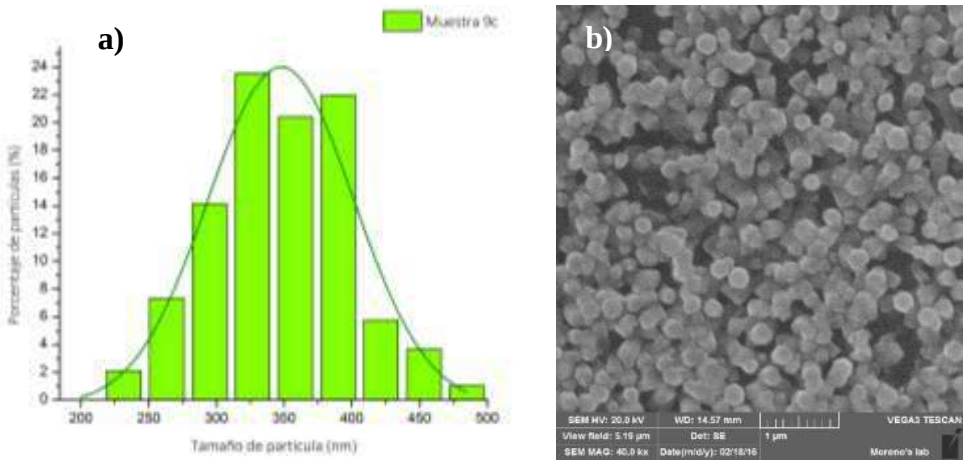


Figura 6. (a) Distribución de tamaño del diámetro de nanoestructuras de ZnO (b) SEM obtenido con un Ei=-0.9 V vs ESC, un tiempo t=3600 s. y una temperatura T=80°C para obtener las estructuras de ZnO.

3. **Caracterización del sistema ZnO/AuCu:**
   - **Espectroscopia UV-VIS:** Se muestran señales del plasmón que rondan entre los 340 nm, que, aunque está alejado al valor correspondiente de la resonancia plasmónica de superficie de nanopartículas de Au, se puede deber a la cantidad de partículas dispersas sobre las nanoestructuras de ZnO.
   - **Difracción de rayos X:** Los difractogramas de XRD se obtuvieron para poder determinar la fase cristalina de las estructuras de ZnO/AuCu, que presentan la estructura de la Zincita, comparada con la tarjeta JPDC 70-2551.
   - **Microscopia electrónica de barrido:** se pudo calcular la densidad de población dependiendo del tiempo de deposición de AuCu en las nanoestructuras de ZnO (figura 7).

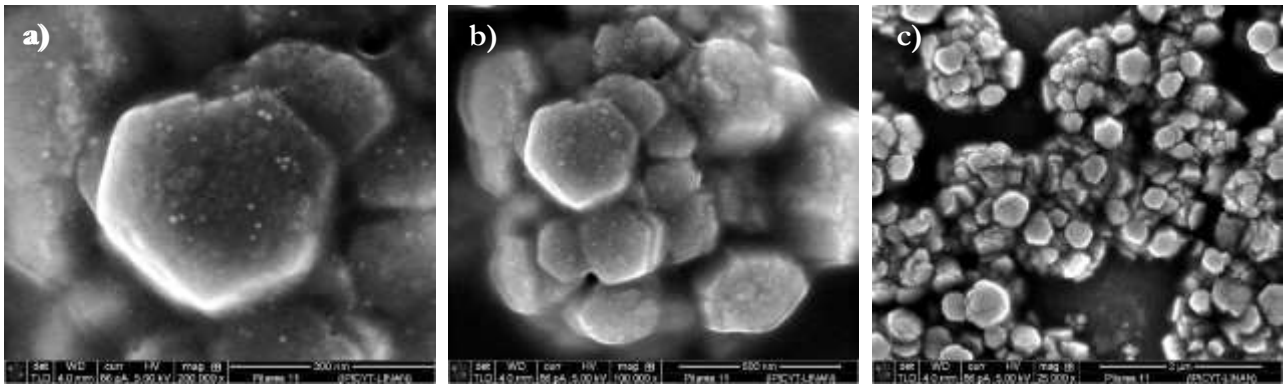


Figura 7. Cantidad de nanopartículas AuCu ancladas en las nanoestructuras de ZnO con una amplificación a) 200,000 X, b) 100,000 X y c) 25,000 X a un tiempo de deposición de 1s.

CONCLUSIONES

El crecimiento de las nanopartículas de AuCu se logró mediante el método propuesto por Yu *et al*., (2015). El tamaño promedio de nanopartículas obtenidas ronda en los 10 nm. Los métodos de caracterización permitieron suponer que la estructura de las nanopartículas probablemente sea de núcleo-coraza con la naturaleza Au@$AuCu_3$. La electrodeposición de nanoestructuras de ZnO sobre una película de ZnO fue lograda, y dichas nanoestructuras consistieron de placas hexagonales ordenadas, de tal forma que generaron estructuras esféricas compactas. Para el anclaje de las nanopartículas de $AuCu_3$ sobre las nanoestructuras de ZnO, las mejores condiciones son obtenidas cuando se emplea una suspensión coloidal diluida en una relación 24:1 de isopropanol y nanopartículas $AuCu_3$, respectivamente, y sometiendo el sistema de nanoestructuras de ZnO a una rotación mecánica durante trot = 5 s. Dichas nanopartículas se encuentran distribuidas sobre las nanoestructuras de ZnO. Finalmente, el fotoánodo se construyó de manera exitosa, económica y sustentable. La inclusión del recubrimiento con el polímero conductor de PEDOT:PSS (Poli (3,4-etilendioxitiofeno)-poli (estireno sulfonato)), (que es un polímero transparente, conductivo y altamente dúctil) podría ser de gran utilidad para el sistema, pues éste polímero es un buen transportador de huecos que evita la recombinación, lo que es deseable en una aplicación para celdas solares [16] y para los fines de este trabajo, se podría complementar al actual electrodo de vidrio-ITO/ZnO/AuCu.

REFERENCIAS

1. Pareja-Rivera, C.C., *Diseño de un ánodo modificado con nanopartículas de óxido de Zinc y nanopartículas de oro para su empleo en celdas fotoelectroquímicas*, in *Facultad de Química*. 2014, Universidad Autónoma del Estado de México. p. 109.
2. Green, M.A., et al., *Solar cell efficiency tables (version 42).* Progress in Photovotaics: Research and Applications, 2013. **21**(5): p. 827-837.
3. Vela, P.C.C. and E.R. Rangel, *Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural.* Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2012. **56**: p. 3-10.
4. González-Mendoza, L., *Diseño de un fotoánodo para celdas fotoelectroquímicas empleando técnicas electroquímicas.*, in *Facultad de Química*. 2014, Universidad Autónoma del Estado de México. p. 108.
5. O'Boyle, N.M., C.M. Campbell, and G.R. Hutchison, *Computational Design and Selection of Optimal Organic Photovoltaic Materials.* The Journal of Physical Chemestry, 2011. **115(32)**: p. 16200-16210.
6. Lee, M.-K. and H.-F. Tu, *Au–ZnO and Pt–ZnO Films Prepared by Electrodeposition as Photocatalysts.* Journal of The Electrochemical Society, 2008. **155 12** p. D758-D762.
7. Zhang, R., et al., *High-Density Vertically Aligned ZnO Rods with a Multistage Terrace Structure and Their Improved Solar Cell Efficiency.* Crystal growth & design, 2008. **8(2)**: p. 381-383.
8. Bhat, S.V., S.B. Krupanidhi, and C.N.R. Rao, *A Comparative Study of the Effect of Metallic Au and ReO3 Nanoparticles on the Performance of Silicon Solar Cells.* Applied Physics Express, 2010. **3**.
9. A.I. Ryasnyanskiy, B.P., S. Debrus, U. Pal, A.L. Stepanov, *Optical nonlinearities of Au nanoparticles embedded in a zinc oxide matrix.* Optics Communications, 2007. **273**: p. 538-543.
10. Kuriakose, S., et al., *Enhanced photocatalytic activity of Ag–ZnO hybrid plasmonic nanostructures prepared by a facile wet chemical Method.* Beilstein Journal of Nanotechnology, 2014. **5**: p. 639-650.
11. Jia Huang, a.Z.Y.a.Q.Z., *Applications of ZnO in organic and hybrid solar cells.* Energy & Environmental Science, 2011. **4**: p. 3861-3877.
12. Merck, *Ficha de datos de seguridad*, M. KGaA, Editor. 2004: Darmstadt, Alemania. p. 1-6.
13. Yu, T., et al., *Evaluation of Heat Treatment Effects on the Electrocatalytic Properties of AuCu Intermetallic Nanocrystals.* Journal of The Electrochemical Society, 2015. **162(6)**: p. H301-H307.
14. Bracey, C.L., P.R. Ellisb, and G.J. Hutchings, *Application of copper gold alloys in catalysis current status and future perspectives.* The Journal Society of Chemestry, 2009. **38**: p. 2231-2243.
15. Sánchez, L., *Análisis térmico: TG y DTA* 2008, Universidad de Córdoba.
16. Stapleton, A.J., et al., *Planar silver nanowire, carbon nanotube and PEDOT:PSS nanocomposite transparent electrodes.* Science and Technology of Advanced Materials, 2015. **16**: p. 1-7.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

"SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED DE 2.5 kW_p DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO"

R. Acosta O.*, J. O. Aguilar A., R. Barbosa P., F. Chan P., J. Hernández R., J. E. Pinelo B. y V. Sánchez H.
División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019
Tel 01 (983) 83 5 03 89
* racosta@uqroo.edu.mx

RESUMEN

Se presenta el diseño y puesta en operación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red de 2.5 kW_p en la Universidad de Quintana Roo (UQROO), el trabajo está estructurado en cuatro secciones: en la primera sección se describe la importancia de la implementación de energías renovables en México, en donde últimamente se han desarrollado estrategias nacionales con estos propósitos. Estas estrategias se abordan únicamente con el propósito de enfatizar el uso de las energías renovables. Adicionalmente se presentan las particularidades de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (componentes y características).

En la segunda sección se describen el diseño y las características de cada uno de los elementos que componen el sistema fotovoltaico interconectado, se presentan los planos realizados en 3D. Asimismo se describe el proceso del montaje de las bases y la estructura soporte de los módulos fotovoltaicos, así como el diseño de la instalación eléctrica (cableado y protecciones). En la tercera sección se documenta y describe el proceso de construcción de la base y estructura, así como la instalación de cada uno de los componentes y posteriormente se realiza un análisis y estimación de la energía que podría generar el sistema bajo condiciones locales. Finalmente en la última sección, se dan las conclusiones de este trabajo.

Palabras claves: Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, Universidad de Quintana Roo.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las fuentes de energía renovables se encuentran la energía solar fotovoltaica, que consiste en la transformación directa de la energía luminosa en energía eléctrica. Para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, normalmente se utiliza un arreglo de módulos fotovoltaicos conectados entre sí en paralelo o en serie. A este arreglo de módulos se le conoce como sistema fotovoltaico, y es como cualquier otro sistema de generación de energía eléctrica. Además, los principios de operación e interconexión de estos sistemas con otros sistemas eléctricos son los mismos y están guiados por normas y códigos bien establecidos.

Los sistemas fotovoltaicos, están clasificados en dos tipos: los sistemas islas o aislados, que no tiene conexión con la red eléctrica convencional; y los sistemas interconectados a la red, que en realidad son unidades o centros de generación de energía eléctrica conectadas a la red.

De estos dos sistemas, actualmente se destacan los sistemas fotovoltaico interconectados a la red. Los cuales consisten en generar energía eléctrica mediante módulos solares fotovoltaicos e inyectarla directamente a la red de distribución eléctrica. Desde 2007 la legislación mexicana permite a cualquier usuario residencial o comercial del sistema eléctrico nacional el generar su propia electricidad, mediante el uso de sistemas solares, interconectándose a la misma red eléctrica para intercambiar energía con ella, éstos son ideales para bajar el tipo de tarifa eléctrica en residencias, comercios o empresas con altos consumos eléctricos. El límite es 10 kW en uso residencial y 30 kW en uso comercial, con lo cual se abre la posibilidad a cualquier ciudadano de contribuir con su generación, desde una fracción hasta la totalidad de su consumo eléctrico, pagando a la compañía eléctrica únicamente la porción de energía no generada por el Sol[1].

De lo anterior se puede ver que los sistemas fotovoltaicos interconectados, son una herramienta valiosa para alcanzar lo planteado en la Estrategia Nacional de Energía 2013-2027, en la cual se promueve la sustentabilidad a largo plazo del sector energético nacional, la mitigación de los impactos negativos que la producción y el consumo de energéticos puedan tener sobre la salud y el medio ambiente e incluyendo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. A demás, en este documento se menciona que por mandato legal para el año 2024 se deberá generar el 35% de la electricidad a partir de fuentes de energías de origen no fósil. Y en este mismo orden, la Estrategia Nacional de Energía, como líneas de acción plantea: el fortalecimiento de capacidades técnicas para el desarrollo de proyectos de ahorro energía y de energías renovables de gobiernos estatales y municipales; y el fomento al desarrollo de recursos humanos

[1] Información obtenida del portal web de la Comisión Federal de Electricidad (www.cfe.gob.mx).

especializados para la innovación tecnológica y aprovechamiento de las energías renovables, tanto en aplicaciones eléctricas como térmicas.

Por lo anterior la Universidad de Quintana Roo, a través de su programa educativo de Ingeniería en sistemas de energía se propuso el diseñar y poner en operación un sistema fotovoltaico interconectado a la red (SFVI) de 2.5 KW_p, con el fin de que los alumnos y profesores realicen prácticas e investigaciones en este sistema.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED

Se llaman así porque están interconectados a la red eléctrica, es decir la energía generada por los módulos solares fotovoltaicos se inyecta directamente a la red de distribución eléctrica de la localidad, es decir que operan en paralelo con la red eléctrica (Figura 1).

Estos sistemas en ocasiones son más económicos, ya que no necesitan de un banco de baterías, que en ocasiones son los dispositivos más costosos del sistema aislado y los que mayor mantenimiento requieren.

Para los sistemas interconectados, se tiene que realizar un contrato con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que verifica que todo el sistema cumpla con las regulaciones establecidas, ya que la energía que se genera se conecta a la red nacional y es fundamental garantizar su calidad.

Las características de un sistema fotovoltaico interconectado a la red suministradora son:

- Ayudan a los usuarios con tarifa DAC (doméstica de alto consumo) a salir de esa clasificación, reflejándose en ahorros muy importantes de dinero.
- Bajos costos de operación.
- No producen emisiones contaminantes.
- Modularidad (fácil expansión).
- Bajo impacto visual (se puede integrar al entorno).
- Fáciles de operar.

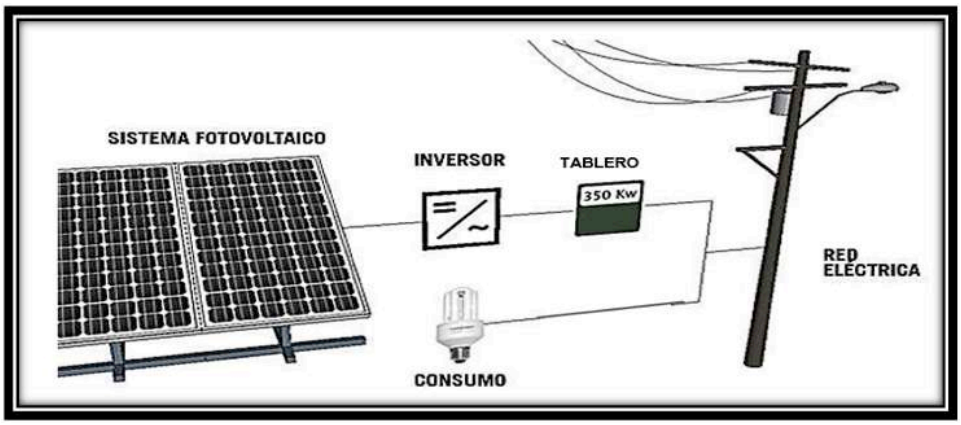


Figura 1. Diagrama de conexión de un sistema fotovoltaico interconectado a la red (http://www.ecosostenible.com/es/eco-servicios/instalacionesenergias-renovables-y-ahorro-energtico_instalaciones-energia-solarfotovoltaica_p36.html).

DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE LA UQROO

La Universidad de Quintana Roo con recursos del Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI) y del Programa de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas (PROFOCIE) adquirió a finales del 2014 el siguiente equipo: 10 módulos fotovoltaicos de 250 Wp cada uno de la marca Solartec modelo S60PC, un inversor de la marca Fronius lG Plus V 3.0−1 de 3 kW de potencia, material métalico para elaborar estructuras, cables y accesorios eléctricos. Cabe hacer mención que se partió de una base de 2.5 kWp de potencia del sistema.

El lugar de la instalación del SFVI es en las instalaciones de la Universidad de Quintana Roo en el campus de Chetumal, en el municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo, México, con las siguientes coordenadas geográficas: latitud Norte $18^{o}\ 52'\ 25''$, y longitud Oeste $88°34'\ 30''$ y una elevación de 1.65 m. En las siguientes secciones se detallaran el proceso del diseño, la construcción y la puesta en operación del SFVI.

Diseño de dados de concreto

Se decidio diseñar una estructura metálica de soporte fija, la cual a su vez estará sujeta a ocho dados de concreto con una distancia entre cada dado de 3 m y con una longitud total de 9 m y 1.26 m de ancho. Cada dado de concreto armado es de 1 m de alto, 0.4 m de ancho y 0.4 m de profundidad. Los dados quedaran enterrados a una profundidad de 0.60 m (figura 2) quedando expuesto 0.40 m sobre el terreno para proteger los anclajes de posbles encharcamientos en caso de lluvia.

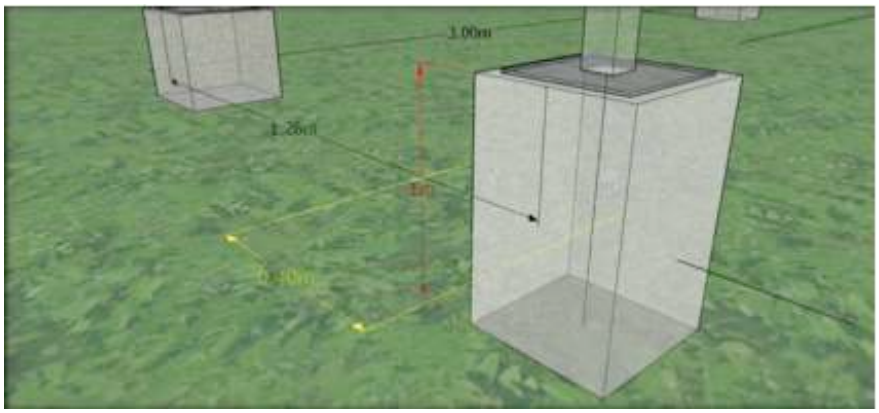


Figura 2. Imagen del diseño 3D de los dados de concreto realizado en Sketch Up Pro 2015 (Pinelo, Jorge 2016).

Diseño de la estructura metálica de soporte

Dadas las condiciones climatologicas del sitio, se requiere que la estructura y la cimentación para el SFVI estén diseñadas y construidas con materiales para minimizar la corrosión, las deformaciones mecánicas, los hundimientos, posibles fallas en la cimentación y situaciones relacionadas con la aerodinámica del arreglo. Se requiere que la estructura y cimentación tengan una vida útil de 20 años como mínimo.

Una vez teniendo los dados de concreto, se pasó al diseño de la estructura, considerando: la orientación y tamaño de los módulos fotovoltaicos (consecuentemente la estructura) y los esfuerzos que genera el viento sobre los modulos fotovoltaicos y sus soportes de aluminio. Despúes de los cálculos realizados, se diseñó la forma en como quedaría el sistema fotovoltaico, para lo cual se utilizó el software SKETCHUP PRO 2015. La estructura que sujetará los módulos fotovoltaicos son perfiles de carril de aluminio colocados por todo el largo del sistema. Para esto se colocaran sobre la tubería PTR los pies en "L" para sostener el arreglo fotovoltaico. En la figura 3 se muestra el proceso de diseño y detalles en 3D del SFVI.

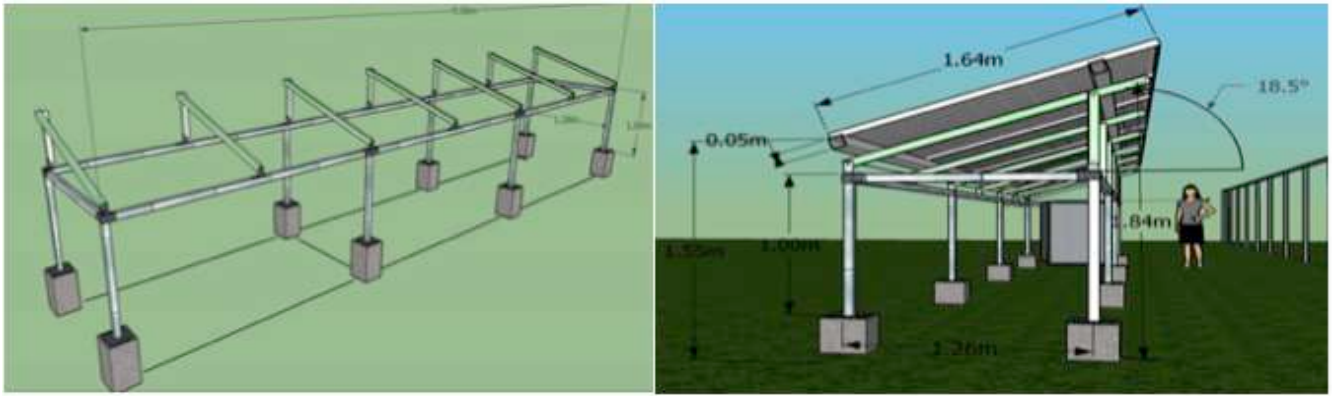


Figura 3. Imágenes del diseño de la estructura metálica de soporte (Pinelo, Jorge, 2016).

MONTAJE DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE LA UQROO

En esta sección se presenta el montaje del SFVI, se inicia con el ensamblado de la estructura de soporte de los módulos fotovoltaicos, esta parte del ensamble es muy importante, ya que soportará el peso de la estructura de aluminio y los módulos fotovoltaicos, en la figura 4 se muestran detalles de este proceso. Y en la figura 6 se observa el proceso de ensamblado de la estructura de aluminio que soporta a los módulos fotovoltaicos.

Figura 4. Fotografías del proceso de ensamble de la estructura de soporte (Pinelo, Jorge 2016)..

Figura 5. Fotografías del proceso de ensamblado de la estructura de aluminio de soporte de los módulos fotovoltaicos(Pinelo, Jorge 2016).

En la figura 6 se muestra unas imágenes de la construcción, ensamblado e instalación de la caseta para la interconexión de los módulos fotovoltaicos y el inversor. En la figura 8 se muestra el proceso de la instalación de los diez módulos fotovoltaicos sobre la estructura de aluminio.

Figura 6. Fotografías del proceso de construcción y forrado del armazón de la caseta de interconexiones y del inversor (Pinelo, Jorge 2016).

Figura 7. Fotografías del proceso de montaje de los módulos fotovoltaicos a la estructura de aluminio (Pinelo, Jorge 2016).

El cálculo para el tamaño de los cables empleados, así como el código de colores de los mismos, se basó de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012. Con base a las necesidades y características del inversor, los diez módulos fotovoltaicos de 250 Wp cada uno, se conectan en serie. En la figura 8 se muestra el proceso de conexión y canalización eléctrica. Posteriormente se conectó el inversor, así como los sistemas de protección y se realizó la puesta a tierra de toda la estructura y módulos fotovoltaicos, en donde se utilizó las varillas de acero cobrizada del tipo Copper Weld (de 5/8" de diámetro y 3m de longitud enterrada de manera vertical. En el sistema fotovoltaico se usó un sistema de tierra con una resistencia no mayor a 25O hms según se especifica en el Art.250-84 de la NOM-001-SEDE-2012. Para la instalación eléctrica se utilizó tubería de PVC conduit de tipo pesado.

Para el cálculo del dimensionamiento del interruptor de CD que se colocará cerca del inversor, se tomó como referencia la corriente nominal en CD de entrada del inversor que es 8.65 A, conforme la Norma (NOM-001-SEDE-2012) se multiplica por el factor (1.25)(1.25) para tener en cuenta la corriente potencial en exceso, por lo queda: Corriente CD total= (8.65 A) (1.25)(1.25)=13.51 A.

Para el cálculo del dimensionamiento del interruptor de CA que se colocara cerca del inversor, se toma como referencia la corriente nominal en AC de entrada del inversor que es 12.5 A, conforme la Norma (NOM-001-SEDE-2012) se multiplica por el factor (1.56) para tener en cuenta la corriente potencial en exceso, por lo que queda: Corriente CA total= (12.5 A) (1.56)= 19.5 A.

Figura 8. Fotografías de la interconexión eléctrica entre los módulos fotovoltaicos (Pinelo, Jorge 2016).

Finalmente se realizarón las pruebas preliminares, en la figura 9 se muestran imágenes del display del inversor con los datos que se están generando: 231 V, 8.02 A y 60 Hz. Cabe mencionar que actualmente se está en proceso de los trámites para la interconexión con la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Figura 9. Fotografías del diplay del inversor en donde se muestra el voltaje, la corriente y la frecuencia que el SFVI está entregando (Pinelo, Jorge 2016).

CONCLUSIONES

Se presentó de manera muy general el proceso del armado, características y componentes del sistema fotovoltaico interconectado a la red de la UQROO, cabe mencionar que el tiempo empleado para el diseño, el armado y puesta en operación fue de seis meses. Y que en todo el proceso se cuido de seguir las normas mexicanas y recomendaciones de los fabricantes, especificamente para la parte eléctrica se empleo la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012. Los siguientes pasos a seguir son la instrumentación del sistema (para su monitoreo), calcular la energía eléctrica generada, compararla con la energía teórica y análisis de comportamiento del inversor (calidad de la energía entregada, entre otras cosas).

Se tiene en operación el sistema fotovoltaico interconectado a la red de 2.5 kWp, el cual se encuentra listo para ser utilizado en prácticas e investigaciones, aumentando la infraestructura física para hacer investigaciones y/o prácticas relacionadas con sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, específicamente en la cuestión de la gestión y calidad de la energía eléctrica generada. Este equipo será usado principalmente por los alumnos y profesores del área de ingeniería en sistemas de energía, ingeniería en redes y la maestría en mecatrónica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero otorgado por la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo, a través de los fondos del PIFI y del Profocie 2014.

REFERENCIAS

Comisión Federal de Electricidad. www.cfe.gob.mx. Consultas en 2015 y 2016.

Enríquez Harper "El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos" (2012). Editorial LIMUSA.

Instituto de Investigaciones Eléctricas (2010). Guía de Usuario Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red Aplicaciones de Pequeña Escala. Cuernavaca, Morelos.

Fronius (2012) Manual de inversores para istalaciones fotovotaicas acopladas a la red.

Robert Foster, Majid Ghassemi y Alma Cota (2010) Solar Energy Renewable Energy and the Environment. CRC Press Taylor and Francis Group.

Perpiñan Lamigueiro, Oscar (2012) Energía solar fotovoltaica. Creative Commons, España.

Pinelo Baños, Jorge Elias (2016) Diseño y puesta en operación del sistema fotovoltaico interconectado a la red de 2.5 kW de la Universidad de Quintana Roo. Tesis para obtener el titulo de Ingeniero en sistemas de energía de la Universidad de Quintana Roo.

NORMA OFICIAL MEXICANA (NOM-001-SEDE-2012), Instalaciones Eléctricas. (2012). Dario official de la federación.

Sánchez Juárez, A. (2013). Especificación técnica para sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica asociados a proyectos productivos agropecuarios. Fideicomiso de Riesgo Compartido, SAGARPA, México.

Sánchez Juárez, A. (s.f). "Estructuras para módulos fotovoltaicos. Universidad Nacional Autónoma de México.

Secretaria de energía (SENER), Estrategía nacional de energía 2013-2027. 2013

Valenzuela Gonzales, J. (2013). Instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica (Análisis, metodología y Recomendaciones para el montaje de una instalacio (Tesis para obtener el título de Ingeniero). Universidad Nacional Autónoma de México.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
VI Congreso Internacional Sobre las Energías Renovables CIER
3 AL 7 DE OCTUBRE HUATULCO - OAXACA ¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar

Micro Redes Aisladas, La Solución Para La Electrificación Rural En México

R. Cota-Soto, N. Velázquez, E. Gonzalez-San Pedro, F. Castellanos-Balderas
Centro de Estudios de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California,
Calle de la normal s/n Col. Insurgentes, Mexicali, B.C., 21280, México, Tel. +52-686-141-23-16, **rodrigo.cota.soto@uabc.edu.mx**

RESUMEN

En México cerca de 325,000 viviendas se encuentran sin acceso a la energía eléctrica. La falta de electricidad tiene un fuerte impacto en las condiciones de vida de una persona, debido a que sin servicio eléctrico varias actividades se vuelven complicadas o incluso casi imposibles de realizar. El gobierno mexicano dentro del plan de desarrollo 2013-2018 (enfoque a necesidades básicas) tiene como uno de sus objetivos el proporcionar electricidad a todas las familias mexicanas. El llevar energía eléctrica a cada vivienda se complica cuando estas se encuentran en comunidades aisladas o alejadas, por lo cual en este documento se muestra una evaluación técnico-económica de las distintas opciones para llevar energía eléctrica a una comunidad aislada. Con esta investigación se busca demostrar el por qué las Micro redes son la mejor opción para la electrificación rural. Tomando como base el proyecto "Micro red sustentable de servicios energéticos comunitarios" realizado por el Centro de Estudio de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la UABC en la comunidad de Puertecitos, Ensenada, Baja California. Las tres opciones evaluadas son extensión de la red eléctrica nacional, la instalación de un generador diésel y la micro red. Los resultados obtenidos revelan que para comunidades que se encuentren a una distancia mayor a 40 km de la red eléctrica nacional la instalación de una micro red se convierte en su mejor opción para satisfacer sus necesidades energéticas.

Palabras claves: Micro redes, Electrificación rural, Sistemas aislados, Sistemas fotovoltaicos, Comunidades aisladas.

ABSTRACT

In Mexico about 325,000 housholds are without access to electricity. The lack of electricity has a strong impact on the living conditions, because without electricity different activities become very difficult or even almost impossible. The Mexican government in the 2013-2018 development plan (approach to basic needs) has as one of his objectives provide electricity to Mexican families. Carrying electrical energy to each home is very dificult when these are in isolated or remote communities, so in this document we make a technical and economic evaluation of various options to carry electricity to an isolated community. This research seeks to demonstrate why the microgrids are the best option for rural electrification. Based on the "Micro red de servicios energeticos comunitarios" project conducted by the Center for the Study of Renewable Energy of the Engineering Institute of UABC in the community of Puertecitos, Ensenada, Baja California. The three options are evaluated extension of the utility grid, the installation of a diesel generator and microgrid. The results show that for communities that are at a greater distance as 30 km from the utility grid installing a microgrid becomes their best option to meet their energy needs.

Keywords: Microgrids, Rural electrification, Isolated systems, PV systems, Isolated communities.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con una población de aproximadamente 112 millones de habitantes, de los cuales, solo el 98.2% cuenta con acceso a la energía eléctrica, esto quiere decir que aproximadamente 2 millones de habitantes viven sin electricidad lo cual provoca que vivan con una baja calidad de vida. Además, México cuenta con una amplia gama de recursos renovables explotables. Por ejemplo, se encuentra dentro del cinturón solar, debido a esto la radiación recibida en el país es una de las mejores a nivel mundial, de 5.5kWh/m² promedio. El

recurso eólico no ha sido evaluado completamente, se estima un potencial de 40,000 MW. El potencial hidroeléctrico se calcula también en 53,000 MW, mientras que el geotérmico cerca de los 40,000 MW. En México no se ha explotado ni evaluado muy a fondo el recurso mareomotriz, pero con 11,593 km de costa es una fuente de energía renovable que puede ayudar a incrementar el porcentaje de penetración de energías renovables en el mix energético nacional. Por último la biomasa, se estima que si se aprovecharan los residuos sólidos de las 10 principales ciudades del país se podrían instalar plantas con una capacidad de 803 MW. (Torres-Roldan F. y Gomez-Morales E., 2006)

Una microrred es un sistema integrado de suministro de energía que consiste en cargas, micro-generadores y equipos de almacenamiento que funcionando como un sistema integrado pueden operar conectados al sistema eléctrico o de manera aislada (Platt G., Berry y Cornforth D., 2012).Una microrred busca integrar al máximo la penetración de fuentes de energía renovable en su matriz energética, es decir, uno de los objetivos de la microrred es abastecer la demanda eléctrica únicamente aprovechando fuentes de energía renovable. Debido a cuestiones técnicas y económicas no siempre es recomendable llegar al 100% de penetración renovable, pero se busca obtener el máximo porcentaje combinado con la máxima viabilidad económica.

Las microrredes pueden clasificarse bajo distintas categorías. Según su conexión con otras redes eléctricas se clasifican en aisladas o interconectadas. De acuerdo al tipo de distribución que utilizan se dividen en microrredes de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD) (Justo, J.J. et al, 2013). Por su aplicación se dividen en comunitarias, comerciales, campus o militares. Una microrred puede tener micro-generadores centralizados o distribuidos; aunque una de las principales ventajas de una microrred frente a la red eléctrica convencional es su facilidad para integrar generación distribuida, una microrred puede ser instalada con generación centralizada e ir creciendo con generación distribuida (Hossain E. et al., 2014).

En México, los antecedentes de las microrredes han sido los sistemas híbridos para electrificación rural instalados en diferentes comunidades, como el realizado en Agua Bendita, Estado de México con 12.4kW de fotovoltaico (FV), 20kW de eólico y un generador diésel de 48kW para abastecer la demanda de una población de 250 habitantes, también el de Isla Margarita, el de La Gruñidora, Zacatecas, San Juanico, Baja California Sur entre otros (Becerra Lopez, H.R., 2011).

La diferencia entre los sistemas de generación híbridos y las microrredes es que el primero solo considera a los microgeneradores y las segundas tambien consideran sistema de distribución, almacenamiento, control y cargas. Es decir, un sistema de generación hibrido puede ser parte de una microrred.

Las microrredes son entonces redes inteligentes las cuales integran generación distribución y demanda para que trabajen como un solo sistema y con esto aprovechar al máximo las fuentes de energía renovable, además de brindar la mejor calidad de la energía y un servicio eléctrico continuo.

En este documento se analizara las diferentes opciones para llevar electricidad a una comunidad aislada, tomando como base el proyecto “Microrred aislada de servicios energéticos comunitarios” apoyado por el fondo de sustentabilidad energetica SENER-CONACYT. La microrred instalada en una comunidad pesquera de Baja California (Puertecitos, Ensenada) cuenta con paneles fotovoltaicos, un generador eólico, banco de baterías y generador diésel. La comunidad de Puertecitos es una comunidad de bajos recursos dedicada principalmente a la pesca comercial, vive en condiciones de marginación o pobreza extrema, cuenta con 20 viviendas de las cuales no todas son habitadas los 365 días del año, debido a la falta de servicios de electricidad y agua potable. Parte de los habitantes de esta comunidad viven en ella solamente en temporada de pesca o de turismo, por lo mismo se espera que con este proyecto se incremente la calidad de vida de las personas que aquí viven, así como la cantidad de habitantes flotantes disminuya, para de esta forma potenciar el desarrollo de la comunidad.

DESCRIPCIÓN DE LA COMUNIDAD Y ANÁLISIS DE DEMANDA.

La localidad de Puertecitos tiene alrededor de 20 familias mexicanas y un número desconocido de habitantes estadounidenses, el poblado se divide en dos partes; la primera en donde se encuentran los habitantes nacionales; en la entrada del pueblo y la segunda en donde se ubican los visitantes y habitantes estadounidenses (zona turística). En la localidad destacan los siguientes lugares: tienda local, escuela primaria, centro de salud (que no opera), una iglesia cristiana, centro de acopio de pescado, un taller mecánico, una gasolinera, un restaurant, un hotel y un área recreacional para turistas.

Anteriormente la comunidad tenía un generador comunal el cual se encendía en ocasiones, algunas veces recibían donaciones del municipio las cuales duraban algunas semanas. Cuando el generador operaba lo hacía en un horario aproximado de 5 a 9 de la tarde y se solicitaba una cooperación semanal de $100 pesos a los habitantes del lugar con lo que se daba mantenimiento a la red eléctrica y al generador. Uno de los problemas de operar el generador diésel era que el dinero recaudado no era suficiente para mantener funcionando el mismo, además, cuando se descomponía duraba bastante tiempo en este estado al no tener recursos suficientes para repararlo.

La comunidad de puertecitos al ser una comunidad retirada de la red eléctrica nacional, de bajos recursos y con poca cantidad de habitantes no está planificada dentro de la extensión de la red por parte del gobierno mexicano, por lo tanto, el costo de llevar electricidad hacia la comunidad por este medio deberá ser absorbido por los habitantes. Por este motivo este documento evalúa las distintas alternativas con las que cuenta una comunidad aislada para su electrificación. La primera extender la red eléctrica, la segunda y más utilizada es el instalar un generador diésel y tercera es la microrred.

Para poder determinar las especificaciones que deben tener cada una las opciones de electrificación, debemos primero conocer la demanda que se busca abastecer. Basarnos en los equipos con los que contaba la comunidad antes de la instalación de la micro red para

establecer su perfil sería un error, debido a que al momento de tener un servicio eléctrico de calidad los pobladores tenderán a comprar más equipos. Para determinar el consumo eléctrico esperado en la comunidad se utilizó una casa de Mexicali, Baja California ciudad que presenta condiciones climatológicas muy similares a las de Puertecitos y cuyo consumo representa el nivel de vida que esperamos alcancen los pobladores de la comunidad. En la casa de prueba se realizaron mediciones durante un año y los resultados obtenidos fueron utilizados como perfil de demanda de cada hogar del proyecto. Los equipos considerados dentro de este perfil se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Equipos permitidos por hogar para la comunidad de puertecitos.

Cantidad	Equipo
7	Focos fluorescentes de 23W
1	Microondas
1	Plancha
2	Televisión
1	Reproductor de DVD
1	Modular
1	Laptop
1	Refrigerador
1	A/C alta eficiencia 1 tonelada
1	A/C 2 toneladas
1	Lavadora de ropa

La localidad de Puertecitos se encuentra en una zona con temperaturas extremas principalmente en verano, donde las temperaturas alcanzan los 45 °C, debido a esto, para tener un nivel de confort aceptable dentro de cada hogar es de vital importancia el uso de equipos de aire acondicionado, provocando un incremento de consumo de hasta 6 veces en comparación de los meses donde no es necesario utilizarlo (Figura 1). El perfil de demanda no uniforme encontrado en regiones de altas temperaturas vuelve difícil el dimensionamiento del sistema de generación. Un generador diseñado para abastecer la demanda de verano quedara sobrado en invierno, y si se diseña para invierno le faltaría energía para verano, por esto el diseño y dimensionamiento de microrredes para este tipo de comunidades es un reto importante.

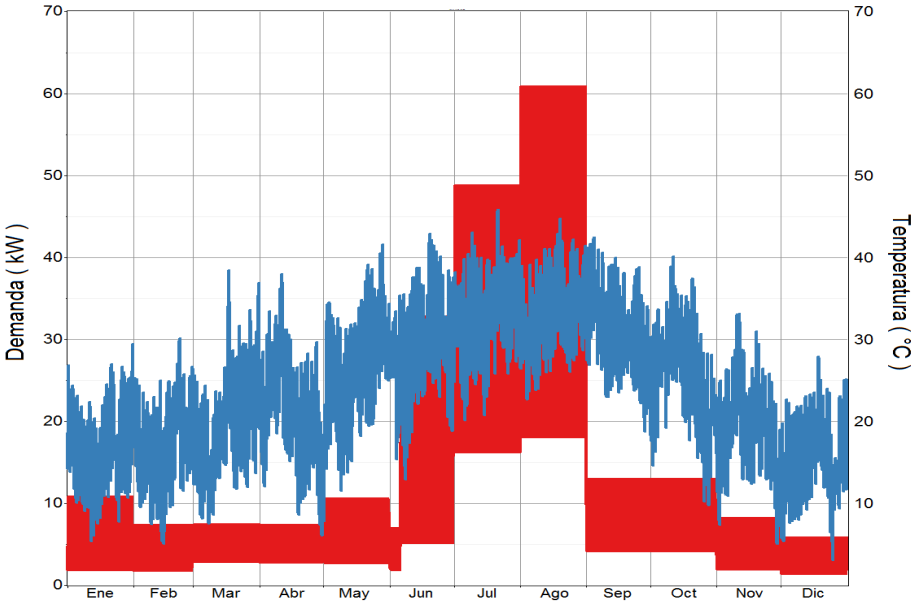


Figura 1.- Demanda esperada en Puertecitos vs Temperatura

DESCRIPCIÓN DE LAS OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA ELECTRIFICACIÓN

Una vez definido el perfil de demanda que se busca abastecer se puede determinar las características que deben cumplir cada una de las opciones de electrificación.

Extensión de la red.

La extensión de la red debe diseñarse pensando en que la comunidad se encuentra en una zona costera, por lo tanto, la red de distribución debe soportar condiciones de alta salinidad y humedad. Se recomienda poste de concreto de 3 hilos a 3 fases para zonas aisladas, esto para llegar a los hogares con sistemas monofásicos 220v, para permitirles comprar e instalar equipos de aire acondicionado de alta eficiencia.

Tomando como base información de CFE de costos y características de los sistemas de distribución, se seleccionó el 1C-3F-3H 13 KV 1/0 AWG AAC-PC RURAL, el cual es un sistema de distribución de 3 fases, que va por 3 hilos, trabaja con 13 kV y utiliza cable de calibre 1/0 de aluminio (AAC). El costo por kilómetro de este sistema es de $131,833.23 MXN. Puertecitos se encuentra a 60 Km del poste de distribución más cercano, considerando que se pudiera extender la red desde este punto, el costo de inversión inicial para llevar electricidad hacia la comunidad de Puertecitos, considerando únicamente la instalación de postería y cable de distribución seria de $7'909,993.80 MXN. Los gastos de operación y mantenimiento para la comunidad serían únicamente el pago de la energía consumida por los usuarios. La tarifa aplicable debido a las temperaturas alcanzadas en el sitio seriía la 1F, con costo promedio debido al consumo que se espera tenga la comunidad de 0.72 $/kWh (MXN).

Generador Diésel.

El generador diésel debe de tener la capacidad de abastecer una demanda máxima de 60 kW, debe ser trifásico para poder alimentar los equipos de aire acondicionado en 220v, se busca que tenga la mayor eficiencia para que requiera el mínimo de combustible para abastecer el consumo de la comunidad.

El costo de un generador que reúna las características deseadas puesto en la comunidad e instalado es de $500,000.00 MXN. El costo del combustible diésel se consideró en 14.00 $/L (MXN) y el incremento en el precio del mismo se considera igual a la inflación.

Microrred.

La microrred a evaluar cuenta con un sistema fotovoltaico, eólico, banco de baterías y generador diésel. El sistema de generación Fotovoltaico-Eólico será utilizado como generador principal, el sistema de almacenamiento en baterías nos ayudara a gestionar la energía, disminuyendo los problemas debidos a la intermitencia de nuestras fuentes renovables; solo cuando no se pueda suministrar energía por el sistema fotovoltaico, eólico o banco de baterías es cuando entrara como respaldo el generador diésel a abastecer el déficit de demanda.
El sistema fotovoltaico tiene una capacidad de 55.2 kW, se cuenta con un aerogenerador de 5 kW, un banco de baterías de 522 kWh de almacenamiento y un generador diésel de 75 kVA. El proyecto fue financiado por el fondo de sustentabilidad energética SENER-CONACYT siendo destinados $4'012,610.00 pesos a la construcción de la micro red del poblado de puertecitos.

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO

A diferencia de la micro red tanto el generador diesel como la extension de la red electrica nacional abasteceran la demanda siempre y cuando no se sobrepase la capcidad maxima del generador diesel (75 kVA) o de la red. Por lo tanto, el analsis tecnico realizado en este documento se centrara unicamente en la micro red, ya que esta presenta un comportamiento mas complejo.

El análisis técnico-económico de las 3 opciones de electrificación se realizo mediante el software Homer Pro desarrollado por el laboratorio nacional de energías renovables de Estados Unidos (NREL), el cual es líder en el diseño y optimización de micro redes.

Análisis técnico.

En la figura 2 se muestra la energía que puede producir el sistema fotovoltaico, el aerogenerador, la entregada por el inversor a las cargas, la desperdiciada (debido a que no es requerida por las cargas y el banco de baterías se encuentra lleno), la energía producida por el generador diésel y el consumo total de las 20 casas de la comunidad de puertecitos.

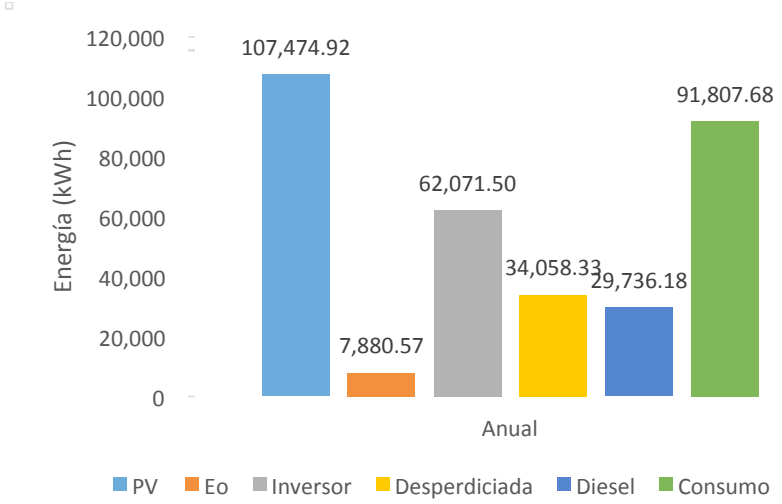


Figura 2.- Generación anual de la micro red

La energía que puede generar el sistema fotovoltaico es mayor a la consumida por la demanda y a pesar de esto es necesario la utilización de otros generadores como lo es el aerogenerador y el diésel, debido a que los perfiles de generación del sistema fotovoltaico y la demanda de la comunidad no son iguales. La generación del sistema fotovoltaico es directamente proporcional a la radiación que este recibe durante el día y a pesar de que el generador fotovoltaico tenga la capacidad de generar la energía necesaria para cubrir la demanda de un día completo este no puede hacerlo por si solo, necesita un sistema de almacenamiento para poder guardar los exedentes del dia y entregarlos por la noche (cuando los paneles no estén produciendo). Este mismo principio aplica para el sistema eólico. Por este motivo, los sistemas de almacenamiento son clave para la incorporación de los sistemas fotovoltaico y eólico en las micro redes.

La energía entregada por el inversor a las cargas corresponde al 54% de la energía que se puede producir a partir de energías renovables. El 30% es la energía es desperdiciada debido a que en el momento que se podía producir no era requerida por las cargas (casas) y el sistema de almacenamiento estaba lleno, el restante 16% se pierde por las eficiencias de los equipo (inversor, controlador de carga, eficiencia de carga y de descarga de las baterías, etc).

Mensualmente observamos el comportamientos de los distintos componentes, como se muestran en la figura 3 donde durante los meses de enero a mayo se puede generar casi el doble de energía que la que se consume, de manera que la energía desperdiciada es grande. Conforme nos acercamos a los meses de mayor consumo se puede observar como las gráficas de generación de energía fotovoltaica y la entregada por el inversor se vuelven más parejas dejando una cantidad muy pequeña de energía desperdiciada en junio y prácticamente nula en julio y agosto, en estos meses al no poderse abastecer la demanda por el sistema renovable (fotovoltaico y eólico) ni por el banco de baterías se utiliza el generador auxiliar para cubrir el déficit de energía.

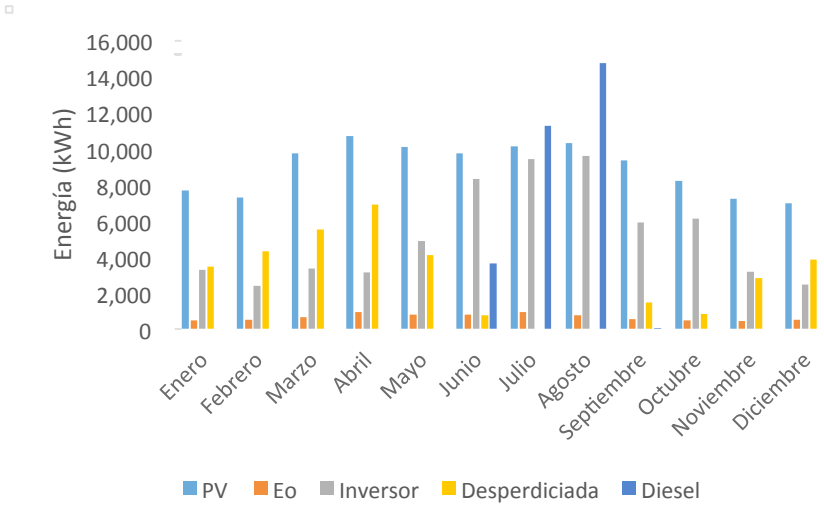


Figura 3.- Generación mensual de energía por componente.

Análisis económico.

Para la evalucion económica se utilizaron los siguientes parametros: tiempo de vida del proyecto de 25 años, tasa de interés del 10% e inflación del 5%.

Para la extensión de la red se utilizará posteria de concreto, cable calibre 1/0 a 3 hilos para llevar 3 fases, esto tiene un costo de $162,376.59 MXN por cada km (CFE, 2015), y un costo promedio por cada kWh de $0.72. Para el generador diésel se consideró un generador de 75 KVA con un costo de $500,000 MXN y un costo del combustible de 14.00 $/L.

Por ultimo dentro de la micro red se diseñó un sistema con una capacidad de 55.2 kWp de fotovoltaico, un aerogenerador de 5 kW, un banco de baterías de 522 kWh y un generador diésel de respaldo de 75 KVA.

Para definir cuál es la mejor opción para la electrificación de comunidades aisladas se compararon el consto nivelado de energía (CNE), el costo de Inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento (O&M) y valor presente neto (VPN). En la Tabla 2 se muestran los resultados de la evaluación económica realizada con Homer Pro.

Tabla 2. Comparación entre distintas soluciones para la electrificación de puertecitos.

	Red Eléctrica	**Micro red**	**Generador Diésel**
CNE	$8.83	$6.15	$11.11
Inversión	$ 8.87M	$ 4.24M	$ 0.5M
O&M	$ 1.56M	$ 2.9M	$ 9.53M
VPN	$ 10.3M	$ 8.14M	$ 12.9M

Las tres opciones tienen sus ventajas y desventajas, para la comunidad sería más sencillo extender la red eléctrica debido a que la compañía suministradora del servicio sería la encargada de revisar el correcto mantenimiento de la red, así como de darle su mantenimiento y la comunidad solo se encargaría de pagar sus recibos mensualmente. La compañía suministradora al generar la energía eléctrica en grandes cantidades tiene costos nivelados de energía muy bajos por lo cual el proyecto de extensión de la red eléctrica contiene el costo de Operación y Mantenimiento (O&M) más bajo de las tres propuestas, pero, debido a que la comunidad se encuentra a 60 km del ultimo poste de distribución y es desde este punto a partir de donde se tendría que extender la red eléctrica esto nos da el costo de inversión inicial más alto de las tres opciones.

Durante muchos años distintos gobiernos han utilizado la solución de instalar un generador diésel para comunidades que se encuentran muy alejadas de la red eléctrica o en zonas difícil acceso. Esta solución tiene el costo de inversión inicial más bajo, pero, utilizan un recurso finito, el cual debido a su naturaleza cada vez es más escaso en el planeta y por lo mismo cada vez más caro, esto hace que los costos de operación y mantenimiento de un proyecto de este tipo se eleven considerablemente colocándolo como la opción más cara de las 3 y conforme pasen los años su costo seguirá incrementando.

Las microrredes se pueden considerar como una integración de tecnologías que buscan atacar los problemas de las opciones anteriormente mencionadas. El objetivo de una micro red es abastecer el 100% del consumo de una comunidad buscando la máxima penetración de energías renovables. Es decir, que el mayor porcentaje del consumo de la comunidad provenga de la explotación de fuentes renovables. Como se observa en la tabla 2 la microrred tiene el CNE más bajo de las 3 opciones, una inversión inicial intermedia al igual que sus costos de operación y mantenimiento al utilizar un generador diésel como respaldo.

Para el caso de puertecitos una micro red resulta 30% más económico que extender la red hasta la comunidad. Además, en comparación de un proyecto diésel los ahorros obtenidos por instalar una micro red en vez de seguir operando el equipo diésel representan un tiempo de recuperación de la inversión de 4.4 años, esto coloca a la micro red como la mejor opción para la electrificación de comunidades aisladas.

Es importante mencionar que el costo de extender la red eléctrica hacia una comunidad aislada aumenta conforme la comunidad se encuentra más alejada de la red, mientras que para las microrredes y el generador diésel los costos con respecto a la ubicación de la comunidad no aumentan considerablemente, por lo tanto, dependiendo de la ubicación de la comunidad es la viabilidad con respecto a la extensión de la red que tiene una microrred. Con los resultados obtenidos del software Homer Pro se encontró que para el proyecto de puertecitos a partir de 40km se convierte en la mejor opción para la electrificación. Es importante mencionar que una microrred es un traje hecho a la medida para cada comunidad, por lo tanto, la viabilidad de la misma depende de cada proyecto y un correcto dimensionamiento ayuda a disminuir los kilómetros a partir de los cuales la microrred se convierte en la mejor opción. Además, para comunidades que se encuentran cercanas a la red eléctrica se puede optar por instalar microrredes interconectadas.

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Una correcta estrategia de operación ayuda a mejorar el costo nivelado de energía, debido a que se puede mejorar factores como lo son el consume de combustible y horas de trabajo del generador diésel y estos factores tienen un impacto directo en los costos de mantenimiento y operación de la micro red aislada, de manera que impactan también en el costo nivelado de energía, así mismo un correcto dimensionamiento ayudara a bajar los costos de inversión inicial de manera que el sobredimensionar algún generador tendrá como resultado un precio nivelado de energía mas alto.

Si vemos la parte económica, el recurso solar y eólico son gratuitos existen de forma natural y prácticamente son ilimitados. Por la parte ambiental el utilizar el sol y/o el viento no libera químicos ni gases de efecto invernadero al ambiente por lo cual su impacto a los ecosistemas es menor que el de otras tecnologías. Socialmente este tipo de proyectos cada vez son más aceptados debido a la fuerte problemática de cambio climático a la cual nos enfrentamos y es clara para todos los habitantes de este planeta. Por lo tanto, la micro red se sitúa como la opción sustentable al contar los 3 pilares de la sustentabilidad, es socialmente aceptable, ambientalmente amigable y económica mente viable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT- SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA por el apoyo recibido a través del proyecto P09 del CEMIE-Solar

REFERENCIAS

Becerra Lopez, H.R. (2011): Desarrollo y aplicaciones de microrredes eléctricas en México Instituto de Investigaciones Eléctricas. http://www.iee.usp.br/lsf/sites/default/files/Apresentacao_Humberto_Becerra.pdf consultado: septiembre 2016.

CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2016): Negocio-información al cliente, catalogo de precios unitarios por mano de obra, materiales y equipo. [en línea]. http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/otros/aportaciones/ consultado septiembre 2016

Hossain E., Kabalci E., Bayimdir R., Perez R. (2014): Microgrid testbeds around the world: State of art. Energy Convers. Energy Convers. Manag. 86, pp.132-153. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.012

Justo, J.J., Mwasilu F., Lee J., Jung J.-W. (2013): AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. Sustain Energy. Rev. 24, pp. 387-405. doi:10.1016/j.rser.2013.03.067

Platt G., Berry, Cornforth D. (2012): Chapter 8- What Role for Microgrids ?. En: Sioshansi F.P. (Ed.), Smart grid. Academic Press. Boston, pp. 185-207.

Torres-Roldan F., Gomez-Morales E. (2006): Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER. http://awsassets.panda.org/downloads/folletoerenmex_sener_gtz_isbn.pdf consultado: septiembre 2016.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

MÉTODO BASADO EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL PARA DETECCIÓN DE FALLA DE CIRCUITO ABIERTO EN ARREGLOS FOTOVOLTAICOS

Marco A. Zuñiga-Reyes
Programa de posgrado en Energías Renovables, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1 + 500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis., C.P. 29150, México, 961 6562232, **marco.zuniga.reyes@gmail.com.**
CECYT 01 San Fernando, Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Chiapas, Calzada Juan Sabines Gutiérrez S/N, Col. Paraíso, San Fernando, Chis., C.P. 29120, México, 961 6564224, **marco.zuniga.reyes@gmail.com.**

José B. Robles-Ocampo
Programa de posgrado en Energías Renovables, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1 + 500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis., C.P. 29150, México, 961 6562232, **jrobles@upchiapas.edu.mx.**

Perla Y. Sevilla-Camacho
Programa Académico de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores Km 1 + 500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chis., C.P. 29150, México, 961 6562232, **psevilla@upchiapas.edu.mx.**

RESUMEN

Este trabajo presenta un método de análisis para identificar la presencia de falla de circuito abierto en arreglos con módulos fotovoltaicos. Este método consiste en operar al arreglo en obscuridad e introducirle una pequeña señal de voltaje pulsante a una frecuencia de 12 KHz, la cual es conectada en paralelo con el arreglo. El voltaje de salida del arreglo es filtrado analógicamente para atenuar la componente de cd de la señal. Esta señal obtenida de corriente alterna es adquirida y almacenada para luego ser procesada digitalmente mediante la Transformada Rápida de Fourier. Este análisis espectral permite concluir que la presencia de falla de circuito abierto en módulos fotovoltaicos conectados en arreglo produce un incremento de amplitud del componente de frecuencia de 12 kHz. Además es notable que el tamaño del arreglo y la tecnología de fabricación de los módulos fotovoltaicos utilizados no interfieren con el método propuesto. Para validar estos resultados obtenidos el método fue simulado utilizando el circuito equivalente de corriente alterna de una celda solar. En todas las pruebas experimentales y de simulación, el método permitió identificar correctamente la condición del arreglo. También es importante mencionar que el método propuesto no requiere el uso de sensores o costoso equipo especializado, y la desconexión o modificaciones al arreglo. Además el uso de este método evita riesgo de descarga eléctrica durante el monitoreo de fallas. Por todo lo antes mencionado, el método propuesto es confiable, simple, rápido, económico y seguro en comparación con otros trabajos reportados.

ABSTRACT

This research work presents an analysis method to identify the presence of open circuit fault of solar photovoltaic modules in arrays. This method consists on operate the array under dark condition and introduce it a small pulsed voltaje signal of frequency of 12 KHz, which is connected in parallel with the array. The array output voltaje is analogic filtered in order to reduce the direct current signal component. The obtained alternating current is acquired, stored, and then digitally processed through the Fast Fourier Transform. This spectral analysis allows us to conclude that the presence of open circuit fault produces an increase of amplitude of the component frequency of 12 kHz. Furthermore, it is noteworthy that the temperature, the size of the array, and the technology of manufacture of the used photovoltaic modules do not interfere with the proposed method. In order to validate the obtained results, the method was simulated using alternating current equivalent circuit of a solar cell. In all experimental and simulated tests, the method allows the array condition to be detected correctly. Also, it is important to mention that the proposed method do not require sensors or expensive and specialized equipment, and disconnection or any modification to the array. In addition, the use of this method avoids risk of electrical shock during the fault monitoring. For all the aforementioned, the proposed method is reliable, simple, fast, economical and safe in comparison with other reported works.

Palabras claves: Análisis espectral, detección de falla, circuito abierto, arreglo fotovoltaico, voltaje pulsante.

INTRODUCCION

Los módulos fotovoltaicos, independientemente de su tecnología de fabricación, son utilizados para convertir la luz solar incidente en su superficie a energía eléctrica. La mayoría de los sistemas conectan un conjunto de módulos fotovoltaicos para formar una rama. Dicha rama puede ser conectada en paralelo a otras ramas de iguales características para incrementar la potencia de salida del arreglo.

Cualquiera que sea el tamaño del arreglo fotovoltaico, éste siempre estará sujeto a fallas. Lo cual se traduce en un decremento significativo en la eficiencia de generación de potencia y en una reducción del tiempo de vida útil del arreglo. La falla en un arreglo fotovoltaico se define como la condición que causa un decremento en la potencia de salida del arreglo [1].

Es por ello, que el desempeño adecuado de un sistema de generación de energía dependerá entonces del mantenimiento que se le brinde al mismo, procurando la verificación de los diversos tipos de causas de fallas a un costo reducido, con rapidez, fiabilidad y seguridad para las personas encargadas del mantenimiento.

Actualmente, la detección de fallas en sistemas de módulos fotovoltaicos conectados en configuración serie-paralelo, ha sido abordada desde diversas perspectivas, las cuales van desde la inspección manual, hasta los sistemas inteligentes [2,3], pasando por la respuesta según parámetros eléctricos [4-7].

Las diversas técnicas de detección de anomalías determinan la causa posible de la falla en un sistema, para ello, necesitan medir parámetros como corriente y voltaje en cada una de las series que componen el arreglo fotovoltaico, esto último se hace incosteable en muchas aplicaciones. Por otra parte, existen empresas que comercializan sensores especializados para sistemas fotovoltaicos, dichos sensores permiten el monitoreo de manera alámbrica o inalámbrica de cada uno de los módulos que forman el arreglo. Sin embargo, esta forma de determinación de la falla tiene repercusiones económicas elevadas, ya que para la recepción de los datos se hace necesario instalar un centro de control para los mismos [8-9].

El uso de cámaras termográficas es también una opción para determinar el módulo fotovoltaico o conjunto de ellos que presentan fallas. Esta técnica necesita de diversas condiciones específicas para la prueba, además de requerir un análisis posterior de las imágenes capturadas, la cual tiene que ser realizada por personal calificado [1].

Como se puede observar, con las técnicas actuales únicamente se puede determinar el tipo de falla, mientras que la localización de dicha falla se tiene que realizar manualmente por parte del personal encargado del mantenimiento del arreglo fotovoltaico. Este procedimiento consume demasiado tiempo, además de que existe una exposición a posibles descargas eléctricas hacia el personal de mantenimiento. Esto es debido a que la comprobación de la respuesta de cada módulo fotovoltaico se realiza en función de la irradiancia incidente cuya magnitud es mayor a 500 W/ m^2.

Debido a todos los inconvenientes antes mencionados, en el presente trabajo se propone un método de detección de falla de rama en circuito abierto, el cual aprovecha algunas de las propiedades físicas de los módulos fotovoltaicos. Una de estas propiedades es que los módulos al ser sometidos a irradiancia menor a 1 W/ m^2 se comportan como un elemento de carga, por lo que sus características eléctricas se mantienen constantes facilitando su análisis.

La otra propiedad aprovechable es su respuesta dinámica al ser sometido a una señal de frecuencia específica [10].

MÉTODO DE DETECCIÓN PROPUESTO

En la Figura 1 se muestra el esquema general del algoritmo propuesto para detección de fallas. Dicho método se aplica para arreglos fotovoltaicos con irradiancia menor a 1 W/m^2. Y con temperatura ambiental (T) constante.

El proceso de detección inicia con la generación una señal pulsante a una frecuencia específica, dicha señal es conectada en paralelo al arreglo fotovoltaico bajo análisis. El voltaje que se obtiene de la interacción entre el arreglo fotovoltaico y la señal pulsante es introducido a una etapa de filtrado analógico pasaaltas para eliminar las componentes de frecuencia de cd. Luego, la señal filtrada es adquirida para ser posteriormente procesada y analizada mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

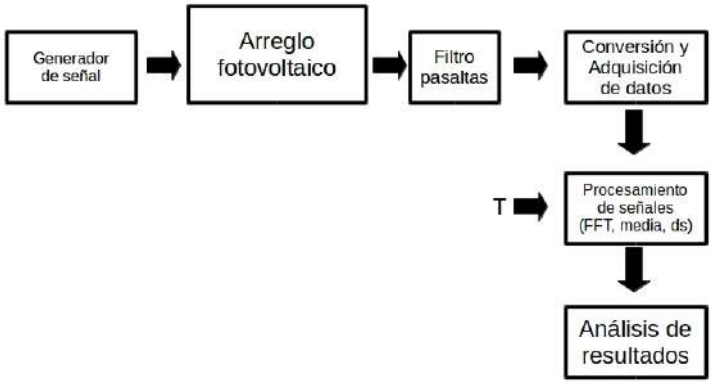


Figura 1 Método propuesto para la determinación del estado del arreglo.

VALIDACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

A continuación se describen los casos de estudio propuestos para la validación experimental del método de detección de falla de circuito abierto.

CASO DE ESTUDIO 1

Para este caso de estudio se considera un arreglo fotovoltaico que consta de cuatro series conectadas en paralelo, cada serie está formada por dos módulos fotovoltaicos. Las mediciones para la obtención de los valores de referencia se indican en la Tabla 1.

Tabla 1 Identificadores de las mediciones realizadas para el caso de estudio 1.

Identificador	Estado del arreglo	Condición
CE1E0	Sin falla	Sin falla
CE1E1	Circuito abierto en alguna de las ramas	Circuito abierto en rama A
		Circuito abierto en rama B
		Circuito abierto en rama C
		Circuito abierto en rama D
CE1E2	Circuito abierto en dos ramas cualquiera	Circuito abierto en ramas A y B
		Circuito abierto en ramas A y C
		Circuito abierto en ramas A y D
		Circuito abierto en ramas B y C
		Circuito abierto en ramas B y D
		Circuito abierto en ramas C y D

CASO DE ESTUDIO 2

Para este caso de estudio se considera un arreglo fotovoltaico que consta de tres series conectadas en paralelo, cada serie está formada por tres módulos fotovoltaicos. Las mediciones para la obtención de los valores de referencia se indican en la Tabla 2.

Tabla 2 Identificadores de las mediciones realizadas para el caso de estudio 2.

Identificador	Estado del arreglo	Condición
CE2E0	Sin falla	Sin falla
CE2E1	Circuito abierto en alguna de las ramas	Circuito abierto en rama A
		Circuito abierto en rama B
		Circuito abierto en rama C
CE2E2	Circuito abierto en dos ramas cualquiera	Circuito abierto en ramas A y B
		Circuito abierto en ramas A y C
		Circuito abierto en ramas B y C

SIMULACIÓN DE UN ARREGLO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

Con la finalidad de tener un patrón teórico para comparación y validación de los resultados experimentales obtenidos, el método de detección fue simulado en celdas fotovoltaicas conectadas en un arreglo de 4X2, en donde se analizaron los estados CE1E0 y CE1E1 establecidos en la tabla 1. La simulación se realizó en QUCS, ya que es software libre y cuenta con las librerías adecuadas para los cálculos que se necesitan realizar. En la figura 2 a) se muestra el circuito equivalente en CA de una celda solar [11]. De este circuito R_p y C_T pueden ser despreciadas por las condiciones de operación, por lo que el circuito equivalente usado para la simulación es el mostrado en la figura 2 b). Los valores de R_d, C_d y R_s se seleccionaron de [12], para un valor de 0.6V de amplitud del voltaje aplicado se obtiene lo siguiente: R_d=0.112 Ω, C_d=450 μF y R_s=0.045 Ω. Se considera que la I_{sc}=0 A debido a que se analizó a la celda en condiciones de irradiancia cero.

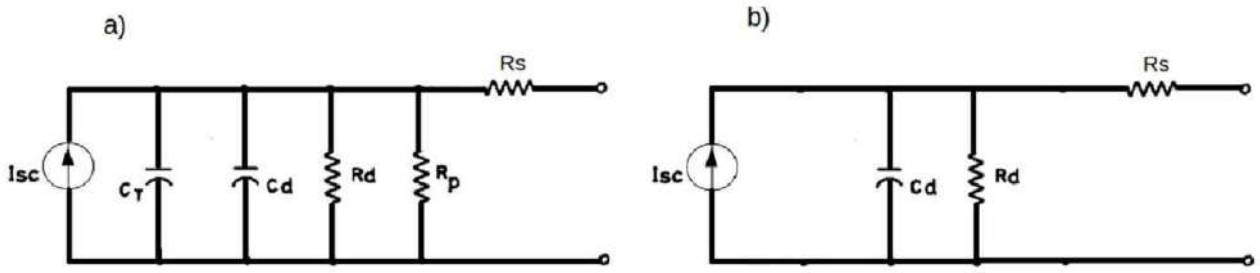


Figura 2 Circuito equivalente en CA de una celda fotovoltaica. a) Circuito original. b) Circuito modificado.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Para realizar las pruebas del método propuesto, se utilizaron módulos fotovoltaicos policristalinos de 50 W, marca ERDM Solar, modelo ERDM 50/12, conectados en arreglos de 4X2(ver figura 3 a)) y 3X3. La interconexión de los módulos se realizó mediante cable calibre 12 AWG. Se considera que cada rama del arreglo tiene un diodo de protección, cuyos cátodos se conectan a un punto común que se considerará como el punto de salida del arreglo fotovoltaico.

La configuración experimental se muestra en la 3 b). El generador de señal está en contacto físico con el arreglo fotovoltaico bajo análisis. La terminal positiva del generador se conecta al negativo del arreglo fotovoltaico, y la terminal negativa del generador se conecta al punto de salida de voltaje del arreglo fotovoltaico.

El filtro analógico pasaaltas fue diseñado para una frecuencia de corte de 1.5 kHz. Para la adqusición de señales se utilizó un osciloscopio Tektronix modelo TBS104, cuya tasa de muestreo fue configurada para 50 ks/s. Para cada condición de prueba se adquirieron 8 períodos de 128 muestras cada uno.

Las muestras adquiridas fueron almacenadas y transferidas en un dispositivo de memoria USB, para luego ser procesadas en una PC mediante lenguaje Python. Para el cálculo de la FFT se utilizó el paquete Numpy.

Todas las mediciones se realizaron a una temperatura de 27 °C, la cual fue medida mediante un termómetro digital marca RadioShack, modelo 6300699.

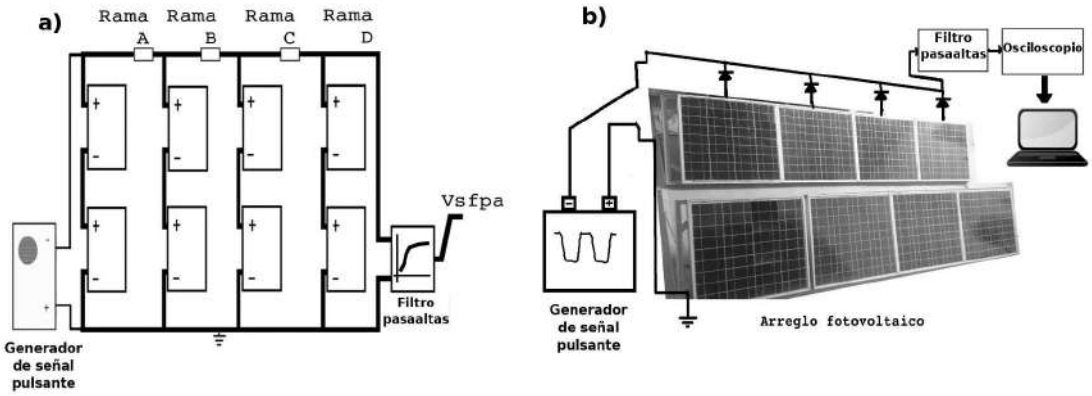


Figura 3 Configuración experimental. a)Diagrama eléctrico para el caso de estudio 1. b) Configuración experimental caso de estudio 1.

RESULTADOS

A continuación se analizan los resultados de la simulación del arreglo, así como también de las pruebas experimentales realizadas a cada uno de los dos casos de estudio establecidos para comprobar la efectividad del método propuesto.

En la figura 4 se muestran los resultados de la simulación. Como se puede observar de esta figura, el menor valor obtenido en la magnitud de la componente de frecuencia de 12 kHz corresponde a la condición de estado sano (CE1E0). Este resultado es debido a que al no existir falla, el arreglo presenta la máxima carga posible conectada al generador de señales pulsante. De esta figura también se observa que existe un incremento proporcional de la magnitud de la componente de 12 kHz conforme la falla se presenta más alejada del generador de señal.

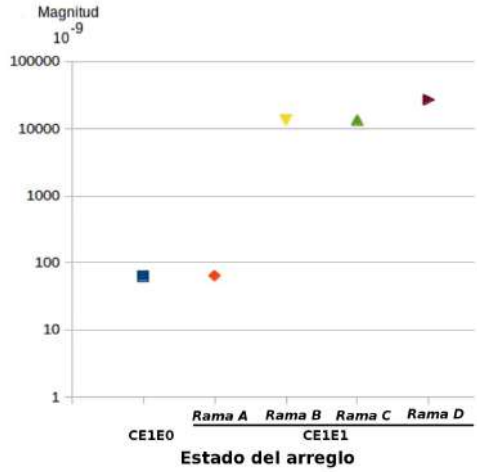


Figura 4 Magnitud de la componente de 12 kHz obtenidos de la simulación.

De la figura 5 también se puede observar que al existir falla en dos de las ramas, el arreglo presenta la menor carga posible al ser conectada al generador. Por lo que, la magnitud de la componente de frecuencia será la de mayor amplitud, tal y como se observa en las señales de los identificadores CE1E2 y CE2E2. De esta figura también se observa que las magnitudes de las señales obtenidas del caso de estudio 2 son de mayor amplitud que las obtenidas del caso de estudio 1, esto es debido a que el arreglo del caso 2 presenta más módulos fotovoltaicos conectados en cada rama del arreglo y por lo tanto la impedancia de cada una de ellas es mayor.

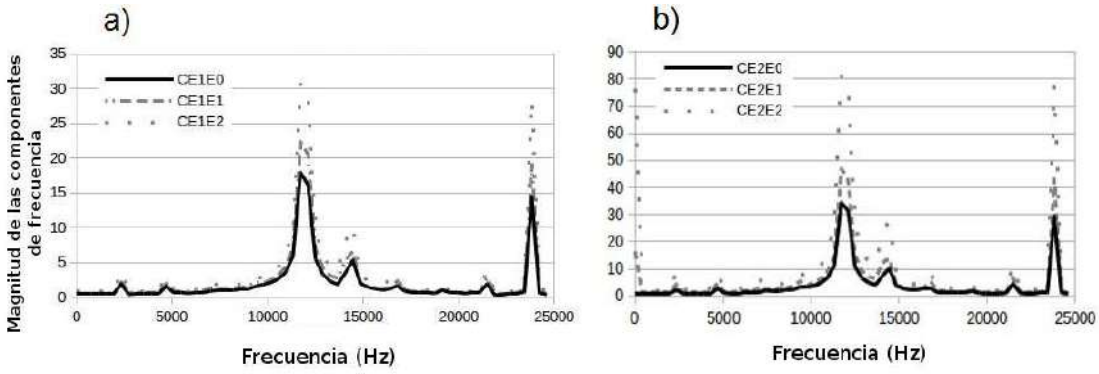


Figura 5 Magnitud promedio de las componentes de frecuencia para a) el caso de estudio, b) el caso de estudio 2 .

En la figura 6 a) y b) se muestran los diagramas de cajas de las magnitudes empleadas para obtener el promedio de la figura 5 a) y b), respectivamente. De la figura 6 se observa que para ambos casos de estudio las diferencias y rangos entre los valores de las magnitudes para cada una de las tres condiciones son evidentes y claramente definidos. Estas notables diferencias en rangos permiten poder detectar la condición del arreglo.

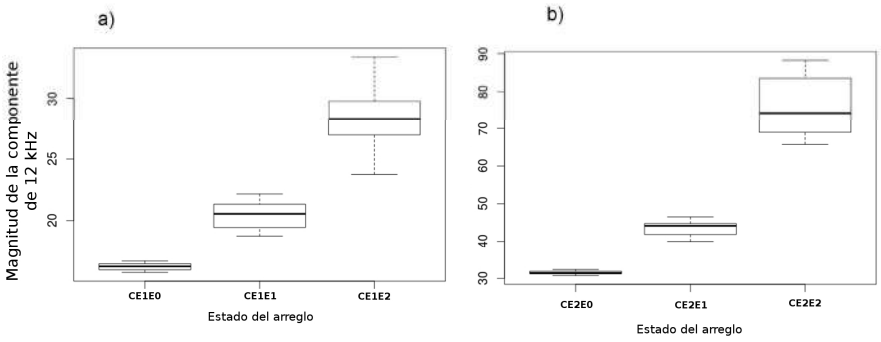


Figura 3 Diagrama de cajas para a) el caso de estudio1, a) el caso de estudio2.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una novedosa metodología que permite determinar al 100% la presencia de falla de circuito abierto en 1 o 2 ramas de arreglos fotovoltaicos de diferentes tamaños y operando en condiciones de baja iluminación. El algoritmo desarrollado se basa en el procesamiento digital de las señales de voltaje AC de salida del arreglo al aplicársele una señal de voltaje pulsante a una frecuencia fija de 12 kHz. La técnica de procesamiento aplicada es la FFT.

De las pruebas se observó que la presencia de diferentes condiciones de falla de circuito abierto en el arreglo genera cambios en la amplitud de la componente de frecuencia de 12 kHz, lo que permite identificar el estado del arreglo y en caso de existir falla poder determinar la cantidad de ramas en circuito abierto presentes en el arreglo. En todas las pruebas experimentales y simuladas se obtuvieron los mismos resultados, lo que demuestra la eficacia del método.

La metodología propuesta no requiere el uso de sensores y de realizar modificaciones al arreglo, ya que los dispositivos para la generación de la señal que se induce al arreglo, así como los dispositivos de medición y los elementos de control, no afectan la distribución eléctrica original del arreglo fotovoltaico bajo prueba. Otras ventajas de método propuesto son el bajo poder de cómputo requerido, y la seguridad y reducción de tiempo proporcionado al personal de mantenimiento.

Quedando como trabajo futuro el desarrollo de un sistema de detección de falla por circuito abierto que utilice técnicas estadísticas para determinar de forma automática el estado del arreglo.

REFERENCIAS

[1] Yihua Hu, Bin Gao, “Photovoltaic fault detection using parameter based model,” Solar Energy, Vol. 96, pp. 96-102, 2013,http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.004.

[2] E. Karatepe and T. Hiyama, “Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of photovoltaic array,” Intelligent System Application to Power systems (ISAP), 2011 16th International Conference on, pp. 1–6, 2011, http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6082219.

[3] Y. Zhao, B. Lehman, R. Ball, and J.-F. de Palma, “Graph-based semisupervised learning for fault detection and classification in solar photovoltaic arrays,” 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 1628–1634, 2013.

[4] Y. Zhao, B. Lehman, R. Ball, J. Mosesian, and J.-F. de Palma, “Outlier detection rules for fault detection in solar photovoltaic arrays,” 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 2913–2920, 2013. http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6520712.

[5] A. Chouder and S. Silvestre, “Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis,” Energy Conversion and Management, vol. 51, no. 10, pp. 1929–1937, 2010.

[6] S. Silvestre, M. A. D. Silva, A. Chouder, D. Guasch, and E. Karatepe, “New procedure for fault detection in grid connected PV systems based on the evaluation of current and voltage indicators,” Energy Conversion and Management, vol. 86, pp. 241–249, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.008.

[7] S. Silvestre, A. Chouder, and E. Karatepe, “Automatic fault detection in grid connected PV systems,” Solar Energy, vol. 94, pp. 119–127, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.001.

[8] SunGuard, Tomado de: http://sunguard.it/prodotti/pagine/Moduke_temperature_sensor.html?lingua=ENG#TLABEL, 2016.

[9] TRITEC, Tomado de: http://tritec-energy.com/images/content/10803004_TRITEC_temperature_sensors_web_enu.pdf, 2016.

[10] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, and C. Jivacate, “PV module dynamic impedance and its voltage and frequency dependencies,” Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 86, pp. 243–251, 2004. doi:10.1016/j.solmat.2004.07.005.

[11] H. S. Rauschenbach, Solar Cell Array Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1980.

[12] M. Suresh, “Measurement of solar cell parameters using impedance spectroscopy,” Solar Energy Materials and Solar Cells, pp. 21-28, 1996. http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248(95)00153-0.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO–ECONÓMICO DE LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO COMO FUENTE ENERGÉTICA EN EL CENTRO ECOTURÍSTICO "EL MADRESAL"

César A. Camas Flores [a] **- Cristina Blanco González** [a] **- Manuel J. Palacios Gallegos** [a] **– Lidya M. Blanco González** [b]
Julio C. Solís Sánchez [a] **- Juan C. Vidal López** [c]

[a] Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villaflores, Suchiapa, Chiapas, C.P. 29150, México, 01961 61 71460, ccamas@mer.upchiapas.edu.mx

[b] Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas,

[c] Instituto de Desarrollo de Energías del Estado de Chiapas, Blvd. Andrés Serra Rojas, Esq. Libramiento Norte Oriente S/N, Edif. Torre Chiapas Niveles 14 y 5, Col. Paso Limón, C.P. 29045 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

RESUMEN

"El Madresal" es un Centro Ecoturístico de Chiapas que no dispone de un abastecimiento energético a través de la red nacional de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y cuya demanda energética ha sido solventada por un generador eléctrico a base de gasolina. El propósito principal de esta investigación fue efectuar un estudio de factibilidad económico y energético de la incorporación de un sistema fotovoltaico como fuente de energía en el emplazamiento.

Se desarrolló un análisis de parámetros climatológicos por medio de monitoreo in situ y registros de bases de datos existentes de Estaciones Meteorológicas Autónomas próximas, con el que se evaluó el recurso energético presente en la zona mediante el análisis de los datos por correlación estadística. Paralelamente, se realizó el levantamiento eléctrico de las instalaciones que comprenden a "El Madresal", para conocer los requerimientos energéticos, mismos que son la base para el dimensionado del sistema fotovoltaico. Aunado a esto, el estudio de factibilidad económico y energético fue basado en el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa de Retorno Energético (TRE), respectivamente.

Los valores arrojados por el estudio indicaron que "El Madresal" tiene un requerimiento eléctrico de 10.0kW contemplando un 18.55% de pérdidas en el sistema. Los resultados indicaron que la zona geográfica del emplazamiento presentó una irradiación media diaria de 5.524kWh/m^2. Para cubrir la demanda energética del Centro Ecoturístico, se proyectó un sistema con 40 paneles fotovoltaicos de 250W. Los resultados permitieron concluir que es factible el uso de energía solar fotovoltaica en la zona de "El Madresal" en un período de operación convencional de 20 años, con una tasa de Retorno de nivel aceptable.

Palabras claves: Ecoturismo, sistemas fotovoltaicos, sustentabilidad, Tasa de Retorno Energético.

ABSTRACT

"El Madresal" is an Ecotourism Site of Chiapas that does not have an energy supply through the National Energy Network (CFE) and whose energy demand has been supported by an electric generator based on gas. The main purpose of this investigation was to do a feasibility economic and energetic study of the incorporation of a photovoltaic system as an energy source for the site.

A climatological parameter analysis was developed by monitoring in situ and databases records from Autonomous Weather Stations near to the site, whose energy resources assessment was generated by statistical correlation. Simultaneously, the electrical requirement from "El Madresal" was performed, in order to have the bases for sizing the PV system. Furthermore, the economic and energy feasibility study was based on the Net Present Value (NPV) and the Energy Return On Investment (EROI), respectively.

The analysis results indicate that "El Madresal" has an electrical requirement of 10.0kW with 18.55% losses in the system. Additionally, the geographical area of the site presents an average daily irradiation of 5.524kW/m^2. In order to satisfy the energy demand of the Site, it was design a system with 40 solar panels. The results indicated that the use of photovoltaic solar energy in "El Madresal" is feasible from an operational period of 20 years, with an acceptable ratio return.

Keywords: Ecotourism, PV systems, Sustainability, Energy Return On Investment

INTRODUCCIÓN

El turismo es una actividad económica que está trazando una directriz mundial hacia un mercado inteligente, tomando en cuenta a la naturaleza como pieza esencial para lograrlo. El clima es un recurso principal para el turismo, ya que tiene una importante influencia en los costos de operación, tales como calefacción-refrigeración, riego, alimentos y suministro de agua. Por tanto, el clima en la región turística es elemental para la satisfacción de las necesidades del turista.

Es evidente que conforme el cambio climático siga avanzando, el turismo sufrirá modificaciones en las preferencias de los visitantes hacia los destinos, al existir un cambio en la sensación de la temperatura regional, transformaciones geográficas por erosión del suelo o elevación de los mares, deterioro de la infraestructura o perdida de la biodiversidad local. Por tal motivo, debe prevalecer un turismo que manifieste no sólo sus características atractivas hacia el descanso y la recreación, sino también que entienda la retribución hacia el ambiente que le dan dichas características.

El turismo sustentable o ecoturismo es aquel que tiene plenamente en cuenta las repercusiones actuales y futuras, para satisfacer las necesidades de los visitantes, de la industria, del entorno y de las comunidades anfitrionas [1]. El ecoturismo es considerado una herramienta eficaz que promueve una política e instrumentos adecuados de competencia, mismos que se ven reflejados a través de los principios de sustentabilidad (económico, medioambiental y social), procurando un equilibrio entre estas tres columnas.

Por otro lado, el turismo ocupa un lugar predilecto en el desarrollo de las naciones. 9% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial depende de este sector económico, y para el 2015, el continente Americano incrementó su potencial turístico de 4% a 5%, respecto a lo observado en 2014 [2]. A nivel Mundial, México ocupa el noveno lugar como destino turístico, con una participación del 8.6% del PIB nacional [3, 4].

En la actualidad, el desarrollo sustentable para los sectores energético y económico es impulsado mediante las Energías Renovables (ER), mismas que son consideradas como primarias, limpias, de bajo riesgo e inagotables, dentro de las cuales podemos incluir a las energías hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y marítima [5]. Específicamente, la energía solar fotovoltaica representa una buena opción al no producir sonido alguno mientras se lleva a cabo la conversión energética, aunque no en la misma proporción, se encuentra por todo el planeta (México aprovecha sólo el 0.9%), el mantenimiento de los paneles es sencillo y en períodos no constantes, además que existe toda una amplia investigación actual sobre recursos y materiales para poder economizarlos [6].

En el caso de Chiapas, las estadísticas oficiales demuestran un aumento anual en la afluencia de turistas al Estado del orden del 5.4% de 2013 a 2014 [7], cuyos visitantes buscan confort en zonas ecológicas y culturales que proliferan en la región. Chiapas es muestra de una zona rica en centros ecoturísticos de diversa naturaleza (costa, selva, bosque), cuyo camino energético debe ser impulsado hacia la sustentabilidad con sistemas que no destruyan o desvirtúen el objetivo recreativo de estos lugares.

El centro Ecoturístico “El Madresal” se localiza a 45 Km de la ciudad de Tonalá en la región costa del estado de Chiapas a 4m sobre el nivel del mar (msnm) en las coordenadas (15.79908°N, 93.601689°O). Debido a su vocación de conservación de especies animales y frutales de la región, este centro Ecoturístico tomó en cuenta la sustentabilidad en base a energías limpias, como uno más de sus principios para la gestión y fortalecimiento de un sistema de calidad y holístico.

MEDICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS

El análisis de la viabilidad del sol como fuente energética requirió conocer sus características, a través de información representativa y confiable, mediante base de datos de registro de calidad, actualizados y lo más completos posibles. Dada la naturaleza variable y aleatoria de estas dos fuentes de energía se aplicaron técnicas estadísticas para su análisis.

Al existir una dependencia entre la generación de energía eléctrica y la disponibilidad del recurso en la región, fue necesario desarrollar una evaluación que representara las condiciones del recurso disponible de forma anual, ya que de ello dependía la estimación de la producción eléctrica, y por tanto, la factibilidad económica del emplazamiento para el uso de los recursos de estudio.

Las técnicas estadísticas usadas se basaron en el supuesto de que las condiciones climatológicas de la región de interés son similares por estación año tras año y no presentan grandes variaciones.

TOMA DE DATOS Y TÉCNICA DE MEDICIÓN

Para la medición de la energía solar se tomó como variable principal de medición sobre el emplazamiento a la radiación solar, expresada en Watt por metro cuadrado [W/m^2]. Dicha recopilación de parámetros climatológicos en “El Madresal” fue llevada a cabo por la Estación Meteorológica móvil Vaisala MAWS 201 (Figura 1), cuya capacidad de monitoreo comprende seis variables: Dirección y velocidad del viento, temperatura, radiación solar, presión barométrica y humedad relativa. La Estación Meteorológica cuenta con un panel solar de 12 W y una batería de respaldo de 7 Ah para su alimentación.

Figura 1. Estación Meteorológica Vaisala MAWS 201

Para la medición de la radiación solar global, se utilizó el sensor QMS101 que consiste en un detector de fotodiodo y cuyo tiempo de respuesta fue menor a 1s. Sin embargo, la salida de datos y su manejo se generaron en medias diezminutarías (10 minutos).

De acuerdo con la NMX-AA-166/1-SCFI-2013 [8], se establecieron las especificaciones técnicas que deben cumplir los instrumentos de medición utilizados en la Estación Meteorológica.

Sumado a esto, se rigió la exposición de los instrumentos y las especificaciones técnicas del emplazamiento para la colocación de la Estación Meteorológica a través de la NMX-AA-166/2-SCFI-2015 [9], tomando en cuenta que la ubicación de la Estación fue meteorológicamente representativa del área de estudio, no tuvo obstáculos muy cercanos a la misma y el suelo donde se ubicó la Estación estuvo cubierto de un pasto natural corto de la región. En la figura 2 se representa la ubicación geográfica en el emplazamiento; así como las distancias hacia los posibles obstáculos alrededor de la Estación Meteorológica.

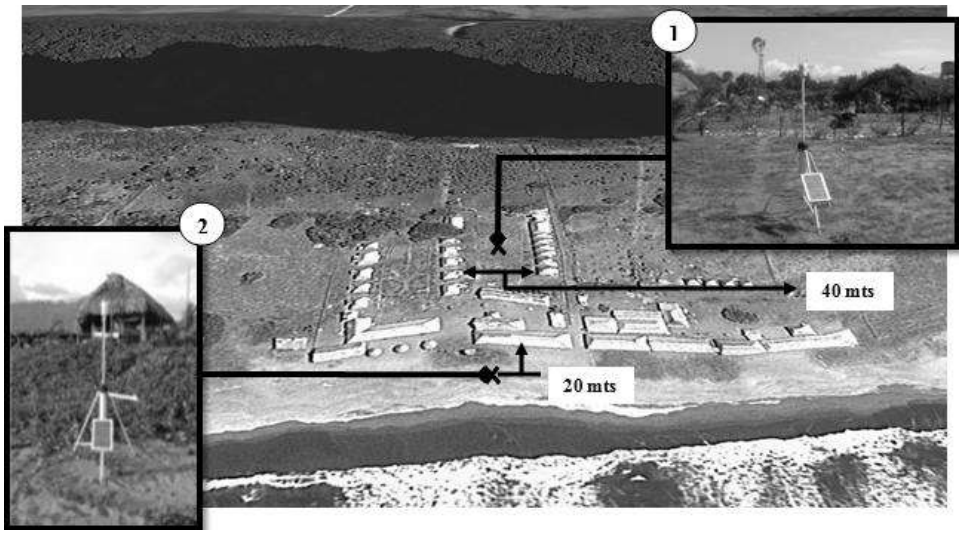
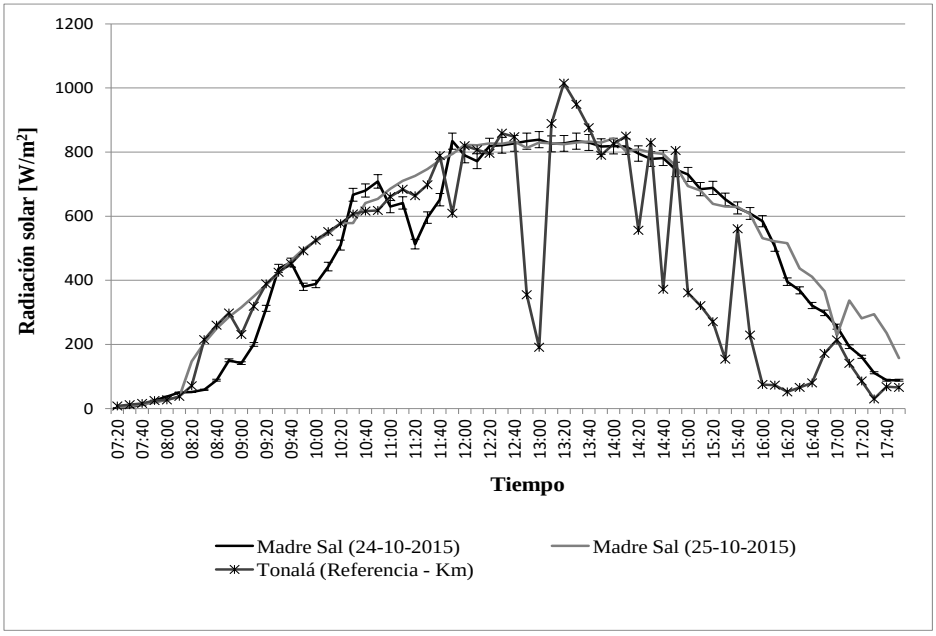


Figura 2. Ubicación de la Estación Meteorológica en el Emplazamiento.

En la figura 2 observamos las ubicaciones de la Estación Meteorológica para el monitoreo en el Emplazamiento. La ubicación 1 corresponde al monitoreo hecho en la fecha del 24 de octubre de 2015 (coordenadas: 15.799225°N, 93.601214°O). En dicha ubicación se contó con el espacio adecuado de 40m alrededor de la Estación Meteorológica para la mínima influencia de sombras proyectadas y/o remolinos de los obstáculos circunvecinos (cabañas, Baños y árboles) y la medición fehaciente de parámetros. Así mismo, la ubicación 2 correspondiente al monitoreo efectuado el 25 de octubre de 2015 (coordenadas: 15.798742°N, 93.601869°O), comprendió una distancia de 20m hacia el obstáculo más cercano (Restaurante), recibiendo libremente el viento proveniente del mar y los alrededores al punto, sin tener sombreado alguno durante el período de medición.

Debido a las dificultades de monitorear los parámetros climatológicos a largo plazo en el emplazamiento, se compararon datos con información histórica del punto de referencia más cercano, correspondiente a la Estación Meteorológica Automática (EMA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ubicada en la cabecera municipal de Tonalá (Coordenadas: 16.084166°N, 93.743888°O), misma que se encuentra a 66 msnm y distante de “El Madresal” 43 km aproximadamente. De dicha EMA se obtuvo información histórica de parámetros climatológicos en un período de enero de 2011 a febrero de 2016. La gráfica 1 muestra la comparación entre los datos medidos en las dos fechas en situ y las mediciones hechas por la EMA de Tonalá.



Gráfica 1. Comparación entre datos medidos in situ y datos obtenidos de EMA Tonalá

Los valores de las curvas generadas mostraron una diferencial porcentual entre la EMA Tonalá y la medición efectuada el 24 de octubre alrededor del 15%, mientras que para el día 25 de octubre la diferencia porcentual fue de 25% a favor de las mediciones realizadas. Las horas efectivas de radiación estimadas corresponden a 8 horas aproximadamente. El máximo valor monitoreado in Situ fue de 843W/m^2 y estás curvas revelan una tendencia de días soleados típicos con perturbaciones casi nulas. Además, la gráfica muestra la incertidumbre en la medida que la Estación Meteorológica Móvil con la que se efectuaron las mediciones en el emplazamiento, la cual corresponde al valor de +/- 3%.

LEVANTAMIENTO ELECTRICO DE LAS INSTALACIONES

Para el requerimiento eléctrico del emplazamiento, se realizó el cálculo de la potencia de acuerdo a los equipos existentes. Esto se resume en la tabla 1. El sistema fotovoltaico propuesto fue de tipo autónomo, integrado por un sistema de almacenamiento conformado por baterías recargables de ciclo profundo para soportar los picos de corriente demandados por los equipos eléctricos que funcionen con dicho sistema. Además, se proyectó el uso de paneles fotovoltaicos, controladores de carga, inversores de corriente.

Capacidad instalada estimada para 10kW, producción estimada: 16,060 kWh/año							
Equipo eléctrico	Unidad	Potencia [W]	Intensidad [A]	Voltaje [V]	Tiempo de uso [Hr]	Potencia total [W]	Consumo diario [kWh]
CD							
Refrigerador Sundanzer DCR-225 12/24V	1	75	6.25	12	24	75	1.80
CA							
Lámpara fluorescente 15 W	94	15	0.12	127	5	1,410	7.05
Contactos 125W/120V	28	130	1.08	120	6	3,640	21.84
Ventilador Man 125W	17	125	0.98	127	6	2,125	12.75
Licuadora Kitchen Aid KSB1575	1	560	4.67	120	1	560	0.56
Total	141					7,810	44.00

Tabla 1. Requerimientos eléctricos para debido a la demanda del emplazamiento.

Los cálculos de la Tabla 1 muestran un requerimiento energético de 7.81 kW de capacidad y un consumo energético de 44 kWh/día. Según datos de irradiación solar de la ASDC-NASA [10], en "El Madresal" inciden 5.524kWh/m^2/día. La división entre el consumo eléctrico de 7.965 kW sin contemplar pérdidas energéticas en el sistema. El porcentaje de pérdidas considerado para el emplazamiento fue de 18.55%; lo cual corresponde a: 6% debido a condiciones climáticas, 6% debido al inversor, 4% en relación al cableado, 1% por proyección de sombras sobre los paneles fotovoltaicos, 0.6% por días con radiación débil y 0.95% por polvo y suciedad sobre los módulos [11]. La tabla 2 muestra la capacidad requerida contemplando el porcentaje de pérdidas energéticas citado anteriormente.

Capacidad requerida [kW]	Pérdidas [%]	Capacidad requerida con pérdidas [kW]
7.965	18.55	10.00

Tabla 2. Porcentaje de pérdida energética y capacidad real requerida en el sistema.

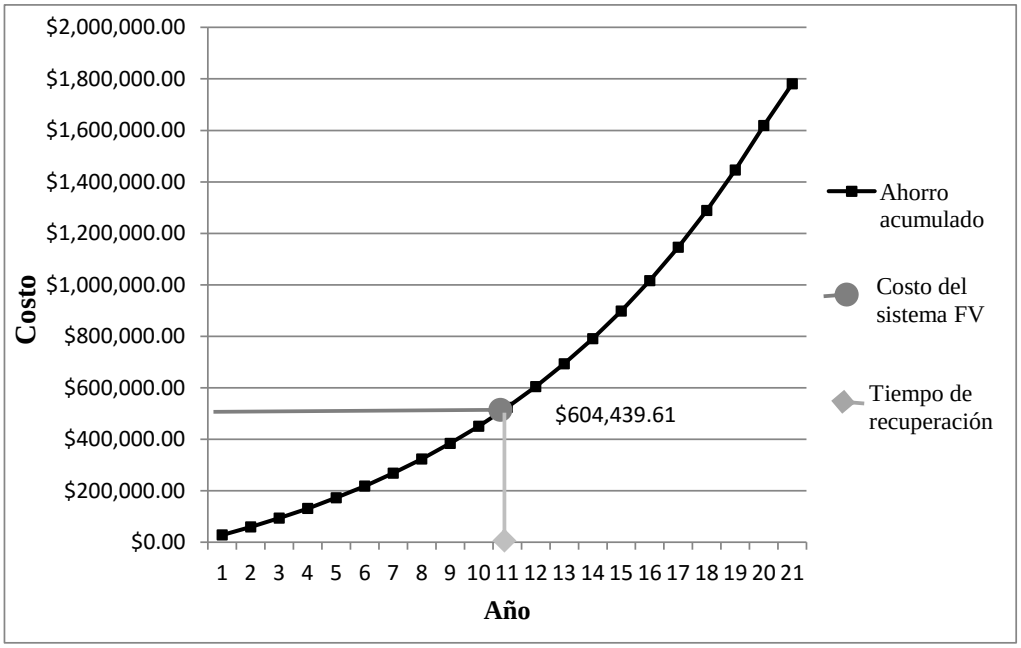
ANÁLISIS ECONÓMICO

Los datos anteriores muestran que el Sistema fotovoltaico necesario para cubrir el requerimiento energético en el estado actual del Centro Ecoturístico debería presentar una capacidad mínima de 10 kW. Un resumen de los dispositivos principales empleados para cubrir dicha capacidad requerida, así como los dispositivos adicionales, es decir, cableado, interruptores, contactos, varillas de tierra, centros de carga, etc., junto con su costo actual, es presentado en la tabla 3. Adicionalmente, se indican los costos de envíos, mano de obra y estructura de soporte estimados para el proyecto.

Inversión del sistema Fotovoltaico				
Dispositivo	Descripción	Pzas.	Costo unitario	Subtotal
Panel Fotovoltaico	250 W	40	$3,520.00	$140,800.00
Batería	ciclo profundo 250 Ah 24V	39	$4,000.00	$156,000.00
Inversor de corriente	1500 W	2	$1,932.30	$3,864.60
Inversor de corriente	1800 W	4	$7,761.00	$31,044.00
Controlador de carga	20 a 24 V	1	$1,100.00	$1,100.00
Controlador de carga	65 a 24 V	4	$5,818.00	$23,272.00
Controlador de carga	80 a 24 V	2	$2,090.00	$4,180.00
			subtotal	$360,260.60
Otros dispositivos				
Dispositivos varios	Cable, centro de carga, pastilla termomagnética, contactos, lámparas	962	subtotal	$67,501.14
Gastos adicionales al sistema				
Envíos	5% estimado del costo total	-	-	$21,388.09
Mano de obra	15% estimado del costo total	-	-	$64,164.26
Estructura de soporte	8% estimado del costo total	-	-	$34,220.94
			Subtotal	$119,773.29
			Total	$547,535.03

Tabla 3. Resumen de dispositivos y costos del sistema solar fotovoltaico

El costo total del sistema ($547,535.03) mostrado como resultado de la tabla 3 fue tomado en cuenta para obtener el tiempo de recuperación. El costo de energía promedio anual se estimó en $1.76 kWh, y se consideró un cambio monetario en el tiempo del 10% para este. Además, la energía generada anual se estimó en 16.06 MWh que, multiplicada por el costo promedio anual, muestra un ahorro de energía de $28,365.60 en el primer año. La gráfica 2 nos muestra el ahorro acumulado durante un período de 20 años, así como el tiempo de recuperación en el que se estima que el sistema fotovoltaico logré ahorrar su costo a los 11 años de su instalación alcanzando un ahorro acumulado de $604,439.61.



Gráfica 2. Tiempo de recuperación del costo del sistema fotovoltaico.

En relación al generador a base de gasolina, se estimó su costo en base al período de funcionamiento del sistema fotovoltaico (20 años), el costo de consumo por el sistema, considerando que el generador tiene un tiempo de vida útil de 5 años. El ahorro económico estimado con el sistema fotovoltaico en comparación con el sistema a base de gasolina es aproximadamente de 39%. Adicional a esto, los costos por consumo de combustible se estimaron sin cambio en el precio de este en el tiempo, considerando el precio máximo estipulado hasta julio de 2016. Un resumen de los costos del generador se muestra en la tabla 4.

Precio de gasolina magna = $13.40/lt		CONSUMO		
Dispositivo	Energía Generada [kW]	Combustible [Lt]	Tiempo [hr]	Costo Anual [MXN]
Generador Electrico	10kW	20 lt	11	$97,820.00

*costo actual en México al mes de julio de 2016.

Concepto	Costo	Consumo anual	Consumo en el periodo de 20 años	Total [MXN]
Generador Electrico Briggs	$ 62,292.00	1	4	$ 249,168.00
Consumo de gasolina	$ 97,820.00	1	20	$ 1,956,400.00
mantenimiento				
servicio de mantto.	$ 6,229.20	2	40	$ 249,168.00
kit de mantto.	$ 522.00	2	40	$ 20,880.00
				$ 2,475,616.00

Tabla 4. Costos del generador eléctrico a base de Gasolina de la marca Briggs and Stratton de 10kW.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación infieren que una implementación de un sistema renovable fotovoltaico contribuye significativamente a disminuir en casi la mitad el costo de generación de la energía eléctrica en comparación a sistemas a base de combustibles fósiles. La zona de estudio del Centro Ecoturístico muestra una amplia capacidad en recurso energético que puede ser aprovechado para el mejoramiento de las condiciones limitadas del lugar. La implementación de energía renovable en el Centro Ecoturístico “El Madresal” cumple con el objetivo de la sustentabilidad que plantea la OMT, por lo que es importante extrapolar estos resultados de mejoría a otros puntos turísticos dentro del Estado de Chiapas. El estudio también revela la importancia tanto del monitoreo in situ para la estimación adecuada de todo el arreglo fotovoltaico, como de los datos de Estaciones próximas al lugar de interés; ya que esto minimiza el error en el cálculo.

REFERENCIAS

[1] UNWTO (2015). Sustainable development of tourism. Madrid, España: Organización Mundial del Turismo. Recuperado de http://sdt.unwto.org/es/content/definicion.

[2] UNTWO (2016, 04 de mayo). Panorama OMT del turismo internacional 2015. UNWTO. Recuperado de http://www2.unwto.org/annual-reports.

[3] SECTUR (2016). Ranking Mundial del Turismo Internacional. Ciudad de México, México: Secretaría de Turismo. Recuperado de http://www.datatur.sectur.gob.mx/sitepages/rankingOMT.aspx.

[4] INEGI (2016). Producto Interno Bruto Turístico. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/tur/default.aspx.

[5] Amponsah, N.Y., Troldborg, M, Kington, B., Aalders, I., y Hough, L. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifeCycle considerations. *Elsevier. 39*. 461-475.

[6] Mundo, J., De Celis, B., Hernández, J., y De Celis-Carrillo, B. (2013). An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Elsevier. 31*. 639-649.

[7] SECTUR (2016). Información turística de Chiapas. Ciudad de México, México: Secretaría de Turismo. Recuperado de http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF/ITxEF_CHIS.aspx

[8] Secretaría de Economía (2013). Norma Méxicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013 para estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas - parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales.

[9] Secretaria de Economía (2015). Norma mexicana NMX-AA-16621-SCFI-2015 estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. parte 2: especificaciones técnicas que deben cumplir el emplazamiento y exposición de los instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales.

[10] NASA (2016). NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data. Recuperado de https://eosweb.larc.nasa.gov/cgibin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=15.79908&lon=93.601689&submit=Submit

[11] Photovoltaic Softwares. (2015). How to calculate the annual solar energy output of a SFV. http://photovoltaic-software.com/PV-solar-energy-calculation.php. Revisado 5 de Agosto de 2015.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ENFRIAMIENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EMPLEANDO CANAL ALETADO DE SECCIÓN TRANSVERSAL VARIABLE

Vicente Flores, Jorge Bedolla, Carlos Alberto Mora, Marcos Bedolla y Francisco Hernández
Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México,
Tel: 01 241 41 72010, **e-mail: f117u2@yahoo.com**

RESUMEN

Gran cantidad de sistemas fotovoltaicos son instalados en la parte superior de las edificaciones lo cual les impide la ventilación y disipación de calor, en otros sistemas aunque mantienen una ventilación por corrientes naturales de aire, las propiedades ópticas de las mismas celdas permiten alta absorción de energía llegando alcanzar temperaturas en su superficie de hasta 70°C lo cual conduce a la reducción de su desempeño fotovoltaico. Con base en la experiencia experimental en la operación de conductos para calentamiento de aire por energía solar, en este trabajo se propone la configuración de un conducto con sección transversal variable aletado para mejorar las corrientes de aire. Se instala en la superficie posterior del módulo fotovoltaico y se le agrega una chimenea. La sección variable provoca el efecto Venturi originando corrientes de aire, además del efecto termosifón y el tiro provocado por la chimenea, el fluido retira calor de la superficie del módulo obteniendo un calor útil de entre 0.463 a 1.13 kW_t y un desempeño eléctrico entre 251.01 y 278 W_e. Con base en los resultados se puede establecer que la ventaja de usar un sistema fotovoltaico térmico radica en la ganancia de energía térmica.

ABSTRACT

Large amount of photovoltaic systems are installed in the top of the buildings which prevents them from the ventilation and heat dissipation, in other systems while maintaining a ventilation system by natural currents of air, the optical properties of the same cells allow high absorption of energy coming reach temperatures on its surface of up to 70°C which leads to the reduction of its photovoltaic performance. On the basis of experimental experience in the operation of conduits for air heating by solar energy, this paper proposes the setting of a passage with variable cross section with fins, to enhance the flow of air. Is installed on the rear surface of the photovoltaic panel and adds a fireplace.

The variable section causes the Venturi effect causing air currents, in addition to the effect termosiphon shot and caused by the fireplace, the fluid removes heat from the surface of the panel by obtaining a useful heat of between 0.463 to 1.13 kWt and an electrical performance between 251.01 and 278 We. Based on the results it can be established that the advantage of using a thermal photovoltaic system lies in the gain of thermal energy.

Palabras claves: sistema fotovoltaico térmico, canal de enfriamiento, desempeño.

INTRODUCCIÓN

Un sistema solar hibrido PVT consiste comúnmente de un módulo fotovoltaico que en la parte trasera del mismo se une un dispositivo de extracción de calor para cumplir dos funciones, primero induce a la transferencia de calor y reduce la temperatura del módulo fotovoltaico mejorando su desempeño eléctrico y la segunda función es el aprovechamiento de la energía térmica para procesos en lugar de desecharse al ambiente.

Diferentes trabajos se han realizado para evaluar el desempeño de un sistema PVT con aire o con agua como fluido de transferencia de calor, de lo que se ha concluido que existe una correlación lineal entre la eficiencia de un módulo fotovoltaico y su temperatura, Garg and Adhikari 1997.

Los sistemas PVT aire tienen mayor ventaja en su aplicación y operación en el modo termosifón que los PVT agua en principio porque la tecnología de ventilación es más sencilla y en segundo porque la densidad del aire es muy baja y la circulación del fluido ocurre a menor gradiente térmico que en el caso del agua. Algunas de las configuraciones más comunes para sistemas PVT/a son: 1.- canal de aire por encima del PV, 2.- canal de aire por abajo del PV, 3.- el PV entre dos canales de un solo paso y 4.- el PV entre dos canales de doble paso. Kaiser et al 2014, proponen un sistema de enfriamiento por convección forzada a través de un canal con relación de aspecto de 0.11 en la que analizan la influencia de las dimensiones del canal con la capacidad de enfriamiento. Elsafi and Gandhidasan 2015, presenta un estudio comparativo entre dos propuestas de enfriamiento de módulos PV, 1.- el módulo fotovoltaico con concentración solar a través de un concentrador parabólico compuesto, con enfriamiento forzado a través de un canal aletado colocado en la parte inferior del módulo, 2.- Módulo fotovoltaico con doble cubierta de vidrio, con enfriamiento de doble paso y el canal inferior contiene aletas, en ambas propuestas la circulación del aire es forzado. Se obtiene como resultado que en las dos propuestas la capacidad eléctrica aumenta comparada con los módulos PV simples 8% para el primer caso y 3% para el segundo caso respectivamente, sin embargo los costos de adquisición y traslado aumentan considerablemente. Tripanagnostopoulos et al. 2005 concluyeron que los sistemas PVT/a se encuentran 5% más altos los costos de producción que los módulos PV y para los sistemas PVT/w el 8%. Baloch et al. 2015, realiza un estudio experimental y numérico del enfriamiento de PV dirigido a

mantener una temperatura baja y distribución uniforme de la temperatura a través de la superficie para lo cual emplea un canal convergente de enfriamiento (canal de sección transversal variable, usando esta técnica de enfriamiento se logra reducir la temperatura hasta en un 57% en los días más cálidos y en un 32.7% para los días fríos; así mismo la potencia de salida mejora en 35.5% y 26.1% para días cálidos y fríos respectivamente. Por otro lado, se ha trabajado experimentalmente con calentadores de aire tipo canal con diferentes configuraciones rectangular con y sin aletas, circular con y sin aletas, en convección forzada con control del flujo y en convección natural, presentando mejor desempeño con aletas rectangulares. Para el primer caso las eficiencias térmicas se encuentran entre 20 y 56% con flujos másicos entre 0.00729 y 0.01458, mientras que para el segundo caso las eficiencias se encuentran entre 42 y 72%, en las mismas condiciones de flujo másico. Para la convección natural las eficiencias térmicas disminuyen significativamente 29.2% para el calentador conductos cilíndricos y 33.4% para el de ducto rectangular, la diferencia radica en el flujo de aire a través del calentador, siendo mayor en el calentador de sección rectangular con aletas 0.00408kg/s y de 0.00298kg/s para el calentador de ductos cilíndrico con aletas respectivamente.

Con base en lo anterior se presenta en este trabajo la propuesta de un sistema de enfriamiento mediante canales de sección variable con aletas, acoplados al módulo fotovoltaico, con el propósito de aumentar su desempeño eléctrico.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Los parámetros considerados para evaluar el desempeño de sistemas híbridos solares térmicos fotovoltaicos, son la eficiencia térmica, eléctrica y global, es fundamental conocer la fracción de la energía solar que se convierte en energía útil y otros parámetros de funcionamiento que conducen a establecer los beneficios de estos sistemas solares. La eficiencia térmica y eléctrica para un sistema como el que aquí se trata, se obtienen como sigue:

$$\eta_t = \frac{\dot{m} C_p (T_{sal} - T_{en})}{GA} \tag{1}$$

$$\eta_e = \frac{V_{mp} I_{mp}}{GA} \tag{2}$$

La eficiencia térmica de forma convencional se representa en función de la temperatura reducida,

$$T_r = \frac{T_{en} - T_a}{G} \tag{3}$$

para lo cual se emplea la ecuación de Hottel-Whillier-Bliss adaptada por Florschuetz 1979, quedando:

$$\eta_t = F_R \left[(\tau\alpha)_e (1 - \eta_e) - U_L \left(\frac{T_{en} - T_a}{G} \right) \right] \tag{4}$$

Fujisawa y Tani 1997, emplean el concepto de eficiencia total del sistema η_o, expresándose en forma de ecuación como:

$$\eta_o = \eta_e + \eta_t \tag{5}$$

Siendo:

C_p : calor específico
T_{sal} : temperatura de salida del fluido
T_{en} : temperatura de entrada del fluido
G : radiación solar
A : área de captación
Tr : temperatura de referencia
Ta : temperatura ambiente
η: eficiencia
ṁ : flujo másico
(τα) : producto transmitancia absortancia
U_L : coeficiente global de pérdidas

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental consiste de dos módulos fotovoltaicos de silicio policristalino de 250 W con dimensiones de 0.96 m de ancho por 1.60m de longitud, figura 1, en un módulo se acopla por la parte posterior un canal de sección transversal variable y aletas rectangulares, el cual se muestra en la figura 2. La longitud del canal es de 1.665m, 0.99m de ancho y la profundidad varia de 0.125m en la entrada del flujo de aire a 0.046m en la salida del flujo, el numero de aletas es de 189, distribuidas uniformemente a lo ancho y largo del canal adoptando una configuración alternada con base en la dirección del flujo de aire de enfriamiento; la figura 2 y 3 muestra la configuración de las aletas y las líneas de flujo a través de las mismas. Las dimensiones de las aletas son de 0.045m de ancho y su altura varia a la vez que la sección transversal del canal cambia, el propósito es que la aleta haga contacto con la superficie posterior del módulo fotovoltaico, así como generar un patrón de flujos que provoque de forma efectiva el enfriamiento del módulo fotovoltaico. Al canal se le adiciona una chimenea con el propósito de generar el tiro natural a través del canal y con la posibilidad de colocar un extractor de aire que

induzca a un flujo forzado de aire. El canal de aire con la chimenea crea un conducto tipo Venturi con lo que de manera natural se mejora flujo interno de aire.

Figura 1.-Sistema fotovoltaico experimental

El sistema de canal de enfriamiento incluyendo las aletas se construye con lamina galvanizada zintro, para evitar problemas de degradación por la presencia de aire húmedo. Para evaluar el desempeño del sistema de enfriamiento en el módulo fotovoltaico se experimento al mismo tiempo dos módulos, uno con enfriamiento y el otro sin él, bajo las mismas condiciones de operación, siendo las variables a medir, Temperatura del aire en la salida del canal, temperatura en la placa del módulo en la parte inferior y superior, voltaje y corriente entregada por los dos módulos y las variables climáticas de temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar, como se observa en la figura 4 para un día típico de pruebas correspondiente al mes de mayo. El tiempo de pruebas fue de 4 horas y el registro de las variables cada 10 minutos a través de un sistema de adquisición de datos.

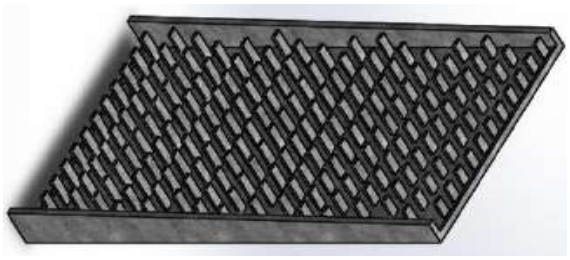


Figura 2.- Canal de enfriamiento de sección variable con aletas

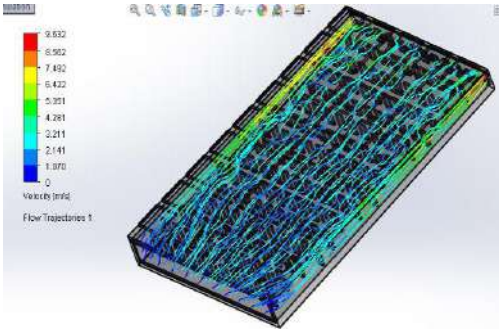


Figura 3.-Simulación del flujo de aire a través del canal

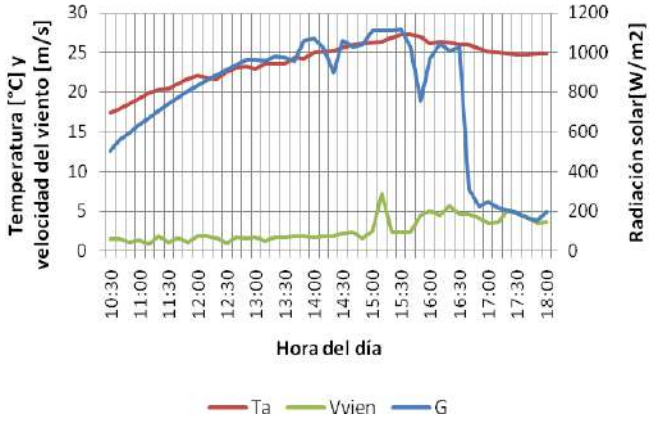


Figura 4. Variables climáticas en el sitio de pruebas

RESULTADOS Y DISCUSION

Se presentan los resultados para un caso típico de pruebas y se hace con referencia a las temperaturas que se presentan en el módulo con canal y el módulo sin canal, para el primero solo se registro la temperatura en la superficie (Ts-MF2) y para el segundo, en la superficie

(Ts-MF1), en la superficie posterior del módulo parte superior (TMF-sup) e inferior (TMF-inf) y la temperatura del aire en la salida del canal de enfriamiento (Tair-sal).

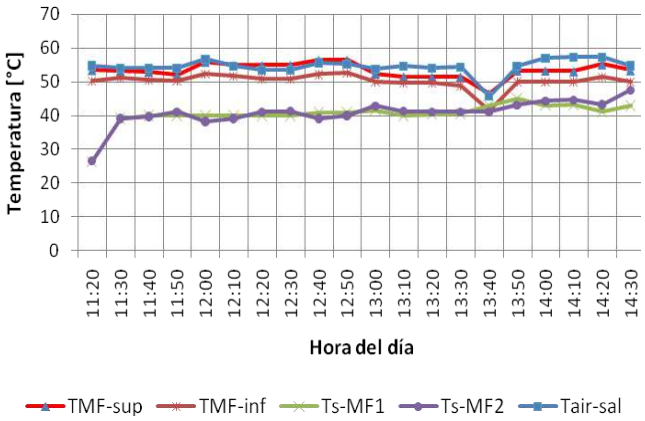


Figura 5 Comportamiento de las temperaturas en los módulos con y sin canal enfriamiento (Vair =3m/s).

Las temperaturas en los diferentes puntos de medición en la superficie posterior del módulo con enfriamiento y sin él, son semejantes como se muestra en la figura 5; así mismo, la temperatura del aire en la salida del canal de enfriamiento es similar a las diferentes temperaturas en la placa del módulo fotovoltaico siendo la velocidad del aire dentro del canal de 3m/s. Las temperaturas de menor valor corresponden a la superficie externa de los módulos y muy semejantes para el que tiene ventilación y para el que no. Las temperaturas de la superficie interna son mayores a las externas principalmente por que la superficie interna se aisla de la corriente natural de aire por el uso del canal y dependen del enfriamiento que se le provoque mediante el flujo forzado a traves del canal. Se experimenta tambien con velocidad del aire en el canal de 1m/s, generandose los resultados mostrados en la figura 6. En este caso como el flujo de aire es de velocidad baja con respecto a la prueba anterior, el enfriamiento en el módulo es menor, aumentando la temperatura en la superficie hasta en 14°C mayor que en la superficie del módulo sin canal.

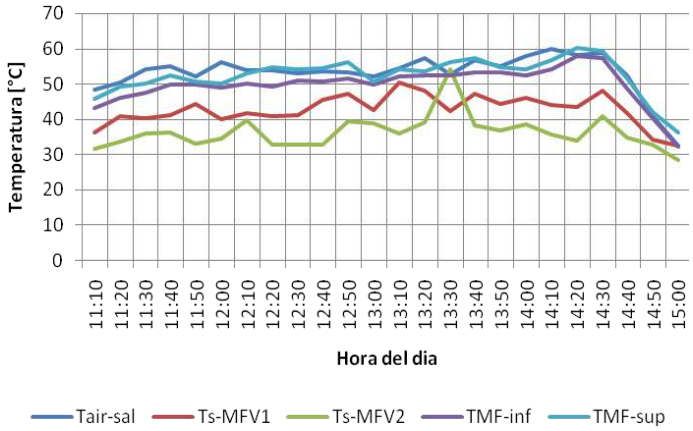


Figura 6 Comportamiento de las temperaturas en el módulo con y sin canal de enfriamiento (Vair = 1m/s).

Se hace una comparación del desempeño de los dos módulos a través del voltaje y corriente generados, esta se muestra en la figura 7, se observa una mínima ventaja para el módulo sin enfriamiento (volt-MFV2) con respecto al voltaje, la diferencia máxima es de 1.6 volts, mientras que en la corriente son semejantes por lo que solo se observa una línea en la grafica, en cuanto a la potencia, el módulo sin el canal acoplado (pot-MFV2) muestra un mejor desempeño, poco significativo comparado con el módulo que tiene el canal (pot-MFV1), lo cual se debe a que la temperatura de la superficie del primero es inferior al del segundo, como se mostró en las graficas anteriores.

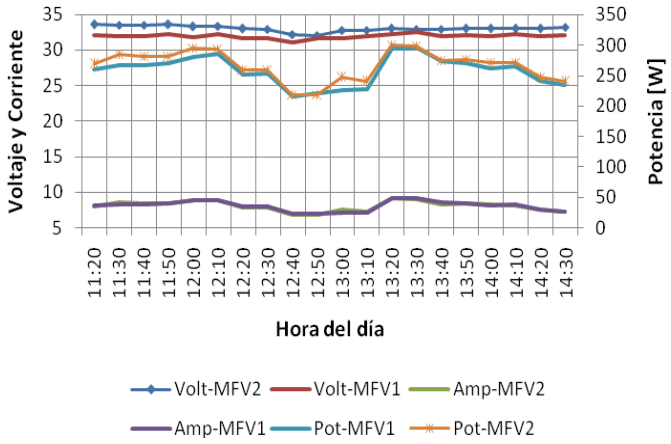


Figura 7.- Desempeño eléctrico del módulo con y sin canal de enfriamiento

Tabla 1.-Parámetros de operación del módulo fotovoltaico con canal de enfriamiento

Parámetro	**Prueba 1**	**Prueba 2**	**Prueba 3**	**Prueba 4**
Radiación [W/m^2]	932.7	862.8	586.2	701.97
Ta [°C]	23.78	23.81	23.29	22.98
Vair [m/s]	1.032	3.025	1.426	3.029
Tair-sal [°C]	60.6	54.48	53	52.48
Temperatura promedio del MFV [°C]	52.3	48	48.33	50.88
Temperatura del MFV superficie frontal [°C]	48	40.4	42.7	43.18
Calor útil [kJ/s]	0.46337	1.1313	0.5166	1.1029
Potencia Máxima [W]	278.62	258.013	251.01	255.11
Eficiencia térmica [%]	0.323	0.853	0.5737	0.9
Eficiencia eléctrica [%]	0.19	0.19	0.278	0.236
Eficiencia total [%]	0.513	1.043	0.85	1.13

Siendo:

Ta : temperatura ambiente
Vair : velocidad del flujo de aire a través del canal
Tair-sal : temperatura del aire en la salida del canal

Tabla 2.-Parametros de operación del módulo fotovoltaico sin canal de enfriamiento

Parámetro	**Prueba 1**	**Prueba 2**	**Prueba 3**	**Prueba 4**
Radiación [W/m^2]	932.7	862.8	586.2	701.97
Temperatura del MFV superficie frontal [°C]	42.2	40.7	36.4	39.4
Potencia [W]	292.56	265.32	265.76	266.97
Eficiencia total [%]	0.204	0.2	0.295	0.247

En la Tabla 1, la energía eléctrica se representa como potencia y la energía térmica como calor útil, en esta última el parámetro de mayor influencia es el flujo másico representado por la velocidad del aire (Vair), ya que al comparar los resultados entre las dos primeras pruebas (Prueba 1 Vair =1.032 m/s y Prueba 2 Vair =3.025m/s), el calor útil para la segunda prueba es mucho mayor 1.1313 kW que para la primer prueba 0.46337kW, a pesar de que en la primer prueba la radiación solar y la temperatura del módulo son mayores 932.7W/m^2 y 60.6°C respectivamente que en la segunda prueba 862.8W/m^2 y 54.48°C respectivamente. La comparación entre el módulo con canal de enfriamiento y el módulo sin canal se hace con base en la energía eléctrica generada, ver Tabla 1 y 2. El mejor desempeño es para el módulo sin ventilación y es más significativo cuando la velocidad del aire de ventilación es cercana a 1 m/s, en este caso el módulo sin canal de ventilación genera hasta 14.75 Watts mas que el módulo con canal, lo anterior indica que a esa velocidad no se provoca enfriamiento del módulo; cuando la velocidad aumenta hasta 3 m/s, la diferencia entre la potencia del módulo con canal y sin canal es de 7.3 Watts, mayor potencia para el segundo. Aún el enfriamiento a esta velocidad no es representativo y se corrobora con el valor de las temperaturas en la superficie de cada módulo, que en la mayoría de los casos es mayor para el módulo con canal de enfriamiento. Si se consideran las eficiencias eléctricas para comparar el desempeño entre los dos sistemas, también la ventaja es para el que no tiene canal de enfriamiento con un 2% mayor en el mejor de los casos.

CONCLUSIONES

Se realizó el estudio experimental del desempeño de un módulo fotovoltaico, acoplado a un sistema de enfriamiento mediante de un canal de sección transversal variable aletado y se comparó bajo las mismas condiciones de operación, dimensiones y características eléctricas con un módulo sin enfriamiento. El enfriamiento del módulo se realizo con aire en condiciones del ambiente con velocidades del flujo de 1, 1.5 y 3 m/s.

Hasta ahora, los resultados demuestran claramente que el acoplamiento del sistema de enfriamiento al módulo fotovoltaico no presenta ninguna mejora en el desempeño eléctrico comparado con el módulo sin enfriamiento debido a que los parámetros de los que depende la potencia, de acuerdo a la tabla 1, es la radiación solar y la temperatura de la placa. Así mismo es poco notoria la influencia del flujo de aire que provoca el enfriamiento en el módulo, por lo que se requiere experimentar con flujos de aire a velocidades mayores a 3.029 m/s.

La ventaja de emplear el sistema de enfriamiento es porque se estaría trabajando con un sistema hibrido, generando energía eléctrica como propósito principal de un módulo fotovoltaico y la generación de energía térmica a través del calentamiento del flujo de aire empleado como enfriamiento.

Se sugiere unir aletas directamente a la superficie trasera del módulo fotovoltaico para mejorar la transferencia de calor, sin embargo, se requiere analizar el proceso de construcción ya que puede resultar difícil su maniobra.

Por otro lado, con la propuesta de este nuevo sistema se tiene un calentador solar de aire que puede funcionar sin acceso a una toma eléctrica, con el beneficio de tener un flujo másico controlado en condiciones térmicas para procesos de deshidratación o calefacción de espacios.

En cuanto al diseño del sistema, se aumentará la longitud del conducto para provocar un mayor tiro natural de aire de enfriamiento sin necesidad de un elemento mecánico, lo anterior con el propósito de aumentar la eficiencia global del sistema.

REFERENCIAS

Chow T.T. (2010) A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, Applied Energy 87, 365-379.

Garg, H.P., Adhikari, R.S., (1997). Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. Renew. Energy 11, 363–385.

Baloch Ahmer A.B., Haitham M.S. Bahaidarah, Palanichamy Gandhidasan, Fahad A. Al-Sulaiman. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling, Energy Conversion and Management. 103, 14-27.

Kaiser A.S., Zamora B., Mazón R., García J.R., Vera F. (2014) Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air cannel, Applied Energy 135 88–97

Rajoria C.S., Agrawal S., Chandra S., Tiwari G. N., Chauhan D.S.. (2016). A novel investigation of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system: A comparative study. Solar Energy 131, 107-118.

Flores V., Bedolla J., Hernández F., Bedolla . M. (2014). Estudio térmico de tres modelos de calentadores de aire solares. Memorias del XXI congreso internacional anual de la Somim, 24 al 26 de Septiembre, Juriquilla, Queretaro, México.

Flores V., Bedolla J., Bedolla M. (2015). Comportamiento térmico en convección natural de calentadores de aire aletados, Memorias del XXI congreso internacional anual de la Somim, 23 al 25 de Septiembre, 2015 Coatzacoalcos, Veracruz, México.

Prasad B.N. (2013). Thermal performance of artificially roughened solar air heaters. Solar Energy 91, 59-67.

Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M, Battisti R, Corrado A. (2005). Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. Progress Photovoltaics: Res Appl., 13:234–50.

Florschuetz LW. (1979). Extension of the Hottel–Whiller model to the analysis of combined photovoltaic/termal flat plate collectors. Solar Energy 22, 361-366.

Fujisawa T, Tani T. (1997). Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. Solar Energy Materials Solar Cells; 47(1–4):135–148.

Garg HP, Adhikari RS. (1997). Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. Renewable Energy;11(3):363–385.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA FV PARA EL EDIFICIO L (DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA, UQROO)

M. Picazo-Noh, J.O. Aguilar*, V. Sánchez, E. Torres, R. Acosta, J. Hernández y F. Chan
División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019
Tel 01 (983) 83 5 03 89
***ovidio@uqroo.edu.mx**

RESUMEN

Se presenta una propuesta para evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica al edificio de la División de Ciencias e ingenierías de la Universidad de Quintana Roo, cual tiene un consumo aproximado de 1,160 kWh/día. La propuesta consiste en utilizar un sistema fotovoltaico (SFV) interconectado a la red eléctrica como medio de producción de energía limpia, para no contribuir a la generación de gases de efecto invernadero y además poder tener un ahorro económico posterior al periodo de recuperación de la inversión. Los resultados obtenidos muestran que se requiere una inversión inicial de $ 11,604842.04 de pesos M.N. Estos costos incluyen tanto material, mano de obra y toda lo logística para la instalación y mantenimiento del Sistema Fotovoltaico. Este sistema aportará a la red eléctrica aproximadamente y en condiciones óptimas de radiación solar, 1160 kWh al día, que es equivalente a $ 1,954.66 pesos M.N. al día, esto representa un ahorro de $16,738,428.33 pesos M.N., una vez recuperada la inversión, es decir, al finalizar los 25 años de vida.

ABSTRACT

A techno-economical proposal for a photovoltaic system (PVS) to supply electric energy to the building of the Division of Science and Engineering at the Quintana Roo University is presented. That building have an electric consumption of 1,160 kWh per day. The proposal is to use the grid connected PV system as a means of producing clean energy without greenhouse gases generation and to have an economic savings after to payback period. The obtained results shows that it is requiered a initial investment of $11,604,842.04 mexican pesos which includes material, manpower and logistic for the installation and maintenance of the PV system. This system will provide to the grid, in good conditions of solar radiation, 1,160 kWh per day, which is equivalent to $1,954.66 pesos M.N. a day, and this represents a economic saving of $16,738,428.33 mexican pesos once recovered investment, at the end of 25 years.

Palabras claves: Interconexión a red; Fotovoltaica, ahorro de energía, celdas solares

INTRODUCCIÓN

Debido a la tendencia global de buscar la sustentabilidad en todos los procesos que involucren la generación de energía eléctrica, con el objetivo de estar preparados para el ocaso de los combustibles fósiles, la energía solar fotovoltaica (FV) ha tomado gran fuerza en las últimas dos décadas. [1] Lo anterior se debe a que la FV es una de las energías renovables con mayor madurez y más confiable, la cual consiste en la transformación directa de la energía radiante del Sol en energía eléctrica [2]. Este proceso se consigue utilizando materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones (efecto fotovoltaico) [3]. Actualmente existe una gran variedad de celdas solares, de silicio amorfo y policristalino y de película delgada entre otras. Los módulos solares que se fabrican con las celdas solares se pueden utilizar de forma autónoma, es decir, la energía generada se almacena en bancos de baterías para utilizarse posteriormente, o interconectados a la red eléctrica. Ésta última opción ha tenido gran aceptación en los últimos años, ya que la inversión inicial se reduce al prescindir del banco de baterías.

Desde 2007, la legislación mexicana permite a cualquier usuario particular, residencial o comercial, generar su propia electricidad mediante el uso de sistemas FV interconectados a la red electrice de CFE. Durante el día, si el usuario no utiliza la energía generada, la inyecta a la red y por las noches que necesita ésta energía, la toma de la red. La generación y consumo de la energía que utiliza se contabiliza con un medidor bidireccional, que a fin de mes proporciona un balance de energía al usuario, es decir, permite saber si el usuario tiene saldo a favor o en contra. Para uso residencial se tiene un tope máximo de generación de 10 kW y 30 kW para uso comercial. [4]

De lo anterior se puede observar que los sistemas FV interconectados a la red eléctrica son una valiosa inversión para lograr la sustentabilidad en la generación de energía eléctrica y así alcanzar las metas propuestas en la Estrategia Nacional de energía 2013-2027 [5]. En la Universidad de Quintana Roo, conociendo las metas de dicha estrategia, se trabaja activamente en generar propuestas que hagan uso

de los sistemas FV interconectados, para generar conocimiento que permita masificar su uso y además contribuir a la generación de empleos mediante la capacitación de personal que se dedique a estas labores.

El objetivo de esta investigación es evaluar la posibilidad técnica y económica de un sistema FV interconectado a la red para el Edificio L (División de Ciencias e Ingeniería) de la Universidad de Quintana Roo. El estudio inicia con unos diagnósticos de primer y segundo nivel, posteriormente la propuesta del sistema FV de 293.4 kW y el análisis de recuperación de inversión.

DESARROLLO

Descripción general del inmueble. El edificio objeto de este estudio está constituido de oficinas y laboratorios. Está destinado al uso académico y se encuentra ubicado en la Universidad de Quintana Roo en Boulevard Bahía esquina Ignacio Comonfort s/n, colonia del bosque, Chetumal, Quintana Roo. La **Fig.**1 (a**)** muestra el mapa de localización de la Universidad de Quintana Roo, el edificio L de la División de Ciencias e Ingeniería se encuentra marcado en un círculo rojo y en la **Fig.** 1 (b) se muestra una vista de planta del mismo.

Fig.1 (a) Ubicación de la Universidad (b) ubicación del edificio L.

El edificio L, se encuentra orientado al Noroeste y tiene una desviación de 7^{o} con respecto al eje Este-Oeste como lo muestra la **Fig.** 1 (b) y cuenta con una superficie útil de 2130 m^2

En el edificio se aplica la tarifa H-M debido a que cuenta con una demanda aproximada de 325 kW. Esta tarifa se divide en ciertos rubros a los cuales se le aplican cargos por la CFE tales como:

- Cargo por kWh de energía base.
- Cargo por kWh de energía intermedia.
- Cargo por kWh de energía punta.
- Cargo por kW de demanda facturable base.
- Cargo por kW de demanda facturable intermedia
- Cargo por kW de demanda facturable punta.
- Factor de potencia.
- Demanda. [6]

Censo de cargas. Se realizó el censo de cargas del edificio L para de determinar el consumo de energía eléctrica durante su operación diaria, el cual se dividió en cuatro áreas: aire acondicionado, iluminación, cómputo y otros. El censo de cargas se realizó de manera visual en cada uno de los niveles y en cada una de las áreas, tomando en cuenta las características de los equipos instalados, un uso de 6 a 8 horas por día y un factor de potencia de 0.95. Los resultados de este censo se muestran en la **Fig. 2.** Se observa que el mayor consumo energético se debe a los sistemas de acondicionamiento aire con 62% de la demanda total. Para tener un parámetro de consumo, se instaló un analizador de calidad eléctrica FLUKE 435 en los meses de Mayo, Junio y Octubre del 2014, que son los meses en que se tiene mayor demanda energética debido a las condiciones climáticas, lo cual se puede observar en la **Fig. 3**, en dónde al mediodía se tiene valores de radiación solar cercanos a los 1000 W/m^2.

El analizador se mantuvo registrando la energía consumida del edificio por un lapso de una semana, de esta manera se logró determinar la cantidad de energía que consume el edificio por día. En la **Fig. 4** se presenta el consumo de energía eléctrica durante un periodo de 24 horas de los tres días mostrados en la Fig. 3, iniciando a las 08:00 a.m. y terminando a las 08: 00 a.m. del día siguiente, registrando un consumo aproximado de 1.3 MWh. En los tres días analizados, el consumo energético fue similar, por tanto, este valor se tomó como referencia para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Fig. 2 Censo de cargas

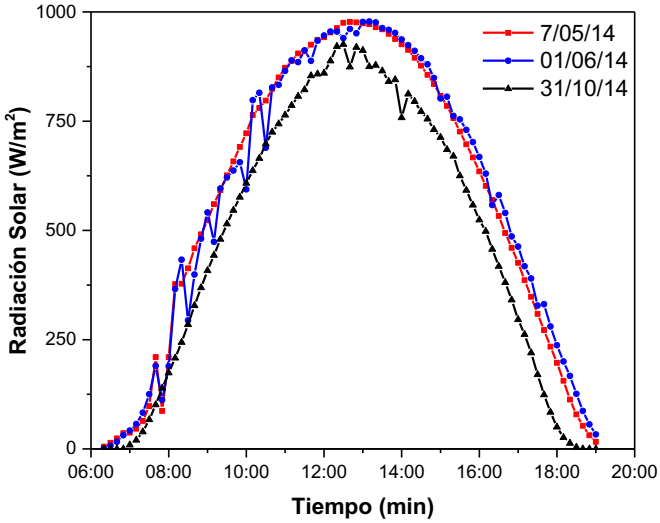


Fig. 3 Radiación Solar de tres días característicos en Chetumal, Quintana Roo.

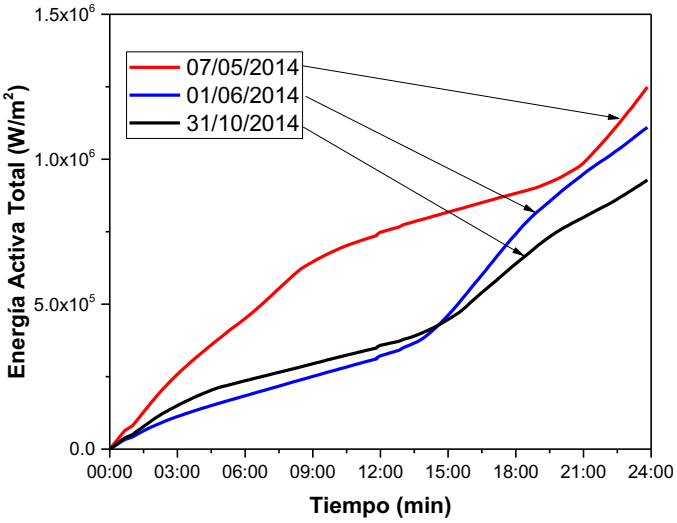


Fig. 4 Consumo de energía

Determinación de la potencia pico (Pp) del SV. Con el valor de consumo de energía eléctrica obtenido en el apartado anterior se determina la potencia pico del sistema FV.

Se asignan a los módulos FV's la Potencia que genera el módulo bajo condiciones NOCT[1] Normalizada al 100% de la Irradiancia, por lo cual la P_p se determina mediante la ecuación (1).

$$P_p = \frac{E_c}{R_s * R_T * \eta_t} \tag{1}$$

Donde:

- E_c = Energía Consumida promedio diaria anual, (1,300 KWh)
- R_s es el recurso solar promedio diario anual (h pico).
- R_T es el Rendimiento térmico del módulo que es igual a 85 % [17]
- η_t = es la eficiencia total en el uso y manejo de la energía ($\eta_t = \eta_l * \eta_w$) siendo η_l eficiencia del inversor = 95 % y η_w es la eficiencia en el cableado = 98 % que es la permitida en la NOM-001-SEDE-2012, por lo tanto η_t = 0.93

Por lo tanto P_p es igual a:

$$P_p = \frac{1{,}160\ kWh}{5h\ x\ .85\ x\ .93} = 293.4\ kW$$

La Potencia Pico a instalar es de 293.4 kW y esta se dividirá en 6 sub-arreglos idénticos de aproximadamente 149 paneles cada uno (48.9 kW por sub-arreglo), con el objetivo de disminuir las posibles pérdidas en la generación de energía eléctrica debido a posibles fallos en inversor, conexiones y cortocircuitos, entre otros.

Diseño del sistema fotovoltaico. La distribución de los módulos para su instalación se realiza con el fin de maximizar la producción anual de energía. Los principales parámetros que afectan al rendimiento de una instalación solar son:

- Orientación
- Inclinación
- Sombras sobre los módulos fotovoltaicos
- Pérdidas eléctricas
- Ventilación de los módulos fotovoltaicos

La superficie donde se instalaran los módulos está orientada, en gran parte, en dirección este-oeste, lo cual proporciona un área adecuada para instalar el SFV y pueda ser orientado al Sur que es la dirección óptima. La inclinación de los Módulos Fotovoltaicos debe ser la misma que la de la latitud del lugar, en este caso 18.5º. Dada la forma de la superficie y para evitar sombras entre los arreglos se tomará en cuenta la posición del Sol tanto en el solsticio de verano como en el de invierno, para determinar el espacio que habrá entre cada uno de los arreglos. La conexión de los módulos en la caja de conexión y el inversor se realiza con cable especial para instalaciones solares, dimensionado para tener unas pérdidas eléctricas mínimas de acuerdo a la norma NOM 001 SEDE 2012 [7]

De igual manera se optimiza la instalación aprovechando el área disponible evitando los sombreados parciales de filas de paneles (puntos calientes), además de dividir la potencia a instalar en 6 sub-arreglos, esta medida se realiza para evitar la suspensión de energía por el fallo de un solo inversor de esta manera tener una confiabilidad[2] del sistema de 83.3 %.

Configuración de los módulos FV requeridos.

A partir de los cálculos realizados se determinó que el número de módulos conectados en serie debe ser mayor a 6 piezas y menor a 11 (6 < NMS < 11); el número de módulos conectados en paralelo debe ser menor a 37 piezas (NMP < 37); y la potencia pico (P_p) a instalar que es de 293.4 kW se dividió en 6 sub-arreglos de 48.9 kW, en donde cada Sub-arreglo contará con un aproximado de 149 módulos de 327 W.

Debido a que la tensión de operación a circuito abierto de cada sub-arreglo no debe ser mayor a 600 V se opta por elegir la instalación de **7** módulos en serie y se comprueba la tensión máxima a circuito abierto mediante la ecuación (2).

$$Tensión\ Maxima\ Alcanzable_{\ oc} = NMS\ x\ V_{max,mod,oc} \tag{2}$$

$$Tensión\ Maxima\ Alcanzable_{\ oc} = (7\ )(\ 64.10\ V) = 448.7\ \text{V}$$

La tensión de funcionamiento es menor a 600 V. La corriente máxima de operación del inversor es de 248 A por tanto se instalaran 21 módulos en paralelo, con lo cual se obtiene una corriente menor a 248, lo cual se puede observar al sustituir valores en la ecuación (3).

[1] (Nominal Operating Cell Temperature: Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 800Wm^{-2}, Air temperature = 20°C, wind speed 1 ms^{-1}) = 45ºC para Tmax,mod yTmin,mod.

[2] La probabilidad de que el sistema realice una función específica, bajo condiciones operativas y ambientales especificas durante un tiempo determinado.

$$I_{max,op} = (21)(I_{sc,max}) = (21)(6.64\ \text{A}) = 139.44A < 248\ \text{A} \quad (3)$$

La **Tabla 1** muestra el resumen de la configuración definitiva del Sistema Fotovoltaico.

Tabla 1 *Configuración final del SFV*

Potencia pico (W_p)	No. Sub-arreglos (48.9 W_p c/u)	NMS por sub-arreglo (pza)	NMP sub-arreglo (pza)	Vmín Sub-arreglo (volts)	Vmáx Sub-arreglo (volts)	Vmáx_oc Sub-arreglo (volts)	Imáx_op Sub-arreglo (A)
293.4	6	7	21	336.56	377.3	448.7	139.44

En total se instalarán 882 módulos, los cuales estarán divididos en 6 sub-arreglos de 147 módulos cada uno. En la **Fig 5** se muestra la disposición final de los módulos FV que conforman todo el sistema.

Los aspectos de seguridad y protección son de vital importancia en la planeación, diseño, instalación, operación y mantenimiento de un sistema FV (autónomo o conectado a red) [8]. Los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados con otras fuentes de energía como la red eléctrica, requieren de medidas de seguridad adicionales a las de los sistemas aislados. La interfaz con la red representa algunos riesgos potenciales para los equipos de la red, para los del sistema FV, y para las personas involucradas en la operación y mantenimiento de ambos. Se deben eliminar condiciones inseguras que pueden originar accidentes u operaciones incorrectas, y que a su vez pueden causar lesiones a las personas o daños a los equipos de la red o del sistema FV, para esto se siguen las recomendaciones de la NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas. [7]

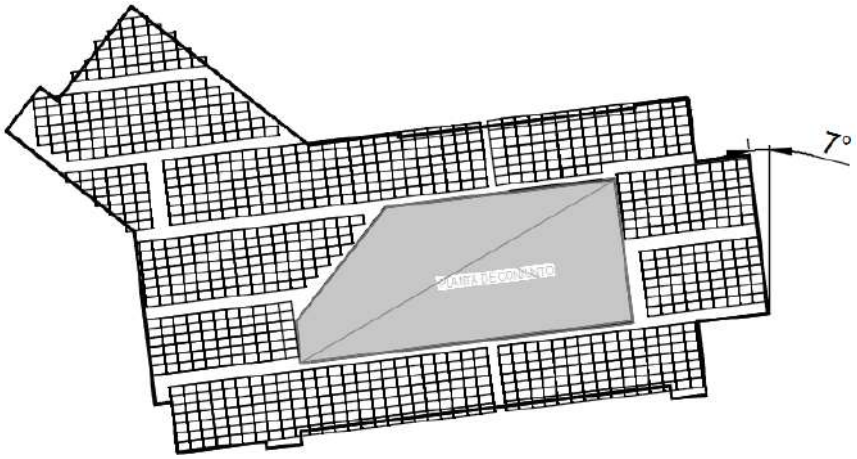


Fig. 5. Disposición final de los módulos FV.

RESULTADOS

Análisis de costos del SV. Una vez definida la potencia y configuración del sistema FV se determinan los costos aprocimados de materiales, mano de obra, 10% del costo total para mantenimiento y misceláneos del costo total, ver **Tabla 2.** El análisis se realiza con financiamiento del 100 % por parte de FIDE a una tasa de interés del 5%, el tiempo de recuperación de la inversión de este proyecto es de 12 años, considerando una tasa de inflación del 3.75 % anual, un aumento del 4.5 % anual en el precio de la energía y un tiempo de vida de 25 años del sistema FV.

Tabla 2 *Costo total del Sistema Fotovoltaico.*

Costo Materiales	Costo Mano de obra	Total	Manteniemiento (10% total)	Costo Total
$10,213,856.40	$336,000.00	$10,549,856.40	$1,054,985.64	$11,604,842.04

De esta manera el costo total aproximado del sistema es de once millones seiscientos cuatro mil ochocientos cuarenta y dos pesos 04/100 M.N, tomando en cuenta financiamiento el costo de inversión será de $ 15, 666,536.75 M.N. Costos estimados son de mayo de 2015.

Costo de la energía consumida por el edificio. El siguiente paso es determinar el costo de la energía eléctrica que consumirá el edificio durante la vigencia del sistema FV, con el objetivo de determinar el tiempo de recuperación de la inversión. Como el edificio tiene una tarifa H-M, el costo aproximado del consumo diario de 1,160 kWh/mes es de $ 60,594.66 por mes. Este costo se estimó con base en el consumo promedio en cada periodo (base, intermedia y punta) como se muestra en la **Tabla 3**, al año el edificio paga aproximadamente $

727,135.92. Con las condiciones financieras mencionadas en el apartado anterior, el costo de la energía que consumirá el edificio durante su tiempo de vida es de $32,404,965.08 pesos, como se muestra en la **Fig. 5** [9].

Tabla 3 *Costo de consumo de energía*

Tarifa	Periodo	Consumo (kWh)	Costo por kWh (pesos)	Costo mensual (pesos)	Costo Anual (pesos)
	Base	7,834.20	1.06	8,304.25	99,651.02
	Intermedia	23,756.40	1.28	30,408.19	364,898.30
	Punta	10,321.80	2.12	21,882.22	262,586.59
			Total	$ 60,594.66	$ 727,135.92

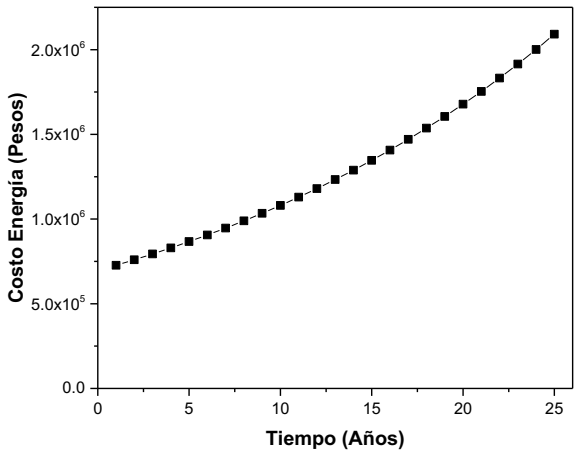


Fig. 5 Costo por año de la energía consumida por el sistema FV durante el tiempo de vida del proyecto.

Retorno de la inversión. Conociendo los costos de inversión del sistema FV ($15,666,536.75) y los costos de la energía que consumirá el edificio en 25 años ($32,404,965.08 pesos), se obtiene el tiempo de retorno de la inversión. En la **Fig 6** se presenta la relación costo-beneficio del sistema FV y el tiempo de recuperación de la inversión, que es de 15.5 años. A partir de ese ahí, el costo de energía eléctrica se considera un ahorro y alcanza un valor de $16,738,428.33 pesos.

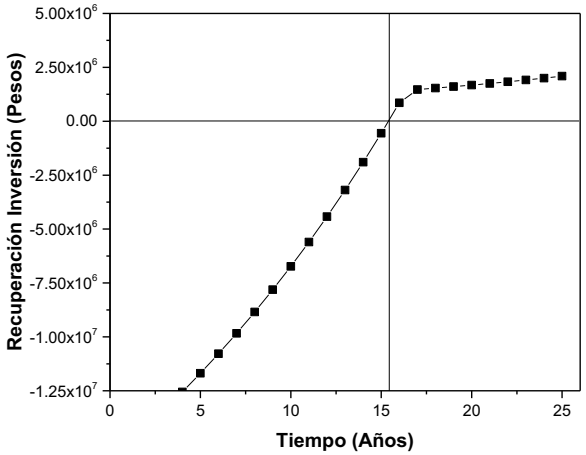


Fig. 7 Relación costo beneficio

Es importante mencionar que la inversión inicial es considerable para que una institución pública la pueda solventar, por lo que otra opción es dimensionar un sistema FV que cubra solamente la demanda en tarifa punta (la más costosa), reduciéndose así la inversión inicial y el tiempo de retorno de la inversión. Sin embargo, este no era el objetivo en este trabajo.

CONCLUSIONES

Se presenta el análisis técnico económico de un sistema FV interconectado a la red eléctrica para satisfacer la demanda del edificio L de la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo. Se determinó un consumo diario de 1160 kWh por día, que es equivalente a un pago mensual de $60,594.66 pesos M.N.

De acuerdo al análisis de costos realizado, el sistema FV tiene un costo inicial de $15,666,536.75 pesos, el cual se amortizará en 15.5 años. Al finalizar los 25 años de tiempo de vida estimado del sistema FV, se tendrá un ahorro de $16,738,428.33 pesos, los cuales pueden ser usados para instalar sistemas similares de menor capacidad a otros edificios de la Universidad de Quintana Roo.

Dado que la inversión inicial es cuantiosa, se propone dimensionar un sistema alterno, realizando el respectivo análisis técnico económico para cubrir solamente la demanda pico, en dónde se presentan los mayores costos. Con lo anterior, se podrá tener una menor inversión inicial y un costo de recuperación menor a 10 años.

REFERENCIAS

[1] F. S. JOSE, «COMPENDIO DE ENERGÍA SOLAR; Fotovoltaica, Térmica, Termoeléctrica.,» de *COMPENDIO DE ENERGÍA SOLAR; Fotovoltaica, Térmica, Termoeléctrica.*, MADRID, MUNDI-PRENSA , 2008, pp. 1-3.

[2] N. O. ARTEAGA, «GENERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA,» MORELOS , 1996.

[3] P. A. Lynn, de *Electricity from Sunlight: An introduction to Photovoltaics*, United Kingdom, 2010, p. 8.

[4] A. Sanchez, *Marco Normativo para la Interconexión a la Red,* Cuernavaca , 2013.

[5] «ESTRATEGIA NACIONAL DE ENERGÍA,» [En línea]. Available: http://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-energia. [Último acceso: JULIO 2016].

[6] «PAGINA CFE,» 2014. [En línea]. Available: http://www.cfe.gob.mx/paginas/Home.aspx. [Último acceso: 10 MARZO 2014].

[7] *NOM-001-SEDE-2012 INSTALACIONES ELECTRICAS,* MÉXICO D.F., 2012.

[8] J. Wiles, «Sistemas de energia fotovoltaica y el Código Eléctrico Nacional,» Nuevo México , 1996, pp. 22-25.

[9] «Gecko Logic Mex,» 14 Mayo 2015. [En línea]. Available: http://www.geckologic-mex.com/ahorro-solar/. [Último acceso: Jueves Mayo 2015].

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA CELDA FOTOVOLTAICA – DIFUSOR TÉRMICO PARA EL ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO TÉRMICO EN SU EFICIENCIA

Víctor Manuel Romero Medina, Estela Cerezo Acevedo, Melissa Elizeth Romero Hernández, Gabriel Alberto Franco Mena
Departamento de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad del Caribe, SM 78 Mz 1 Lt 1, Cancún, Quintana Roo, 77528, México, (52) 9988814424, Fax (52) 998 8814457, **vromero@ucaribe.edu.mx, ecerezo@ucaribe.edu.mx, 130300197@ucaribe.edu.mx, 130300225@ucaribe.edu.mx.**

Juan Carlos Sandoval Villegas, Julio César Moreno Dzul
División de Ingeniería y Tecnología, Universidad Tecnológica de Cancún, Carr. Cancún-Aeropuerto, Km. 11.5, S.M. 299, Mz. 5, Lt 1, Cancún 77500, Quintana Roo, México. **jsandoval@utcancun.edu.mx, jmoreno@utcancun.edu.mx**.

Frédéric J. Lesage, Eric Sempels, Olivier Leduc
Département d'Informatique et d'Ingénierie, Université du Québec en Outaouais, Canada. **Frederic.lesage@uqo.ca, seme01@uqo.ca**.

RESUMEN

Actualmente en la tecnología fotovoltaica se observa que la eficiencia de conversión fotoeléctrica disminuye al aumentar la temperatura del material de la celda. Una propuesta de solución, es incorporar difusores térmicos en los paneles fotovoltaicos para aumentar su eficiencia. Este trabajo se propone la metodología de simulación y se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el programa Ansys-Fluent del sistema celda fotovoltaica-difusor térmico en las condiciones climáticas de la ciudad de Cancún, Q. Roo. En este trabajo se definieron los modelos geométricos para la simulación del panel fotovoltaico y un difusor térmico comercial con las dimensiones de diseño previamente establecidas. Posteriormente, usando el módulo Design Modeler del programa Ansys se construyó la geometría y se establecieron los tipos de frontera; a continuación, utilizando el módulo Ansys-Mesh, se discretizó el volumen de control. Finalmente, utilizando el programa Ansys-Fluent, se resolvieron numéricamente las ecuaciones físicas de conservación para la determinación de las propiedades del sistema celda fotovoltaica –difusor. Para el desarrollo de la metodología, el fenómeno se consideró como estacionario. Finalmente se analizaron los resultados obtenidos numéricamente mediante gráficas de las temperaturas en puntos específicos de interés dentro del volumen de control. El mejor comportamiento térmico del sistema FV-difusor se seleccionó para su implementación futura en sistemas fotovoltaico – termoeléctrico que serán instalados en la Universidad del Caribe y en la Universidad Tecnológica de Cancún para realizar pruebas de funcionamiento experimentales y serán comparados con resultados de laboratorio obtenidos en la Universidad de Quebec de Canada.

ABSTRACT

The main challenge in current photovoltaic technology is the observation that the photoelectric conversion efficiency decreases with increasing temperature of the photovoltaic cells. A proposed solution is to incorporate thermal diffusers into the design of photovoltaic panels in an effort to minimise adverse thermal effects.

This paper presents the development and results of photovoltaic cell - thermal diffuser system level simulations using ANSYS FLUENT software. The thermal input conditions are drawn from the naturally occurring climatic conditions of Cancun, Q. Roo.

The geometrics models are based on a target PV panel application and with predefined dimensions. Subsequently, the geometry is specified using the Design Modeler program, the control volume is discretized, and the boundary conditions are defined. Built-in ANSYS FLUENT programs are used to solve the conservation equations numerically and to determine the thermal properties of the PV-Diffuser system. These properties are necessary to describe the evolution of the thermal parameters over the course of a day. The mathematical model is defined as transitory thereby solving the equations over target time intervals. The results are discussed with graphical representations of the transport properties such as field vectors describing the heat and mass flow with respect to time at specific points of interest within the control volume.

The PV-Diffuser system design yielding optimal thermal performance is selected for future implementation in photovoltaic–thermoelectric system level investigations. The test-stands will be installed at the Universidad del Caribe and the Universidad Tecnologica de Cancun and their results will be compared with those measured in the laboratory at Université du Québec.

Palabras claves: Celda fotovoltaica, efecto fotoeléctrico, energía solar, CFD, difusor térmico.

INTRODUCCIÓN

Debido a la interacción directa con la radiación solar, en algunas regiones del planeta las celdas fotovoltaicas tienden a calentarse demasiado provocando que su eficiencia se vea disminuida, siendo esta de alrededor del 10 – 12% (para variaciones de temperatura de 10 a 45°C) como se muestra en la fig. 1 [Van Dyk, Radziemska, Aish]. Desde hace varias décadas se han realizado estudios experimentales modificando la configuración de las celdas de tal forma que se reduzca el sobrecalentamiento para evitar la disminución de dicha eficiencia [López-Meraz], estos estudios han llevado a definir los "coeficientes de temperatura" que permiten determinar las características de funcionalidad de los paneles fotovoltaicos relacionados con la corriente, el voltaje y la potencia, coeficientes que juegan un papel importante en el diseño y dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos comerciales [King]. Sin embargo, se han realizado diferentes estudios enfocados a determinar si es posible aprovechar este incremento de temperatura para obtener un porcentaje complementario de potencia eléctrica que compense la pérdida debida a este incremento de temperatura [Lesage, Trinh, Radziemska, Vorobiev].

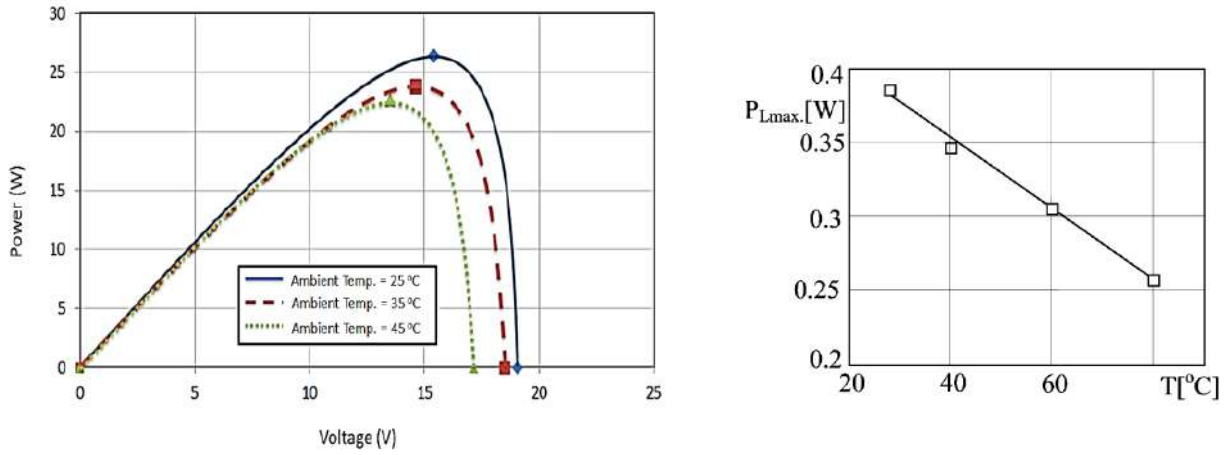


Figura 1. Disminución del voltaje en circuito abierto y la potencia máxima con el aumento de la temperatura de la CFV. [Radziemska]

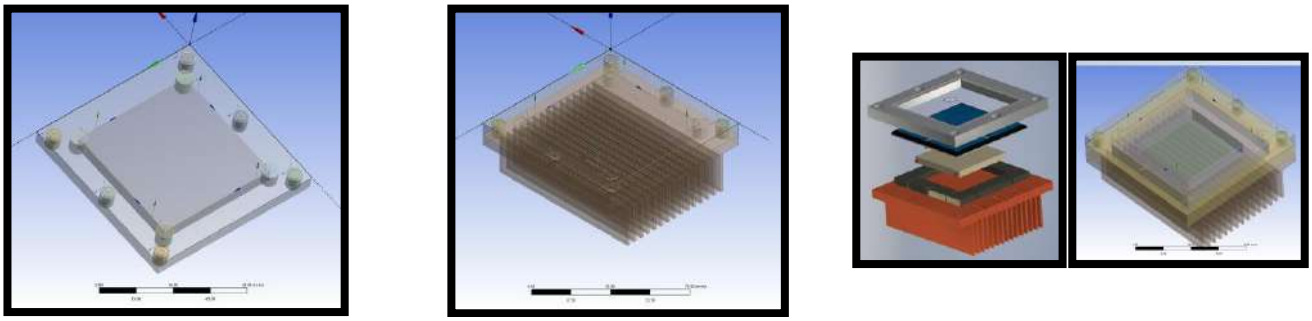
En este artículo se presentan los avances en el estudio sobre el comportamiento térmico del sistema celda fotovoltaica-difusor térmico en estado estacionario; en trabajos posteriores, el estudio se extenderá a un análisis transitorio aplicando un modelo denominado *simulación con carga solar* (solar load modelling) mediante el uso del programa de simulación de CFD, Ansys-Fluent. Este estudio forma parte del proyecto de investigación *Optimización Térmica y Eléctrica de Módulo Fotovoltaico Sobrecalentado* que es desarrollando por la Red Temática de Colaboración Académica denominada Ingeniería en Energía Renovable y Sustentabilidad, formada por los cuerpos académicos de Sistemas Energéticos y Sustentabilidad de la Universidad del Caribe, y el de Ingeniería y Desarrollo Tecnológico Sustentable de la Universidad Tecnológica de Cancún, así como investigadores del Departement D'Informatique et Íngénierie de la Universidad de Quebec de Canadá.

METODOLOGÍA

El modelo a estudiar consiste en reducir la pérdida de eficiencia de la celda fotovoltaica (CFV) colocando un difusor de calor (DC), consistente en una serie de aletas, que actúan como un sumidero transfiriendo el calor desde el sistema hacia el medio ambiente mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección. Debido a que la CFV trabaja a la intemperie captando la radiación solar para convertirla en energía eléctrica, y como la posición del sol cambia en el transcurso del día, además que está expuesto a las corrientes de aire, las cuales también cambian su velocidad y dirección a lo largo del día, lo que ayuda a la difusión de calor a través de las aletas, por lo que inherentemente el fenómeno es transitorio; sin embargo, las primeras simulaciones presentadas en este trabajo corresponden a fenómenos en estado estacionario, con el propósito de verificar la funcionalidad de la metodología para aplicarla en un futuro al caso transitorio. Entonces, el estudio mediante CFD implica resolver las ecuaciones de conservación básicas tridimensionales para el análisis de transferencia de calor y determinar las mejores condiciones para optimizar la eficiencia del sistema fotovoltaico-termoeléctrico-difusor de calor (CFV-TE-DC).

La primera etapa del estudio mediante CFD y que se describe en el presente trabajo, consiste en realizar simulaciones estacionarias para diferentes configuraciones del sistema indicadas a continuación (ver fig. 2): a) CFV, b) CFV-DC, c) CFV-TE-DC. Las geometrías se presentan en formato transparente para que se puedan visualizar los diferentes componentes. Las dimensiones de cada elemento fuero proporcionadas por los investigadores F. Lesage y E. Sempels de la Universidad de Quebec, Canada. Para cada una de estas configuraciones se consideran diferentes velocidades de corriente de aire para tomar en cuenta el fenómeno convectivo. Durante las simulaciones se definieron puntos específicos para la determinación de la temperatura, principalmente las caras superior e inferior de cada configuración; es decir, a) caras superior e inferior de la CFV, b) cara superior de la CFV y punta de aletas del DC, c) cara superior de la CFV, punta de aletas del DC y caras superior e inferior del dispositivo TE. Estas temperaturas serán comparadas con resultados experimentales existentes en la bibliografía con la finalidad de validar los modelos de simulación; y si estos son adecuados, en trabajos posteriores se procederá a realizar las simulaciones transitorias que permitirán determinar en qué medida el sistema TE ayuda a reducir la pérdida de eficiencia del sistema FV. Por otro lado, la idea de incluir el módulo termo eléctrico es aprovechar la diferencia de temperatura

que se presenta en la cara inferior de la CFV (cara superior del módulo TE) y la cara inferior del módulo TE (cara superior del DC); dicha diferencia de temperaturas da como resultado una corriente eléctrica que puede sumarse a la corriente eléctrica generada por la CFV.



a) configuración CFV b) configuración CFV-DC c) configuración CFV-TE-DC

Figura 2. Configuraciones para las simulaciones estacionarias del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones de conservación

Las ecuaciones de conservación a resolver con el programa Ansys-Fluent son:
Conservación de la masa,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

Conservación de la cantidad de movimiento,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \tag{2}$$

Conservación de la energía,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = 0 \tag{3}$$

Transferencia de calor por radiación,

$$\frac{\partial}{\partial s} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + (a + \sigma_s) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') \, d\Omega' \tag{4}$$

en donde ρ es la densidad del aire, **v** es su velocidad, t es el tiempo, p es la presión, **g** es el vector aceleración gravitacional, **F** representa fuerzas externas que no participan en este modelo por lo que **F** = **0**, E es la energía del sistema, I(**r**,**s**) es la intensidad de energía de radiación incidente a la superficie, a y σ_s son coeficientes de absorción y dispersión, respectivamente, de la superficie de incidencia, n es el índice de refracción de medios semi opacos (aire), σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T es la temperatura, y Ω' representa la superficie frontera de una semi esfera debido a que la energía solar incidente se dispersa en todas direcciones.

Definición de la geometría para cada caso

Se crearon las geometrías de los componentes mediante el programa Design Modeler de Ansys para cada uno de los casos indicados en la fig. 2. La CFV mide 60 x 60mm y está montada en un marco de 80 x 80mm, el módulo TE mide 40 x 40mm y está montada sobre un marco de 80 x 80mm, y el DT es una placa de aluminio de 80 x 80 x 5mm con aletas rectangulares de 20mm de altura y 15 aletas de 1.4mm de espesor separadas 2.75mm. Las propiedades físicas de cada componente se muestran en la Tabla 1. Para realizar la simulación considerando la transferencia de calor por convección, cada modelo se envuelve en un volumen de fluido cúbico como se muestra en la fig. 3. Las caras del cubo de fluido son consideradas como fronteras de presión, y en el caso en que se considere el flujo de aire debida a la corriente atmosférica, dependiendo de la dirección del viento la frontera se cambia a una frontera de entrada considerando la velocidad del viento correspondiente.

Tabla 1. Componentes, sus dimensiones y propiedades físicas.
Fuente: Elaboración propia

Componente	Dimensiones	$\rho\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$k\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$	$c_p\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
CFV	60 x 60mm	2330	148	700
Módulo TE	40 x 40mm	6240	2.35	202
DT (aluminio)	80 x 80 x 5mm	2698.4	237	900

Marco de soporte (aislante)	80 x 80mm	1320	0.25	0.035

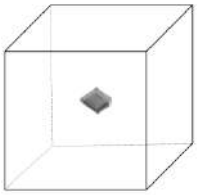


Figura 3. Volumen de fluido para el análisis convectivo.
Fuente: Elaboración propia.

Discretización del volumen de control

Para resolver las ecuaciones de conservación, el volumen de control se divide en elementos finitos, lo que se conoce como discretizar el volumen de control. En la fig. 4 se puede ver la discretización para el dispositivo completo CFV-TE-DC. La discretización se realizó de forma similar para los modelos de cada caso mostrados en la fig. 2. El volumen de fluido también es discretizado para la resolución de las ecuaciones de conservación, pero no se muestra en las figuras.

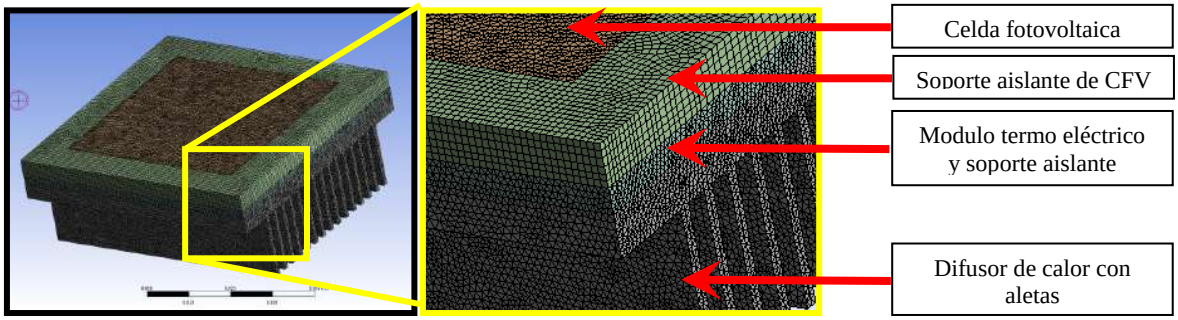


Figura 4. Discretización del volumen de control del dispositivo completo.
Fuente: Elaboración propia.

Simulación mediante el programa Ansys-Fluent

Después de haber discretizado el volumen de control, se utiliza el programa Fluent en donde se realizan los siguientes pasos previos a la solución de las ecuaciones de conservación:

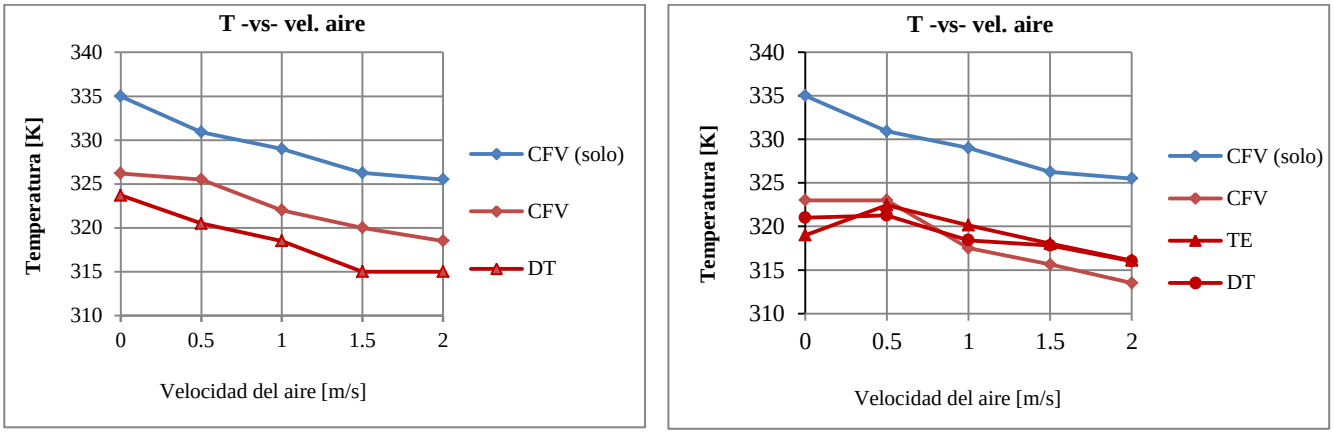
1. Se establece que las simulaciones se realizarán en estado estacionario; es decir, sin dependencia del tiempo. También se activa la aceleración gravitacional que es importante para el cálculo de las ecuaciones de convección natural.
2. Se definen los materiales de los diferentes componentes del sistema híbrido, así como del aire.
3. Se asigna a cada volumen del dispositivo el material con el que está construido. Esto incluye el volumen correspondiente al aire.
4. Se definen las ecuaciones a resolver. Para este caso se activa la ecuación de la energía, se considera el modelo de radiación solar y el modelo de turbulencia. En el modelo de radiación solar se activa el módulo de carga solar. Para ello se considera un día típico de la ciudad de Cancún (21° 11’ 59” N, 86° 49’ 26” W), a una hora de máxima radiación solar (13:00 hrs.)
5. Se selecciona el modelo de discretización para cada ecuación de conservación a resolver. Estas ecuaciones se resuelven mediante técnicas numéricas iterativas que pueden ser mediante aproximaciones de primer orden.
6. Se realiza la simulación hasta que se alcanza la convergencia de las ecuaciones de conservación.

Mediante el proceso anterior, se realizaron varias simulaciones considerando diferentes velocidades del viento para analizar cómo es el efecto convectivo en el balance de energía. Las velocidades de viento consideradas fuero de 0, 0.5, 1, 1.5, 2 $\frac{m}{s}$.

RESULTADOS

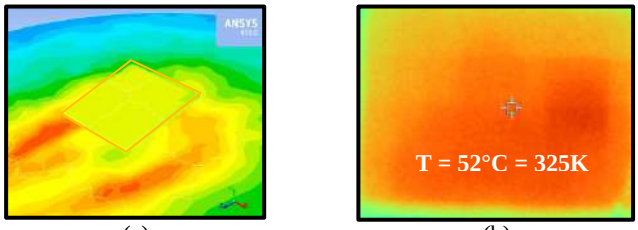
El análisis se centra principalmente en comparar las temperaturas en la cara superior del dispositivo, que se encuentra expuesta directamente a la radiación solar, y las superficies inferiores de cada modelo. También existe interés en analizar las temperaturas en las superficies intermedias del caso (c); es decir, las caras superior e inferior del módulo TE. Los resultados de las simulaciones se muestran en la fig. 5. Tomando como referencia la fig. 2, se muestra la comparación de las temperaturas entre los casos (a) y (b) (Fig. 5(a)) y los casos (a) y (c) (fig. 5(b)). La curva de color azul representa la temperatura de la celda fotovoltaica sola. Debido a las dimensiones de la celda, prácticamente las temperaturas en las caras superior e inferior son iguales; pero se puede apreciar que cuando se presentan vientos debidos a las corrientes del aire, estas temperaturas tienden a reducirse, como se esperaba. En la fig. 5(a), se puede comparar el efecto de colocar el difusor térmico en la superficie inferior de la CFV. Las curvas rojas representan las temperaturas del dispositivo (b), en donde se puede apreciar la disminución de la temperatura en la cara superior de la CFV debido a la colocación del DT, la reducción de la

temperatura en la cara superior de la CFV prácticamente se reduce en la misma proporción para el rango de velocidad del aire indicado, variando aproximadamente entre 5.4 y 8.8°C; esto representa una reducción de la temperatura entre 9.33 y 14.19%. En la fig. 5(b) se puede apreciar la reducción en la temperatura de la cara superior de la CFV, pero la reducción se vio mejorada variando entre 7.7 y 12°C; representando una reducción de la temperatura entre 13.64 y 22.84%. Al parecer, esta reducción se vio mejorada al considerar el módulo TE entre la CFV y el DT. En la fig. 6(a) se puede apreciar la distribución de las temperaturas de la simulación de la CFV, que corresponde a la temperatura aproximadamente de 50°C en la cara superior. En la fig. 6(b) se puede apreciar una imagen termográfica de una celda fotovoltaica instalada en la Universidad Tecnológica de Cancún (UTC). Esta imagen fue tomada el 3 de junio de 2016 a las 2PM. Comparando esta imagen con las gráficas de la fig. 5 se puede apreciar que los modelos simulados se aproximan bastante bien a los resultados experimentales. Sin embargo, todavía se está en proceso de realizar más experimentos in situ cuyos resultados servirán para comparar las simulaciones que se están realizando para optimizar la metodología de la simulación. Por otro lado, es importante analizar cómo se presenta la temperatura en las caras superior e inferior del módulo TE, debido a que esta diferencia tiene gran importancia en la obtención de la corriente eléctrica producida en el módulo TE debido a este gradiente de temperatura. En la fig. 5(b) se presentan las curvas de comportamiento de la temperatura con la velocidad del viento. La curva TE corresponde a la cara superior del módulo TE y la curva DT corresponde a la cara entre el módulo TE y el DT. En la gráfica se puede observar una discrepancia para el caso en que la velocidad del viento es 0 $\frac{m}{s}$; sin embargo, a velocidades mayores se presenta una diferencia de temperaturas que se va reduciendo conforme aumenta la velocidad del viento. Este comportamiento es adecuado debido a que existe un efecto de enfriamiento debido al efecto convectivo del aire.



a) b)

Figura 5. Gráficas comparativas de temperatura promedio entre la CFV y los modelos: a) CFV-DT y b) CFV-TE-DT
Fuente: Elaboración propia.



(a) (b)

Figura 6. a) Distribución de temperaturas de la simulación, b)Fotografía termográfica de una celda fotovoltaica en la UTC, medida a las 2PM del 3 de junio de 2016.

CONCLUSIONES

En la actualidad se están realizando estudios sobre el funcionamiento de las CFV y de cómo el incremento en su temperatura produce una disminución en su eficiencia. Por otro lado, al presentarse este incremento de temperatura, surgió el interés de instalar un módulo termo eléctrico a la celda fotovoltaica de tal forma que se pueda aprovechar este incremento de temperatura para producir un residual de potencia eléctrica que se pueda sumar a la potencia producida por la CFV para compensar la pérdida descrita. En este trabajo se desarrolló la metodología para la simulación en estado estacionario de un sistema híbrido CFV-TE-DT expuesto a la radiación solar, con la finalidad de analizar su efecto en la disminución de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos debido al incremento en la temperatura del mismo. Los resultados obtenidos indican que las simulaciones se aproximan adecuadamente a los resultados experimentales, lo que nos permite

establecer que la metodología es adecuada para realizar las simulaciones en estado transitorio, para así evaluar el balance energético en cada sistema de la fig. 2. Sin embargo, todavía es necesario realizar las simulaciones de este trabajo con propiedades térmicas efectivas tanto de la CFV como del módulo TE, ya que se utilizaron propiedades de materiales similares que no necesariamente corresponden a los componentes reales utilizadas en el laboratorio. Actualmente, investigadores de la Universidad de Quebec están determinando experimentalmente las propiedades térmicas de estos materiales que serán utilizados en las próximas simulaciones.

REFERENCIAS

Aish, Q. M. (2015). *Temperature Effect on Photovoltaic Modules Power Drop*, Al-Khwarizmi Eng. Journal,Vol. 11, No. 2, p. 62- 73.
Belanger, S., Gosselin, L. (2011). *Thermoelectric generator sandwiched in a crossflow heat exchanger with optimal connectivity between modules*, Energy Conversion and Management, Elsevier, No. 52, p. 2911-2918.
Van Dyk E. E., Scott B. J., Meyer E. L., Leitch A. W. R. (2000). *Temperature dependence of performance of crystalline silicon photovoltaic modules*, South African Journal of Science, Vol. 96, No. 4, p.198-200.
King, D. L., Kratochvil, J. A., Boison, W. E. (1997). *Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results*, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, USA.
Lesage, F. J., Pagé-Potvin, N. (2013). Experimental analysis of peak power output of a thermoelectric liquid-to-liquid *generator under an increasing electrical load resistance*. Energy Conversion and Management, No. 66, p. 98-105.
López-Meraz, R. A. (2012). *Análisis térmico de las celdas fotovoltaicas en un sistema interconectado a la red*, Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana Campus Xalapa, México.
Trinh, A. K., González, I., Fournier, L., Pelletier, R., Sandoval V, J. C., Lesage, F. J. (2014). *Solar thermal energy conversion to electrical power*. Applied Thermal Engineering, 70(1), p. 675-686.
Radziemska, E. (2003). *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*, Renewable Energy, No. 28, p. 1-12.
Van Dyk E. E., Scott B. J., Meyer E. L., Leitch A. W. R. (2000). *Temperature dependence of performance of crystalline silicon photovoltaic modules*, South African Journal of Science, Vol. 96, No. 4, p.198-200.
Vorobiev Y, González-Hernández J, Vorobiev P, Bulat L. (2006). *Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion*. Solar Energy, Elsevier, No. 80, p. 170–176.

40 AÑOS
ANES
Asociación Nacional de Energía Solar

ISES
International Solar Energy Society

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR 2016

Tecnología Solar Térmica "TST"

- Captadores y Acumulación Térmica
- Solar Térmica de Alta Temperatura
- Refrigeracion Solar
- Instalaciones Solares de Baja Temperatura
- Cocinas Solares, Secaderos, Destilacion y Desinfeccion Solar

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CIRCULACIÓN TERMOSIFÓNICA EN UN REACTOR FOTOCATALÍTICO TIPO CPC. PRIMER APROXIMACIÓN.

Julio César Morales-Mejía, Ilse Liliana Soto Cruz
División de Ciencias Químico-Biológicas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Av. 1o de Mayo s/n, Santa María las Torres Campo Uno, 54740 Cuautitlán Izcalli, México, México.
Teléfono: 005255 56232025, **mmjc_80@yahoo.com.mx.**

Rafael Almanza Salgado
Coordinación de Mecánica y Energía, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F.; C.P. 04510,
Teléfono: 005255 56233689, **ras@pumas.iingen.unam.mx**.

RESUMEN

Se presentan los resultados de experimentos a escala piloto sobre la circulación de agua por efecto termosifónico en un reactor fotocatalítico tipo CPC de concentración geométrica unitaria, mediante el uso de un colector plano de tubos de cobre colocado en dos posibles posiciones: antes y después del reactor CPC. Se midió la velocidad instantánea a diferentes tiempos de insolación. Se logró hacer circular el agua por este efecto entre el tanque y el reactor, considerando que se tuvo un sistema sin aislamiento térmico en el tanque y en el reactor CPC para incrementar al mínimo la temperatura en el reactor, pero lo suficiente para hacer circular el agua, los resultados son alentadores pero aun deben optimizarse.

ABSTRACT

We present the results of some experiments carried out at pilot scale. These experiments deals with circulating water by thermosiphon effect along a photocatalytic reactor with a CPC collector and used a small flat-plate solar water heater as a booster. The water heater position was analyzed, comparing flow when it was connected before and after the CPC collector (photocatalytic reactor). Authors measured instantaneous volumetric rate at several exposure times, under solar irradiance. We can state that water flowed from the tank to the CPC reactor and vice versa by thermosiphon. It is interesting because we tried to keep temperature as low as possible inside the reactor, without thermal insulation, and it was just high enough to make water flow along the system. These preliminary results are motivating and must be optimized.

PALABRAS CLAVE

CPC, termosifón, fotocatálisis, solar, circulación.

INTRODUCCIÓN

La depuración de aguas para consumo y de agua residual son operaciones importantes para la sociedad, evitando con ello problemas de salud pública y conservando un entorno apto para la vida, el esparcimiento y actividades económicas diversas. Sin embargo, en México y en muchos países de América Latina, El Caribe, Asia y África, se le ha dado peso primordialmente al agua de consumo, dejando a veces en abandono el tratamiento del agua residual. Por ejemplo, en México se trata menos de la mitad de las aguas residuales generaras (CONAGUA, 2011). Esto, aunado al crecimiento exponencial de nuestra población, está llevando a acercarnos a una crisis hídrica si cruzamos el umbral de los 1750 litros de agua renovables per cápita y por año disponible como media a nivel nacional (World Bank, 2013). Esta tendencia se presenta en la Fig. 1).

Un factor clave que ha llevado a una situación de riesgo de crisis hídrica es que el tratar el agua residual cuesta y ésta termina siendo dispuesta en un río, un lago o algún mar, sin una ganancia o recuperación económica directa de lo invertido en tratarla, cosa que no pasa en el caso del agua de consumo (potable), pues, en este caso, el usuario paga una tarifa directamente proporcional por la cantidad usada. Este paradigma debe ser vencido y cambiado, pues debemos tomar en cuenta que el agua tiene un ciclo biogeoquímico en el que tiene cierta "purificación natural", pero al ritmo actual esta auto purificación se ha visto rebasada por la creciente cantidad de agua residual no tratada y por la también creciente cantidad de sustancias no biodegradables y/o bio-acumulables que vertimos en el agua.

Debemos tomar en cuenta que, si bien el desarrollo científico y tecnológico asociado a depurar aguas residuales es bastante bueno y se tiene capacidad técnica sobrada para tratar estas aguas, resta aun vencer factores como el costo asociado al tratamiento y la gestión adecuada de esta agua residual tras su tratamiento. La gestión del agua residual tratada puede fácilmente replantearse hacia su comercialización masiva al sector industrial y comercial para aplicaciones tales como agua de enfriamiento, agua de limpieza de patios de maniobras, agua de riego de áreas verdes y de sembradíos, agua para sistemas sanitarios, etc. Para el abatimiento del costo de tratamiento, existen muchas empresas y universidades trabajando en ello. Dentro del abanico de posibilidades disponibles, el aprovechamiento de energías renovables, como la solar, es atractivo. Su uso puede plantearse para impulsar equipos convencionales (sistemas fotovoltaicos o fototérmicos de potencia) o para realizar directamente el tratamiento a través de procesos no convencionales. Este último caso es el explorado en este trabajo. La energía necesaria para el bombeo de agua en una planta de tratamiento de aguas residuales puede representar una fracción importante del costo por metro cúbico de agua tratada, sobre todo cuando se usan sistemas anaerobios y/o la selección del equipo de bombeo no es la óptima. En sistemas aerobios convencionales, el principal consumo eléctrico es debido a los sistemas de aireación de los reactores (hasta 75% del consumo total).

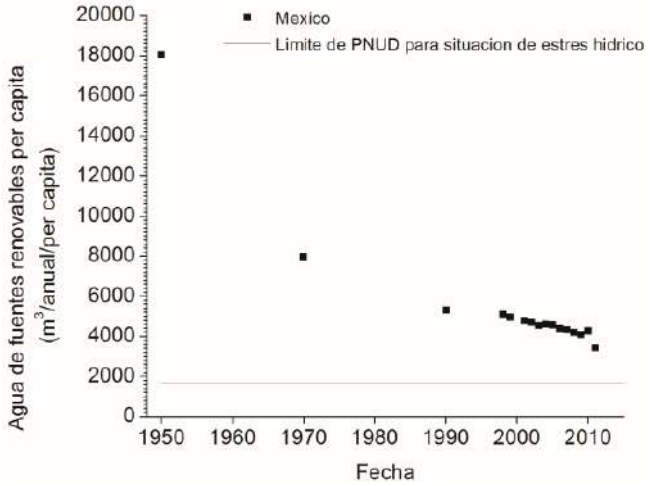


Figura 1. Disponibilidad de agua renovable de calidad per cápita en México (Morales-Mejía, 2014)

En este trabajo exploramos la posibilidad de hacer circular agua a través de un reactor fotocatalítico con un colector de parábola compuesta (CPC) con relación de concentración geométrica baja, mediante el efecto termosifónico logrado al calentar el agua en los colectores. Los reactores fotocatalíticos basados en colectores CPC son la opción más recomendada debido a que conjunga las ventajas de los sistemas con colectores planos sin concentración y de los colectores con concentración solar (Blanco, 2003; Herrmann, 2005). Sin embargo, el reto impuesto en esta investigación es importante debido a que la naturaleza de las reacciones fotocatalíticas demanda que la temperatura esté en el rango de entre 20 y 80 ° C, de forma que la diferencia de temperaturas entre el agua en los colectores y la del tanque de almacenamiento no podrá ser similar a aquella de un sistema de calentamiento de agua solar convencional, pues en este tipo de sistemas, la meta es solo calentarla, no tratarla, de forma que no se tiene restricción impuesta en la temperatura máxima y el agua se calienta tanto como la irradiancia y la eficiencia termodinámica del sistema lo permiten.

MATERIALES Y DESARROLLO

Este es un desarrollado en instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, empleando irradiancia solar y con un fotorreactor diseñado, construido y puesto en marcha como a continuación se describe.

Materiales y reactor

El fotorreactor (Fig. 3) consistió de un tanque de HDPE de 100 L de capacidad colocado sobre una estructura metálica de 1.7 m de altura. De su fondo se derivó una conexión con tubing de 1 pulgada de diámetro y con tubería de PVC de la misma medida nominal, hasta la parte inferior de un colector tipo CPC con relación de concentración geométrica de 1.1. Las ecuaciones de diseño son aquellas presentadas por Baum y Gordon (1984) y que están basadas en las de Roland Winston. El perfil del colector se conformó con lámina de acero inoxidable mediante doblado y prensado industriales; sobre esta lámina se colocó una capa de reflejante de aluminio (Reflectech) auto-adherible. La curvatura del CPC se transfirió a perfiles de madera (Triplay 12 mm de espesor) mediante corte laser comercial, el cual se basó en la curva deseada y a escala real elaborada en Autocad 2012 como una poli-línea (Fig. 2).

Una vez con el colector listo, se colocaron los tubos del fotorreactor en la región focal del CPC (tobos de vidrio boro-silicato tipo Pyrex, de 1 pulgada de diámetro externo y de 1 m de longitud, con conectores tipo oliva en ambos extremos, espesor de pared de 1.5 mm) en paralelo, luego estos se conectaron tanto con tubing flexible como con tubería de PVC de 0.75 y de 1 pulgadas entre sí, al tanque y al calentador solar de agua; se colocó todo en una estructura de acero al carbón con inclinación de 20° con respecto a la horizontal y orientada hacia el sur. No se colocó cubierta de algún tipo sobre los tubos de vidrio en el colector CPC del reactor.

Figura 2. Estructura geométrica del colector CPC del reactor fotocatalítico

Con todo esto hecho, se aislaron las tuberías de descenso del tanque a los colectores y el cabezal superior en el CPC con poliestireno de 0.75 pulgadas de espesor y se le recubrió con cinta para ductos en intemperie. Finalmente, se conectó el calentador de agua solar de placa plana, que consistió de 4 tubos de cobre de 30 cm de longitud, con aletas de 10 cm, con pintura epóxica color negro mate, aislamiento de lana de fibra de vidrio en la parte inferior y en la lateral y con un solo vidrio de 3 mm de espesor separado 2 cm del colector plano. Se tuvo además un punto de inyección de colorante para medir el caudal en la parte superior de los colectores y dos termómetros de carátula (Metron, Infra, México). Todo esto se presenta en la Fig. 3.

Figura 3. Reactor fotocatalítico termosifónico terminado, en sus dos configuraciones estudiadas.

Dentro del reactor, el agua en tratamiento circuló desde el tanque hasta los tubos de los colectores CPC y de ahí de nuevo al tanque de forma cíclica durante el tiempo de cada prueba, de forma que la operación fue de forma discontinua o por lotes. Toda esto mediante el calentamiento de la misma y el consecuente efecto termosifónico.

El reactor fotocatalítico se colocó con los tubos y sus CPC de manera inclinada debido a que el estudio se realizó principalmente en invierno-primavera y en esta época la irradiancia UVA horizontal es menor que aquella sobre una superficie inclinada y orientada hacia el sur en la Ciudad de México (Morales-Mejía y Almanza, 2014). Además, es necesaria una inclinación en el colector para tener un gradiente de densidad con respecto a la altura al calentar el agua en su interior, y poder tener circulación termosifónica. La irradiancia UVA sobre el plano de los colectores fue estimada a partir de datos de irradiancia en el plano horizontal reportados por el sistema PEMBU (UNAM, 2016), y para las pruebas fotoquímicas, también con un radiómetro portátil (YK35UV, Lutron, Taiwan) sobre el plano del CPC.

Para las pruebas fotoquímicas con naproxeno sódico (10 mg/L) y persulfato como medio oxidante ($0.5x10^{-3}$ M) por triplicado, se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu (UV1800). La absorbancia se determinó a 230 nm de longitud de onda.

Diseño experimental

El diseño experimental efectuado fue uno factorial bloqueado, siendo el volumen total de agua en el sistema y la posición del calentador de agua solar las dos variables modificadas. Se realizaron 3 pruebas (a, b, c) para cada volumen y cada posición. La irradiancia fue solar, por lo que no se tuvo control en su intensidad.

Tabla 1. Diseño experimental para las pruebas de circulación termosifónica

Volumen total	Posición del calentador solar de agua	
(L)	Arriba	Abajo
40	a, b, c	a, b, c
25	a, b, c	a, b, c
16	a, b, c	a, b, c

RESULTADOS

Las pruebas de circulación del agua a lo largo de todo el sistema tuvieron comportamientos típicos como el presentado en la Fig. 4, donde se presentan las 3 pruebas para el volumen total de 40 litros de agua. En general, los caudales cercanos al medio día solar fueron cercanos a 0.015 L/s, se lograron máximos de hasta 0.025 L/s. Con estos valores se obtuvieron solamente condiciones de flujo tipo laminar (Número de Reynolds, Re, inferior a 10000) en el interior de los tubos de vidrio del fotorreactor.

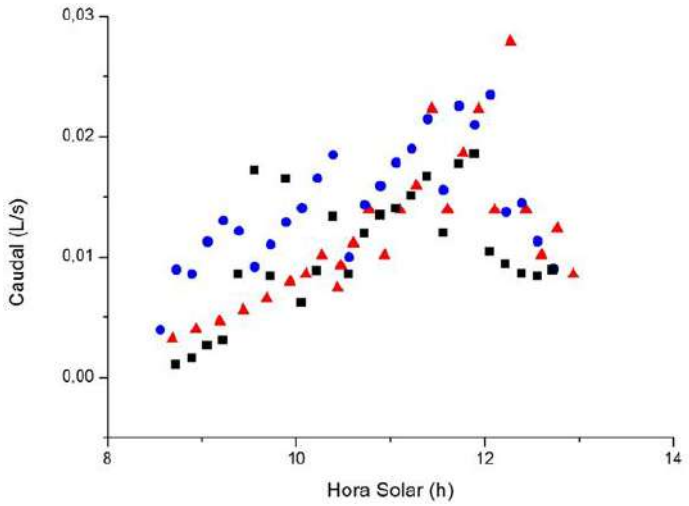


Figura 4. Comportamiento típico del caudal instantáneo circulando en el reactor mediante efecto termosifónico

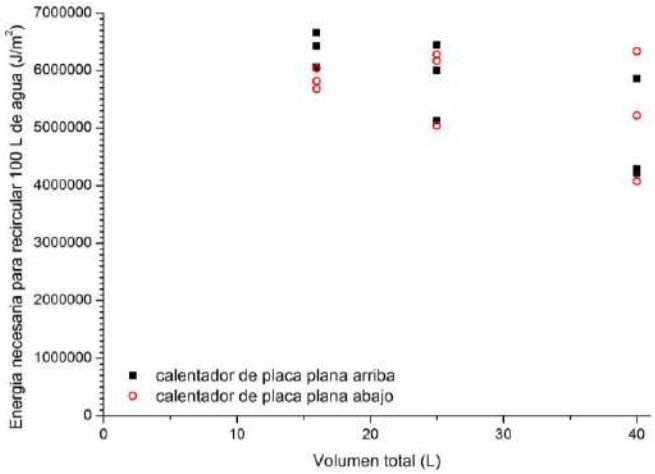


Figura 5. Resumen de las pruebas de circulación termosifónica de agua. Comparativo energético.

De forma resumida para todas las pruebas efectuadas de circulación termosifónica, en la Fig. 5 se compara la energía necesaria para hacer circular un volumen constante de agua para todas las combinaciones de volumen total y posición del calentador de placa plana. Se aprecia un ligero decremento en dicha energía cuando se incrementa el volumen total de agua en el sistema, pero no te tuvo una diferencia estadística significativa (ANOVA efectuado en Origin Pro) entre la posiciones del calentador de placa plana ni entre los volúmenes totales de agua en los reactores.

Por otra parte, la oxidación fotoquímica de naproxeno sódico se dio en una magnitud apreciable y con una eficiencia cercana a 50 % (Fig. 6) en los 3 casos analizados (40 litros de agua como volumen total; calentador de placa plana en la parte inferior). Esto indica que la geometría del CPC permitió canalizar parte de la irradiancia solar al interior de los tubos de vidrio y que la circulación termosifónica permitió canalizar el agua entre el tanque y los tubos del reactor, depurándola gradualmente.

Estos resultados son los de la primera aproximación a este reto. Indican que si es posible conjuntar un sistema de fotocatálisis con el de circulación termosifónica, los cuales requieren condiciones antagónicas entre sí; el lograr condiciones equilibradas para lograr ambos procesos y, eventualmente, tener régimen turbulento en los tubos del reactor, será objeto de mayor estudio.

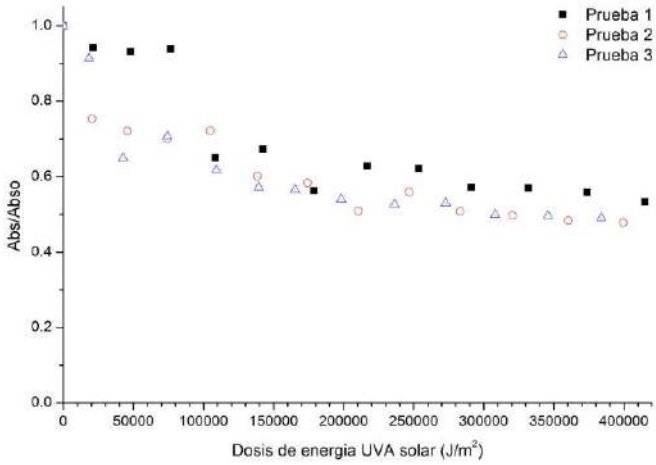


Figura 6. Pruebas de oxidación con persulfato y energía solar para naproxeno sódico. Fracción absorbancia/(absorbancia inicial)

CONCLUSIONES

- Es posible hacer circular el agua en un reactor fotoquímico con un colecttor CPC mediante efecto termosifónico basado en calentamiento solar.
- La circulación termosifónica hasta ahora lograda mostró una relación inversamente proporcional con el volumen total e agua en tratamiento, aunque en este caso no se logró demostrar la diferencia entre los volúmenes desde el punto de vista estadístico.
- El naproxeno sódico pudo removerse mediante persulfato e irradiancia UV solar y con circulación termosifónica en hasta un 50 %. Esto fue similar en las 3 pruebas realizadas en 3 diferentes condiciones de irradiancia.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IN 111416, Acondicionamiento fotoquímico-fototérmico solar de agua para uso industrial.

Se agradece a la empresa Smeting S.A. de C.V. (http://smeting.com/) por su apoyo desinteresado en la elaboración de los colectores CPC empleados.

REFERENCIAS

Baum, H. P.; Gordon, J. M. (1984). Geometric characteristics of ideal nonimaging (CPC) solar collectors with cylindrical absorber. Technical note. Solar Energy, 33, 5, 455 – 458.

Herrmann, J. M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications, Topics in Catalysis, 34, 1-4, 49 – 6, Springer Science.

Blanco, Julian (2003). Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua. Colecciones documentos Ciemat. Ministerio de Ciencia y Cultura, España.

Morales-Mejía, J. C. (2014). Uso de colectores solares para la remoción fotocatalítica de disruptores endócrinos presents en agua contaminada. Tesis de Doctorado en Ingeniería en Energía. UNAM. Asesor: Rafael Almanza S. Disponible en http://tesis.unam.mx/F.

World Bank Group (2013). Renewables Freshwater Resources per capita. http://data.worldbank.org/.

CONAGUA (2011). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. SEMARNAT, México.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DEPURACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON ATRAZINA MEDIANTE UN REACTOR FOTOCATALÍTICO SOLAR TIPO CPC

Julio César Morales-Mejía, Víctor Martín Trejo Arredondo, Yolanda Marina Vargas-Rodríguez
División de Ciencias Químico-Biológicas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Av. 1o de Mayo s/n, Santa María las Torres Campo Uno, 54740 Cuautitlán Izcalli, México, México.
Teléfono: 005255 56232025, **mmjc_80@yahoo.com.mx.**

Rafael Almanza Salgado
Coordinación de Mecánica y Energía, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F.; C.P. 04510,
Teléfono: 005255 56233689, **ras@pumas.iingen.unam.mx**

RESUMEN

Se utilizó un reactor fotocatalítico solar para eliminar Atrazina de agua. La Atrazina es un herbicida de amplio uso en México y es un contaminante importante de escorrentías agrícolas, que afecta flora y fauna acuáticas y que puede ser peligroso para el ser humano. El reactor se construyó con tecnología de impresión en 3D para la conformación de los perfiles del CPC de concentración geométrica unitaria, reflejante de aluminio electro-pulido de alta eficiencia y tuberías de vidrio boro-silicato de buena transmitancia en la región UV del espectro electromagnético solar. La Atrazina ha sido removida exitosamente en este reactor y se proponen condiciones de pH, concentración inicial de persulfato y dosis de energía UVA adecuadas.

ABSTRACT

We employed a solar photocatalytic reactor in order to oxidize aqueous Atrazine. This substance is widely used along Mexico as herbicide, and it is an important emerging concern pollutant of agricultural runoff. Atrazine affects aquatic life and it is dangerous for human. The photocatalytic reactor was based on a 3D printed CPC profile with a geometric concentration ratio of one, electro polished aluminum reflecting material and Pyrex pipes as the reaction chamber (with good UV irradiance transmittance). Atrazine was removed inside this reactor. Also, we propose initial pH, persulfate and UVA energy dose useful for eliminating Atrazine.

PALABRAS CLAVES:
CPC, Atrazine, Solar, Photocatalysis, TiO_2.

INTRODUCCIÓN

La Atrazina es un herbicida de la familia de la s-triazina, la cual es ampliamente usada a escala global para control de mala hierba en cultivos como maíz, el sorgo, la caña de azúcar y otros más. La Atrazina tiene la fórmula molecular $C_8H_{14}ClN_5$ y la estructura presentada en la Figura 1. Es poco soluble en agua pero a pesar de ello se ha encontrado en agua superficial, escorrentías y agua subterránea, lo cual es particularmente preocupante. En Europa se ha prohibido en algunos países y se ha fijado un límite de 0.1 µg/L para cada herbicida de tipo triazina y/o algún metabolito, hasta una concentración total de 0.5 µg/L, en aguas subterráneas. En Estados Unidos se tienen un límite de 2.6 µg/L para la triazina total en agua potabilizada (Minero *et al*., 1996; US EPA, 2016a). En México no se regulan las triazinas en agua potable (DOF, 2000).

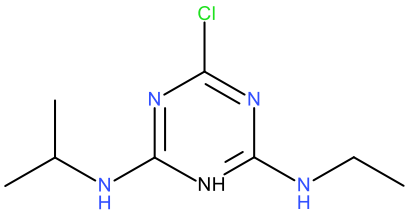


Figura 1. La molécula de Atrazina

La Atrazina es de riesgo para varios seres vivos. La EPA de Estados Unidos evaluó por 20 años la Atrazina y su riesgo ambiental, concluyendo, en abril de 2016, que concentraciones desde 5 µg/L por varias semanas están predichas a causar efectos reproductivos en peces mientras que una media de 3.4 µg/L en 60 días tiene una alta probabilidad de impactar la productividad primaria de las plantas acuáticas, así como su estructura y su función (US EPA, 2016b). La Atrazina, dependiendo la dosis, la especie de organismos expuestos a ella y el tiempo de exposición, puede causar muerte y/o efectos en el sistema reproductor y pérdida de peso, como pasa en el caso del Salmón (US EPA, 2016b). En la misma obra de US EPA (2016b) se concluye que la concentración de atrazina y pesticidas de su familia en agua de consumo no presenta un riesgo para la población, aunque su concentración en algunos cuerpos de agua estadounidenses alcanzó, en 2013, concentraciones hasta 200 ppb y de forma común, de cerca de 25 ppb entre marzo y agosto del mismo año (Fig. 2). De acuerdo con los resultados de Stipičević *et al*. (2015), la atrazina no permanece demasiado en el suelo agrícola y forma escurrimientos, lo cual es congruente con la tendencia de la Fig. 2, y se considera biodegradable aunque puede permanecer hasta unos 100 días en el agua, pudiendo afectar fuentes subterráneas.

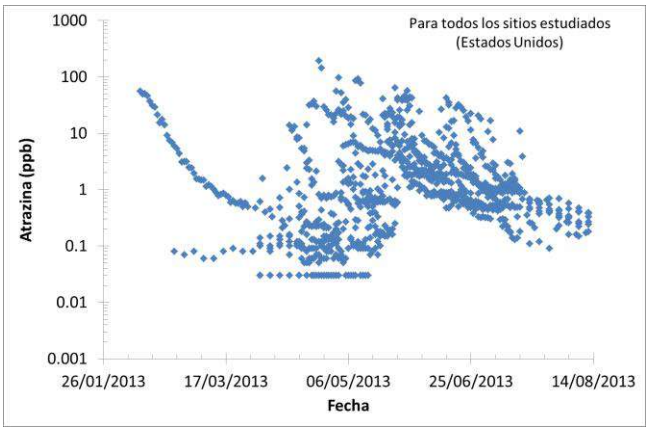


Figura 2. Concentración de atrazina en agua de ríos y lagos selectos en Estados Unidos (con datos de US EPA, 2016b)

En México, la atrazina se comercializa para su uso en cultivos de maíz, sorgo, caña de azúcar y otros, bajo nombres comerciales como Aatrex, Agrox, Azinotox, Crescent, Rastra, etc., y no hay restricciones de su uso; por ello, se ya le ha encontrado en agua superficial (río) en hasta 15 µg/L en una zona agrícola de referencia en la zona de Guasave, Sinaloa (Hernández-Antonio y Hansen, 2011). Al momento, solamente se localizó este estudio de agua en su búsqueda en nuestro país.

La fotocatálisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzado en el cual un fotocatalizador es activado por irradiancia de un longitud de onda tal que sus fotones puedan superar la energía de banda prohibida de dicho catalizador (de la familia de los semiconductores); cuando esto pasa, un fotón hace que un electrón de un "salto" de la capa de valencia la de conducción del catalizador, generando un par hueco-electrón que, en medio acuoso, puede producir un radical OH· (acción del hueco foto-generado) y un radical diferente (debido a la interacción del electrón movido a capa de valencia con una especie oxidante presente , como O_2 o persulfato), como es ampliamente descrito por Herrmann (2010), Herrmann (2005), Blanco (2003), etc. Alternativamente, si hay presentes metales con un potencial redox mayor que el potencial de banda plana del catalizador, estos pueden interactuar también con el electrón foto-generado y ser reducidos, inclusive hasta valencia cero (estado metálico), como es el caso de la plata, el plomo, el platino, el oro y el cromo (Herrmann, 2005; Colón *et al*., 2001). La cinética de este tipo de reacciones, cuando se estudia la oxidación de moléculas orgánicas, suele ser descrita adecuadamente mediante el modelo de Langmuir-Hinshelwood y su simplificación a un modelo de pseudo primer orden con respecto al contaminante para cuando la concentración inicial de éste es baja (Herrmann, 2010). Se considera que variables como la concentración inicial de catalizador, de aceptor de electrones y de contaminantes orgánicos, la turbulencia en el fotorreactor (como el número de Reynolds, Re) y el flux de fotones (asociado con la irradiancia sobre el fotorreactor) afectan de forma importante este tipo de reacciones.

Los reactores para fotocatálisis heterogénea pueden ser de varios tipos y geometrías. Uno de ellos, ampliamente probado y de buen desempeño, es el basado en colectores de parábola compuesta (CPC), que se constituyen de dos curvas en serie: una involuta y una parábola. Si la relación de concentración geométrica es 1 o menos, entonces solo se usa la involuta; si es mayor, se requiere combinar ambas curvas. En la Figura 3 se presenta la curva de diseño de una involuta con RCg = 1.

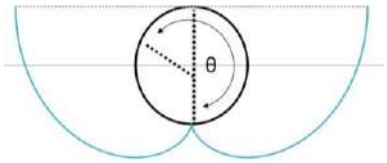


Figura 3. Perfil de diseño de un CPC con RCg = 1

Así, en este estudio se trabaja con la oxidación de este agroquímico de agua mediante reacciones de fotocatálisis heterogénea solar con TiO_2 como catalizador y con persulfato de sodio como aceptor de electrones, presentando las pruebas hechas con variaciones de persulfato a un valor de Re fijo.

MATERIALES Y DESARROLLO

Este es un estudio original y fue desarrollado en instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, empleando irradiancia solar y con un fotorreactor diseñado, construido y puesto en marcha por personal de esta institución, como a continuación se describe.

Materiales y reactor

El fotorreactor (Fig. 4) consistió de un tanque de cloruro de poli-vinilo con capacidad de 1.0 L, conectado a un conjunto de tubos (foto-reactor) de vidrio boro-silicato mediante tubing flexible de 0.5 pulgadas de diámetro nominal, e impulsado por una bomba de drenado de 127 V de CA, 35 Watts y con capacidad nominal de 20 L/min. La regulación del valor de Re se realizó tanto con una válvula de esfera de 0.5 pulgadas de diámetro que ha sido colocada en serie entre la bomba y el conjunto de tubos, como con un control de velocidad para cargas eléctricas rotatorias de bajo consumo que controló las revoluciones de la bomba de agua. Los tubos del foto-reactor son 4, miden 0.2 m de longitud útil (con terminación tipo oliva de 0.05 m de longitud por lado, para conectar con tubing flexible) y 0.025 m de diámetro externo (espesor de pared de 1.5 mm) dispuestos en serie y colocados en el foco de un colector de parábola compuesta (CPC) con relación de concentración geométrica de valor unitaria. El volumen irradiado en los 4 tubos en conjunto fue de 0.315 L, por lo que la (volumen total)/(volumen irradiado) = 3.17 para todas las pruebas efectuadas. Para esta etapa, el tiempo de residencia hidráulico en los tubos fue de 3 segundos por recorrido y Re fue de 16716, con lo que el flujo fue turbulento y no se consideran importantes las limitaciones de transferencia de masa.

Los espejos del CPC fueron de aluminio electro-pulido en film auto-adherible (MirrorFilm; Reflectech, USA) colocado sobre perfiles que fueron realizados en ácido poli-láctico (PLA) mediante impresión 3D comercial (precisión de 0.1 mm) basada en el perfil del CPC en tres dimensiones realizado en Autocad 2012. Las conexiones hidráulicas fueron totalmente de PVC con uniones roscadas, con lo que se empleó pegamento solamente en la construcción del tanque. Se colocó un termómetro de carátula analógico tipo termopar (Metron, de 0 a 120 °C; Infra, México). La temperatura en el reactor no fue controlada, siendo que no se utilizó aislamiento alguno se consideró solo un incremento pequeño en la temperatura global, el cual fue medido en las pruebas. Todo el sistema estuvo dispuesto en una estructura de aluminio provista de ruedas, de forma que todos los componentes del reactor estuvieron contenidos en la estructura y ésta pudo transportarse muy fácilmente. Los conectores de PVC y el tubing estuvieron recubiertos de lámina de aluminio para minimizar el deterioro de estos componentes por la acción del intemperismo.

Figura 4. Reactor fotocatalítico. Detalle de conexiones hidráulicas (izq.) y ensamblado totalmente (der).

Dentro del reactor, el agua en tratamiento circuló desde el tanque hasta los tubos de los colectores CPC y de ahí de nuevo al tanque de forma cíclica durante el tiempo de cada prueba, de forma que la operación fue de forma discontinua o por lotes.

El reactor fotocatalítico se colocó con los tubos y sus CPC de manera horizontal debido a que el estudio se realizó en verano y en esta época la irradiancia UVA horizontal es mayor que aquella sobre una superficie inclinada y orientada hacia el sur en la Ciudad de México (Morales-Mejía y Almanza, 2014). La irradiancia UVA sobre el plano de los colectores fue medida durante cada prueba mediante un radiómetro portátil (YK35UV, Lutron, Taiwan).

Las soluciones de atrazina fueron efectuadas en agua destilada a pH natural, la atrazina es marca Sigma-Aldrich (pureza de 99%), el persulfato de sodio con 98% de pureza (Reasol SA de CV, México), y el catalizador es polvo nanométrico marca Evonik (Aerosil P25). Los nitritos y los nitratos fueron determinados espectrofotométricamente mediante reactivos preparados de la marca Merck de México

(Spectroquant Nitritos, Rango: 0.002 a 1.00 mg/l, Cat. 1147760001; Spectroquant Nitratos, Rango: 0.2 a 20.0 mg/l, Cat. 1147730001). El espectrofotómetro empleado es un equipo marca Shimadzu, modelo UV1601, con celdas de 1 cm de paso óptico en cuarzo, operado con el software UVPC de Shimadzu..

Diseño experimental

El diseño experimental efectuado fue uno factorial bloqueado, siendo la concentración de persulfato al inicio de las pruebas y el número de Reynolds las variables de control. Las variables de respuesta han sido la absorbancia espectral desde 200 hasta 1000 nm, los nitratos y los nitritos. A este momento, se ha trabajado con el primer valor de Re para todos los valores de persulfato iniciales. El diseño experimental se muestra en la Tabla 1, donde se marca en texto rojo el avance realizado.

La concentración inicial de atrazina fue de 5 mg/l. Particularmente, esta molécula es poco soluble en agua, de forma que se dejó reposar la solución (previamente agitada), por 7 días y en oscuridad antes de iniciar las pruebas; por este motivo, no pudo trabajarse con una concentración inicial mayor. Con base en experiencias previas en el grupo de trabajo, se utilizaron 0.1 g/L de dióxido de titanio en cada una de las pruebas fotocatalíticas. Además de estas pruebas, se realizaron experimentos de fotolisis solar por duplicado.

Tabla 1: Diseño experimental del proyecto (factorial por bloques)

Concentración de persulfato (M)	Tiempo de residencia por ciclo		
	θ_1 = 3 s (Re = 16716)	θ_2 = 5 s (Re = 10000)	θ_3 = 7 s (Re = 7164)
0.001	**a, b, c, d**	**a, b, c**	**a, b, c**
0.0001	**a, b, c, d**	**a, b, c**	**a, b, c**
0.00001	**a, b**	**a, b, c**	**a, b, c**

RESULTADOS

Las pruebas de oxidación de atrazina acuosa en el reactor solar han sido satisfactorias. Primero se presenta la prueba de fotolisis solar por duplicado (Fig. 5), seguida por las oxidaciones fotocatalíticas con Re = 16716 para las 3 concentraciones iniciales de persulfato (Fig. 6). En ambas figuras se presenta el cociente Absorbancia/(Absorbancia inicial) de cada ensayo.

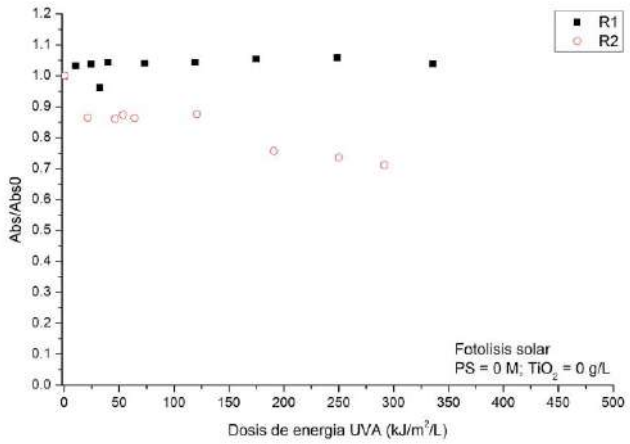


Figura 5. Fotolisis solar en el reactor piloto con colectores CPC

En la Fig. 5 se aprecia que la fotólisis es un proceso que si afecta la atrazina. Entre las 2 repeticiones efectuadas se observó un comportamiento opuesto entre ellas; en la primera, la absorbancia aumenta ligeramente, lo cual podría indicar la lenta formación de algunas especies químicas cuya absorbancia espectral es similar a la de atrazina; por otra parte, en la segunda prueba se observó un descenso en la absorbancia, lo cual podría indicar que hubo ruptura de moléculas de este herbicida y de sus productos intermedios de reacción. Resta realizar repeticiones adicionales para confirmas la tendencia de estas reacciones sin catalizador ni persulfato.

Para las reacciones fotocatalíticas es claro el efecto del persulfato como aceptor de electrones. En la serie de gráficas presentadas en la Figura 6 se puede observar cómo se incrementa la fracción de atrazina removida del agua conforme se incrementa la concentración inicial de persulfato de sodio. Entre las 4 condiciones probadas, la mejor ha resultado ser con 0.001 M en persulfato. Esta concentración de oxidante, para la oxidación fotocatalítica de este contaminante, es similar a la presentada por otros autores, como Blanco (2003).

En el caso de las rapideces de reacción, su relación fue semejante a la observada para la fracción removida de forma que al incrementar el persulfato inicial, lo hizo también la media de la constante cinética de pseudo primer orden ($k_{app,E}$) para la parte rápida de las reacciones (hasta alrededor de los 150 kJ/m^2/L y considerando modelo de Langmuir-Hinshelwood simplificado por baja concentración inicial del contaminante orgánico). Sin embargo, es importante establecer que la desviación estándar de los datos de $k_{app,E}$ es grande, de forma que tras realizar un ANOVA en el software Origin Pro se nota que no hay diferencia significativa entre las medias (Fig. 7 y Tabla 2).

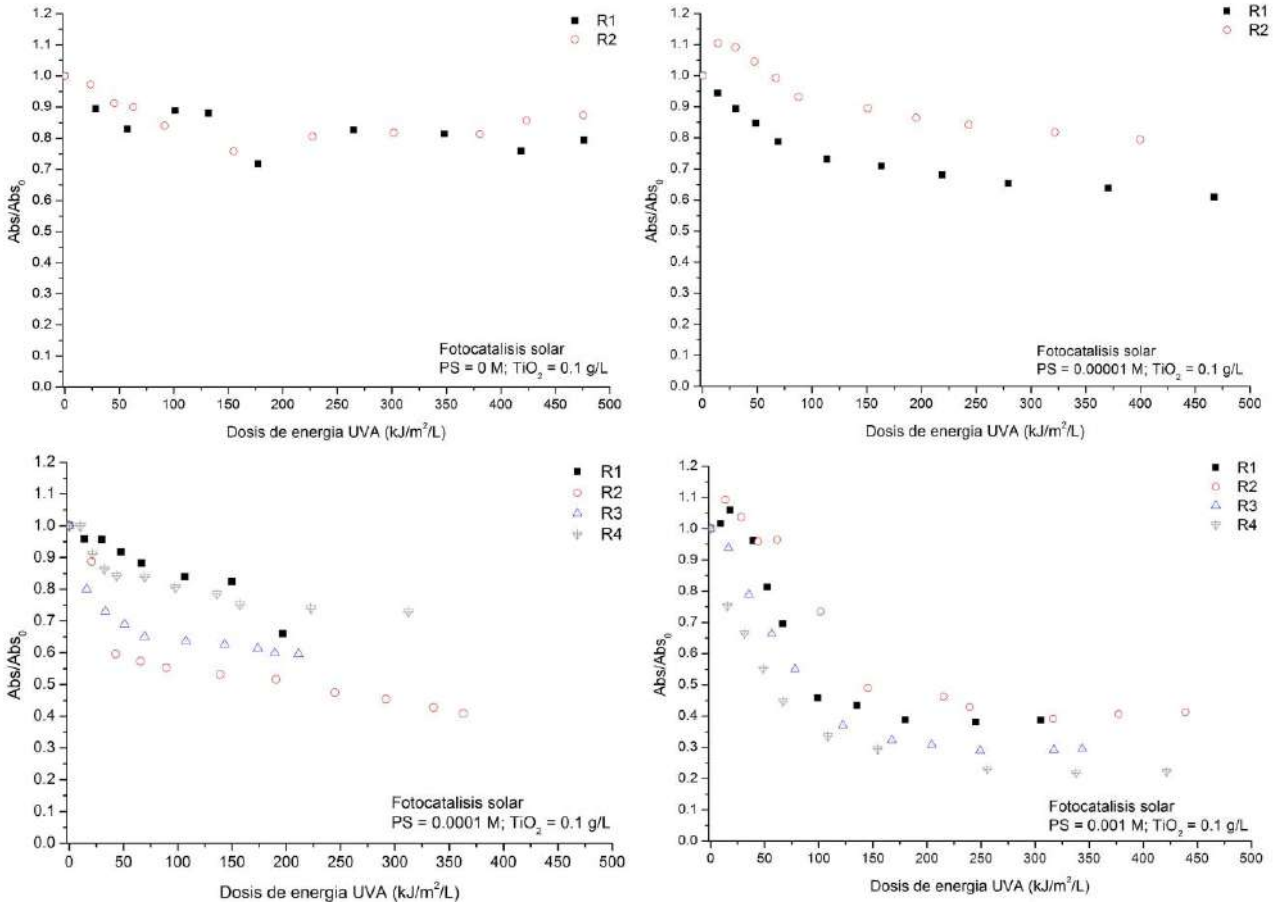


Figura 6. Oxidación fotocatalítica solar de atrazina en el reactor con colectores CPC para 4 concentraciones iniciales de persulfato.

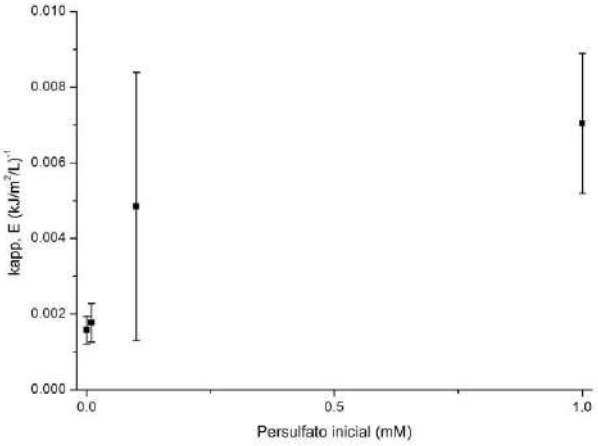


Figura 7. Constante cinética $k_{app,E}$ en función del persulfato inicial para las reacciones con Re = 16716

Tabla 2. Resultados globales del ANOVA para $k_{app,E}$ entre las pruebas con Re = 16716

Concentraciones de PS comparadas	Diferencia de medias	Estadístico t	Probabilidad	Sig
0.01 mM – 0.00 mM	1.93857E-4	0.07887	1	**0**
0.10 mM – 0.00 mM	0.00327	1.53441	0.98084	**0**
0.10 mM – 0.01 mM	0.00307	1.44334	1	**0**
1.00 mM – 0.00 mM	0.00547	2.56906	0.19906	**0**
1.00 mM – 0.01 mM	0.00528	2.478	0.22939	**0**
1.00 mM – 0.10 mM	0.0022	1.26718	1	**0**

CONCLUSIONES

- La atrazina puede ser removida con alta eficiencia mediante fotocatálisis heterogénea solar.
- El persulfato ejerce una influencia importante en la fracción de atrazina removida mediante fotocatálisis con TiO_2 P25.
- El colector de parábola compuesta (CPC) de concentración geométrica unitaria impreso en PLA mediante impresión 3D ha demostrado estabilidad ante su exposición al sol durante las pruebas realizadas.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IA106216, Tratamiento fotocatalítico solar de agua con contaminantes no biodegradables tipo ECP encontrados en México.

Se agradece a Dra. María Andrea Trejo Márquez de FES Cuautitlán, UNAM, por el apoyo prestado para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

US EPA (2016a). Atrazine - Background and Updates, recuperado el 18 de julio de 2016 desde https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/atrazine-background-and-updates

US EPA (2016b). Refined Ecological Risk Assessment for Atrazine, recuperado el 18 de julio de 2016 desde https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OPP-2013-0266-0315

Herrmann, J. M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications, Topics in Catalysis, 34, 1-4, 49 – 6, Springer Science.

Herrmann, J. M. (2010). Fundamentals and misconceptions in photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 216, 85–93.

Blanco, Julian (2003). Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua. Colecciones documentos Ciemat. Ministerio de Ciencia y Cultura, España.

DOF (2000).Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. 22 de noviembre de 2000.

Minero, C., Pelizzetti, E., Malato, S., Blanco, J. (1996). Large solar plant photocatalytic water decontamination: degradation of atrazine. Solar Energy, 56, 5, 411-419.

Stipičević, S., Galzina, N., Udiković-Kolić, N., Jurina, T., Mendaš, G., Dvoršćak, M., Petrić, I., Barić, K., Drevenkar, V. (2015). Distribution of terbuthylazine and atrazine residues in crop-cultivated soil: The effect of herbicide application rate on herbicide persistence. Geoderma 259–260, 300–309.

Hernández-Antonio, A., Hansen, A. (2011). USO DE PLAGUICIDAS EN DOS ZONAS AGRÍCOLAS DE MÉXICO Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS. Rev. Int. Contam. Ambie., 27, 2, 115-127.

Colón, G., Hidalgo, M. C., Navio, J. A. (2001). Influence of Carboxylic Acid on the Photocatalytic Reduction of Cr (VI) Using Commercial TiO_2. Langmuir, 17, 7174-7177.

Morales-Mejía, J. C., Almanza, R. (2014). IRRADIANCIA UVA SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS 19.4° Y FIJAS EN EL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Memorias de la 38 Semana Nacional de Energía Solar, Querétaro, México.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

COMPARACIÓN DE UN EQUIPO DE ABSORCIÓN CON NH_3-H_2O Y NH_3-NaSCN PARA EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE UNA CASA

Jesús Cerezo Román, Rosenberg J. Romero Domínguez, Antonio Rodríguez Martínez
Centro de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca, Morelos, México C.P. 62209, teléfono/Fax 52 777 3297084, jesus.cerezo@uaem.mx, rosengberg@uaem.mx, antonio_rodriguez@uaem.mx

Fernando Lara Chávez
Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Baja California, Calle de la Claridad S/N, Col. Plutarco Elías Calles, Mexicali, Baja California, CP 21376, México, 52 686 104 27 30, flarac@upbc.edu.mx

Moisés Montiel González
Facultad de Ciencias Química e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, México. Teléfono/Fax 52 777 3297084, moises.montiel@uaem.mx.

RESUMEN

El alto consumo de electricidad en lugares calurosos representa un problema económico que afecta no solo a la sociedad, si no al sector industrial, principalmente en verano por el uso del aire acondicionado. Una alternativa para disminuir el costo de electricidad, es el uso de equipos de absorción acoplados a colectores solares.

En este artículo se presenta un análisis térmico de un equipo de enfriamiento por absorción con las mezclas de trabajo NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN para el acondicionamiento de una vivienda localizada en la ciudad de Temixco, México. La energía suministrada al equipo de enfriamiento proviene de colectores solares de tubos evacuados y un sistema auxiliar eléctrico, utilizando agua como fluido caloportador. El objetivo de este trabajo es la evaluación térmica del sistema de enfriamiento solar con dos fluidos de trabajo variando el área de los colectores, volumen del tanque y flujos másicos en condiciones dinámicas utilizando los softwares TRNSYS y EES.

Los resultados mostraron que la mezcla de trabajo NH_3-NaSCN obtuvo un mejor desempeño que la mezcla NH_3-H_2O, consiguiendo un ahorro de energía térmica del 13.7 % en el sistema de enfriamiento. Además el incremento del área del colector solar mostró un comportamiento positivo en la efectividad del colector solar, mientras que el incremento del volumen del tanque afectó positivamente a la efectividad del sistema auxiliar eléctrico. El flujo másico del circuito de calentamiento y enfriamiento no afectó significativamente a las efectividades del colector solar y sistema auxiliar eléctrico. Por último se observó que es posible suministrar cerca del 72 y 83% de la energía total con las mezclas NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente, utilizando un área de 44 m^2 de colectores solares.

ABSTRACT

High consumption of electricity in hot places presents not only represents a problem to the society but industrial sector too, mainly in summer due to the use of air conditioner. The use of absorption system coupled to a solar collector is an option to decrease the electricity cost.

This paper presents a thermal analysis of an absorption chiller with NH_3-H_2O and NH_3-NaSCN working fluids to conditioner a home located at Temixco city, Mexico. The energy supplied to the chiller coming from an evacuated tube solar collector and electric heater, using water as thermal fluid and a storage tank. The objective of this work is the thermal evaluation of the absorption chiller with both working fluids changing solar collector area, tank volume and mass flow rate at dynamics conditions using TRNSYS and EES software.

The results showed that NH_3-NaSCN obtained a better performance than NH_3-H_2O working fluid. NH3-NaSCN obtained a reduction of thermal energy of 13.7% of the chiller absorption system. Besides the increment of solar collector area affects positively the solar collector effectiveness, while the increment of tank volume effects positively the electric auxiliary system effectiveness. It was possible to supply near 72 and 83% of the total energy using 44 m^2 of solar collector area with NH_3-H_2O and NH_3-NaSCN, respectively.

Palabras claves: enfriamiento solar, colector solar de tubos evacuados, NH_3-H_2O, NH_3-NaSCN, software TRNSYS, software EES.

INTRODUCCIÓN

En México existen estados con clima caluroso, que pueden llegar a una temperatura ambiente por arriba de los 40°C, los cuales tienen un alto consumo de electricidad principalmente en épocas de verano. Esto ha provocado problemas sociales, económicos y ambientales debido al uso de equipos de aire acondicionado y refrigeración, los cuales utilizan indirectamente recursos primarios no renovables.

Una forma de consumir energía con bajo impacto al ambiente para acondicionar un espacio, es la utilización de equipos de enfriamiento por absorción, ya que utilizan energía térmica como medio de activación, los cuales pueden utilizar calor de desecho de las industrias o colectores solares.

Se han desarrollado varios trabajos sobre sistemas de absorción con diferentes fluidos de trabajo (Rivera y Rivera, 2003, Rasul y Murphy, 2006, Sumyths et al., 2002). Entre los artículos más importantes se encuentra la investigación de Florides et al. (2002) que

simularon un sistema de absorción con H_2O-LiBr con colectores solares en el software TRNSYS bajo a condiciones típicas de Nicosia, Chipre. El estudio consistió en la optimización del tamaño de tanque de almacenamiento, la inclinación y área del colector solar parabólico y el boiler. Los resultados mostraron que el tamaño idóneo fue de 15 m^2 de área de captación del colector solar con una inclinación de 30° y un tanque de almacenamiento de 600 l para la generación de 84,240 MJ. Arzoz et al. (2002) presentó una simulación de un sistema de enfriamiento de doble efecto de 3 kW con NH_3-$LiNO_3$ usando colectores solares planos en Madrid, España. Los resultados mostraron que el equipo puede operar continuamente por 6 horas a -15°C, obteniendo un COP de 0.3 a una temperatura de condensación de 40°C. El fluido caloportador alcanzó un máximo de 100°C con una eficiencia solar de 0.27.

Este trabajo presenta un análisis térmico de un sistema de enfriamiento utilizando NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN utilizando colectores solares y una resistencia eléctrica como medio de suministro de energía en condiciones dinámicas usando el software TRNSYS y EES. El estudio consiste de un análisis paramétrico variando principalmente el tamaño del tanque de almacenamiento, numero de colectores solares y los flujos másicos del circuito de calentamiento y enfriamiento, con el objetivo de analizar el energético solar.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En la figura 1 se presenta el diagrama para el acondicionamiento térmico de una vivienda (a), por medio de un sistema de enfriamiento por absorción de simple efecto (b), suministrando energía térmica al generador (GEN) por medio un sistema hibrido solar-eléctrico (c).

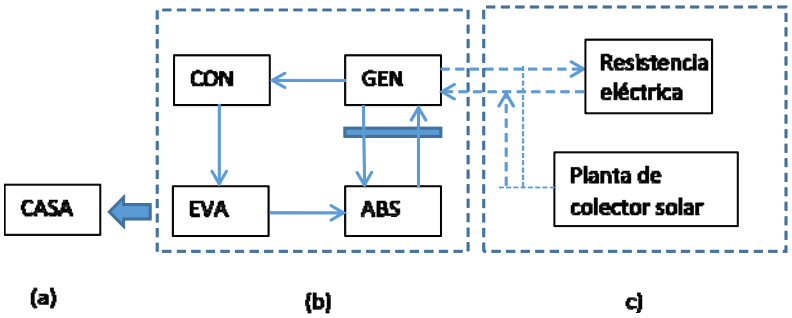


Figura 1. Diagrama esquemático del enfriamiento de una vivienda por medio de recursos renovables: a) vivienda, b) sistema de absorción de simple efecto, c) medio de calentamiento hibrido solar-eléctrico.

Características de la vivienda

Las dimensiones y características principales de la vivienda (CASA) se muestran en la tabla 1, como se puede observar es un edificio pequeño. Se consideró 4 personas en reposo y 3 computadoras encendidas en hora de trabajo (8:00 a 18:00) como generación térmica dentro de la casa.

Tabla 1. Características de una vivienda

Concepto	Cantidad
Pared norte y sur	35 m^2
Techo y piso	75 m^2
Pared este y oeste	12.5 m^2
Espesor paredes	0.12 m ladrillo
ventanas	4

Simulación del proceso de enfriamiento de una vivienda

El software TRNSYS fue utilizado para la simulación dinámica del proceso de enfriamiento de la vivienda localizada en la ciudad de Temixco, México, utilizando calor proveniente de colectores solares evacuados. En la figura 2 se muestra el diagrama esquemático del proceso en TRNSYS, donde se puede observar dos circuitos principales: un circuito de calentamiento (línea negra) y un circuito de enfriamiento (línea azul), en ambos circuitos fluye agua. En el **circuito de calentamiento** se tiene agua en el tanque de almacenamiento (T), donde es bombeado y calentado por colectores solares evacuados (CE) y posteriormente regresa al tanque. En este circuito se tiene un bifurcador que tiene la función de cambiar de flujo cuando ya no haya radiación solar. En el **circuito de enfriamiento**, fluye el agua a través de un enfriador (ENF) y un sistema auxiliar eléctrico (CAL), con la finalidad de controlar la temperatura de entrada al sistema de enfriamiento por absorción (RA), donde el fluido que sale de CAL es utilizado como fuente de suministro de energía térmica al generador (GEN, de la figura 1b). La carga térmica del generador dependerá de las necesidades de enfriamiento que necesite la casa (C1) en ese instante. Por último el fluido es bombeado (B2) al tanque de almacenamiento (T).

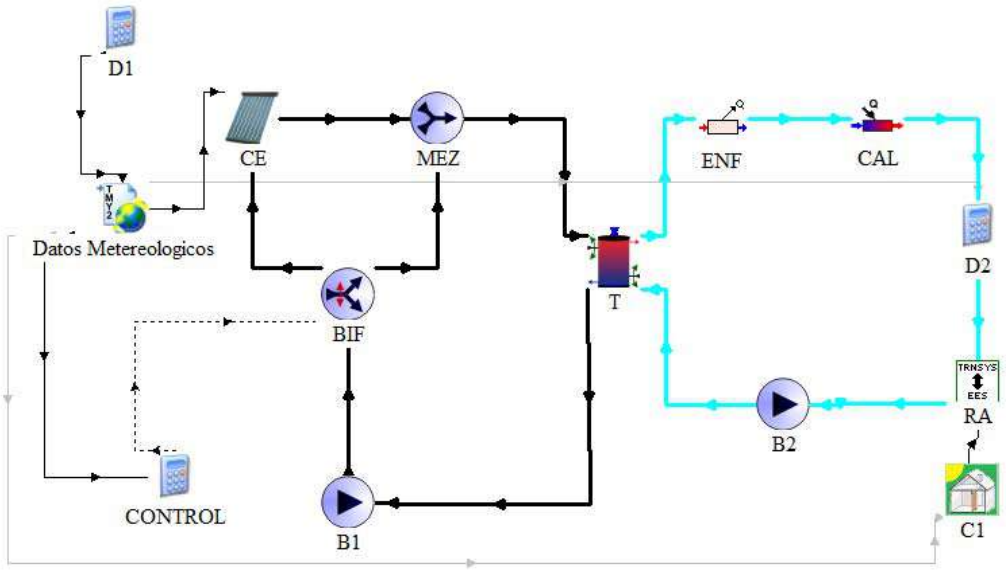


Figura 2. Diagrama esquemático del enfriamiento de una vivienda con un sistema hibrido solar-eléctrico en TRNSYS.

Para la simulación del sistema de enfriamiento se utilizó un módulo de EES, debido a que no se tiene implementado este equipo (Type) en su banco de datos con las mezclas de trabajo NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN. Las ecuaciones utilizadas fueron simples balances de energía a partir de primera ley de termodinámica (Sun, 1998).

Los colectores solares utilizados fueron tipo tubular, modelo HTP-evacuated Tube HPT-30SC (SRCC, 2009). En la tabla 2 muestra algunos de los valores proporcionados al simulador TRNSYS.

Tabla 2. Algunos parámetros del colector solar evacuados

Parámetro	Valor
Área neta de apertura (m^2)	3.795
Factor de intercepción	0.416
Negativo del Coeficiente de primer orden de la eficiencia	-0.9646

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis energético del sistema consistió en evaluar los 4 meses con mayores temperaturas ambientales e irradiación de la localidad (marzo-junio), variando el volumen del tanque de almacenamiento, el área de los colectores solares y el flujo másico del circuito de calentamiento y enfriamiento.

Para el acondicionamiento de la vivienda se fijó una temperatura que no pasará de 25°C, lo que resultó un consumo de energía total de enfriamiento de $1.49x10^7$ kJ.

Para la evaluación de energía se utilizó el parámetro de la efectividad y se define como la energía suministrada por el equipo (j), entre la carga térmica total del generador (GEN) del sistema de enfriamiento (Q_{GT}), como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_j = \frac{Q_j}{Q_{GT}} \quad (1)$$

Donde j = c, es el calor del colector y si j = r, es el calor de la sistema auxiliar.

La operación de trabajo del sistema de enfriamiento por absorción es dinámica y depende de las condiciones climáticas y requerimientos de energía de la vivienda, por lo que se supuso las siguientes condiciones de temperatura en los componentes: Generador de ΔT = 5°C menor a la temperatura de entrada (punto D2), Condensador y Absorbedor de un ΔT = 10°C mayor de la temperatura ambiente, y se fijó una temperatura del evaporador a 15°C.

Se tomó como caso base: volumen del tanque de 4 m^3, área del colector solar de 36 m^2, flujo másico circuito de enfriamiento y calentamiento de 1000 y 2000 kg/h, respectivamente. Además se tuvo que fijar un rango de temperatura de operación a la entrada del generador (punto D2, de la figura 2) del sistema de enfriamiento de 95 a 115°C para la mezcla NH_3-NaSCN y para la mezcla NH_3-H_2O solamente se fijó una temperatura mínima de 105°C, con la finalidad de evitar bajos COP y/o evitar cristalización en el caso de la mezcla NH_3-NaSCN.

Los resultados muestran que el consumo de energía total en el generador del sistema de enfriamiento durante los 4 meses fue de $2.55x10^7$ y $2.20x10^7$ kJ por parte del sistema de enfriamiento con NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente, lo que representa un promedio de 13.7% de energía ahorrada.

Análisis de sensibilidad

En la tabla 3 se muestra el rango de operación de los diferentes parámetros analizados para realizar el análisis térmico.

Tabla 3. Rango de operación

Parámetro	Rango
Volumen del tanque, m^3	2 - 5
Área del colector solar, m^2	20 - 44
Flujo másico del circuito de calentamiento, kg/h	1,000 – 2,500
Flujo másico del circuito de enfriamiento, kg/h	500 – 2,000

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestra la efectividad del sistema auxiliar y del colector solar para las mezclas NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN en función flujo másico del circuito de enfriamiento y calentamiento, volumen del tanque de almacenamiento y área del colector solar, respectivamente.

En las figura 3 se puede observar que el flujo másico del circuito de enfriamiento no afecta substancialmente a las efectividades del sistema. La efectividad del sistema auxiliar (Ef_SA) tiene una tendencia positiva que va de 0.52 a 0.54 y 0.43 a 0.45 para el NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente. La efectividad del colector solar (Ef_CS) prácticamente permanece constante para ambas mezclas.

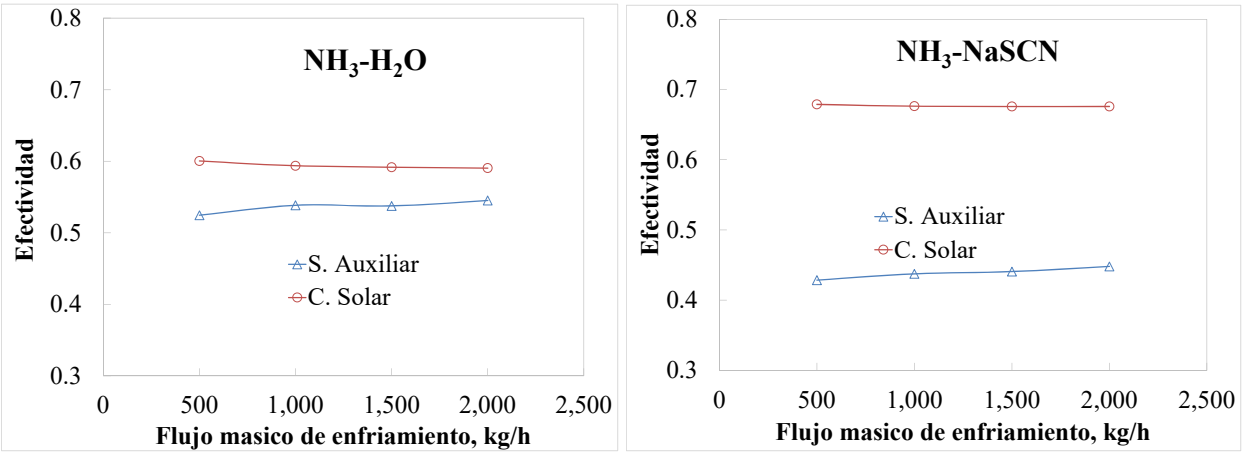


Figura 3. Efectividades en función del flujo másico del circuito de enfriamiento para ambos fluidos.

En la figura 4 se muestra que el flujo másico de calentamiento prácticamente no afecta a las efectividades del sistema, obteniéndose una Ef_CS valor de 0.60 y 0.68 y un Ef_SA de 0.54 y 0.44 para el NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente. Como se puede observar, a estas condiciones es posible el suministro total a partir de energía solar de 60 y 68% para el NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN.

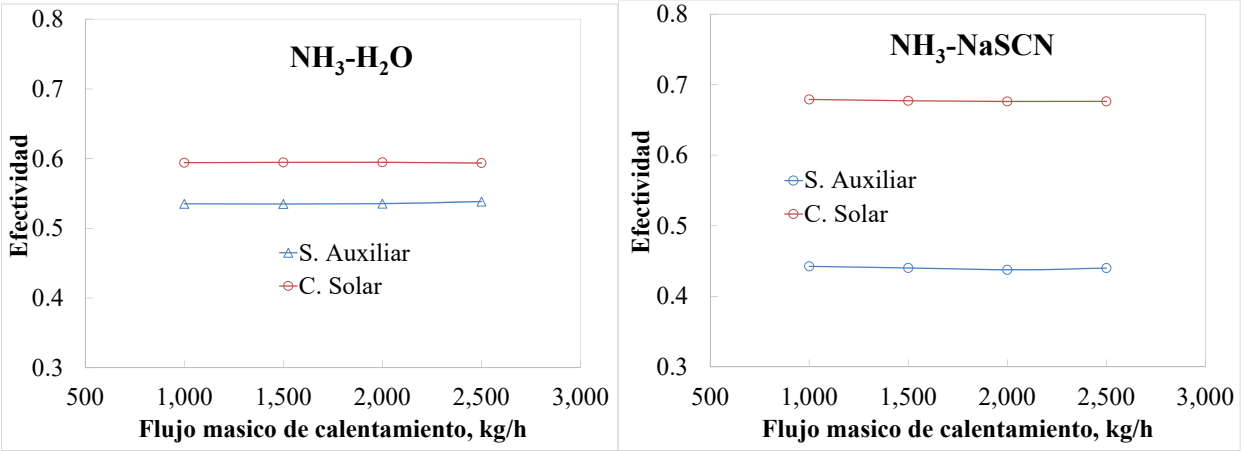


Figura 4. Efectividades en función del flujo másico del circuito de calentamiento para ambos fluidos.

En la figura 5 se puede observar que al aumentar el volumen del tanque, la Ef_SA incrementa significativamente de 0.49 a 0.56 y 0.40 a 0.46 para la mezcla NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente. Por otra parte, Ef_CS permanece casi constante con un valor de 0.60 y 0.67 para el NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente.

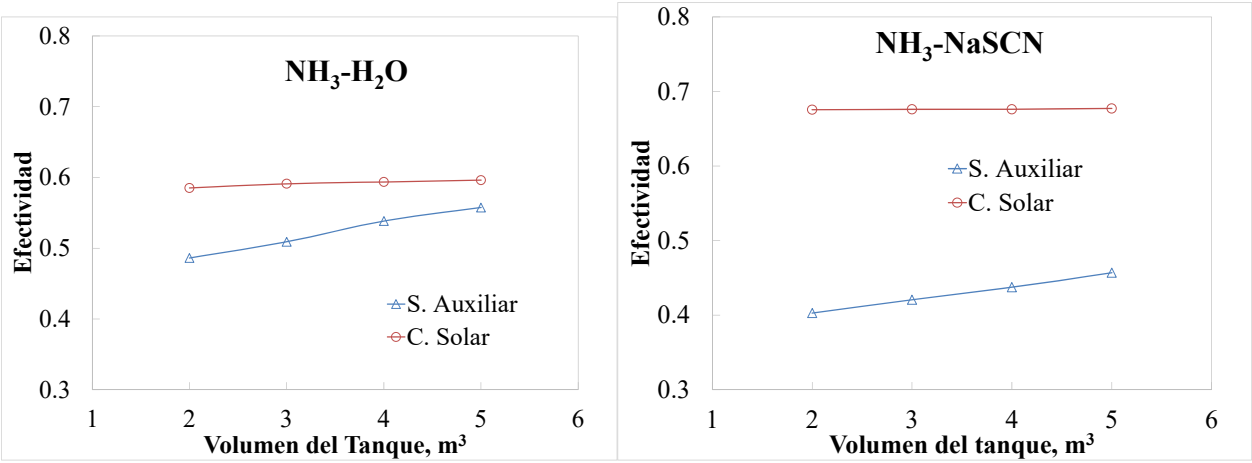


Figura 5. Efectividades en función del volumen del tanque de almacenamiento.

En la figura 6 se observa que al aumentar el área del colector solar, la efectividad de los colectores solares para ambas mezclas aumenta significativamente, obteniéndose un valor de 0.33 a 0.72 y 0.38 a 0.83 para NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente. Esto significa que el suministro de energía total es de 72% y 83% suministrado por los colectores solares con un área de 44 m^2.

Se puede observar que la suma de la efectividad del colector solar y el sistema auxiliar es mayor a uno (si fuera igual a uno significaría que la energía suministrada es igual a la energía del generador del sistema de enfriamiento por absorción), es decir para el caso de la mezcla de trabajo NH_3-H_2O con una área de 20 m^2, la suma de las efectividades del colector solar (0.80) y el sistema auxiliar (0.33) suman 1.13. Esto es debido a que se debe agregar las pérdidas de calor por el tanque de almacenamiento.

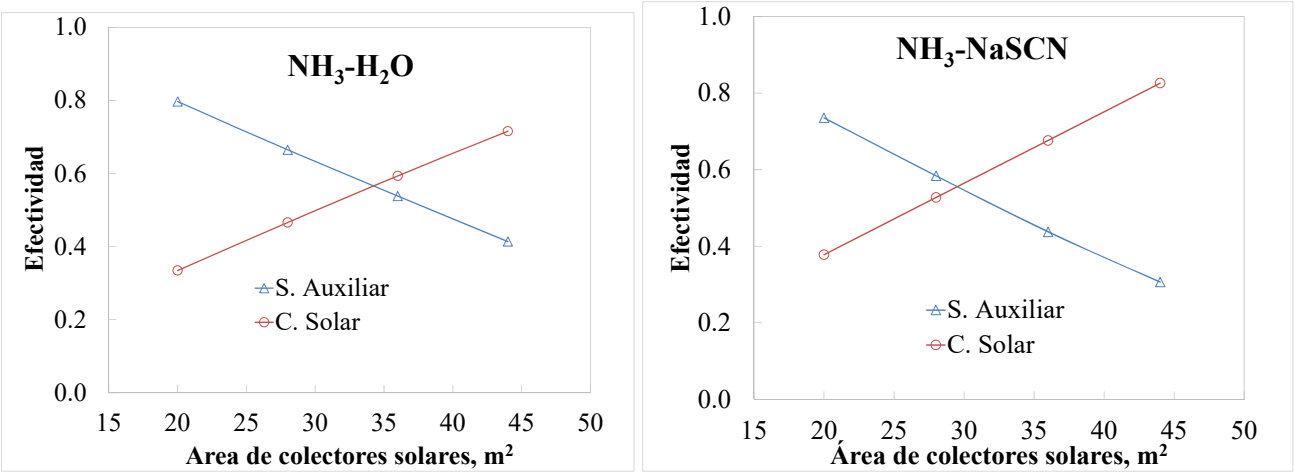


Figura 6. Efectividad en función del área del colector solar de tubos evacuados.

CONCLUSIONES

En este trabajo se simuló un sistema de enfriamiento por absorción con NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN para el acondicionamiento de una vivienda, utilizando un sistema auxiliar eléctrico y colectores solares de tubos evacuados simulados en los softwares TRNSYS y EES. Se analizó principalmente el comportamiento del sistema variando el área del colector evacuado, el volumen del tanque de almacenamiento y el flujo másico del circuito caliente y enfriamiento, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Se tuvo un consumo de energía total en el generador del sistema de enfriamiento por absorción de $2.55x10^7$ y $2.20x10^7$ kJ con NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente, para un periodo de 4 meses para un volumen de tanque de 4 m^3, área del colector de 36 m^2 y un flujo másico del circuito de enfriamiento y calentamiento de 1000 y 2000 kg/h. Esto representó una reducción 13.7% de la energía suministrada.
- El incremento del área del colector solar afectó positivamente la efectividad del colector solar. Es posible suministrar cerca del 72 y 83% de la energía total con la mezcla NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN, respectivamente, utilizando un área de 44 m^2 de colectores solares.
- El incremento del volumen del tanque afectó positivamente a la efectividad del sistema de auxiliar va de 0.49 a 0.56 para la mezcla NH_3-H_2O, y 0.40 a 0.46 para la mezcla NH_3-NaSCN, lo que significa un mayor consumo de energía eléctrica.
- El incremento del flujo másico del circuito de calentamiento y enfriamiento afectó de manera insignificativo la eficiencia del colector y sistema auxiliar.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos PRODEP, CB-167434 y al CEMIE-SOL-P09 por su apoyo parcial para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Arzoz, D., Venegas, M., Izquierdo, M., Rodríguez, P. (2002). Solar absorption refrigeration cycle using $LiNO_3$-NH_3 solution and flat plate collectors, 7th International Sorption Heat Pump Conference, ISHPC2002; 09/2002.

De Francisco, A., Illanes, R., Tones, J.L., Castillo, M., De Bias, M., Prieto,E., García, A. (2002). Development and testing of a prototype of low power water-ammonia absorption equipment for solar energy applications. Renew. Energy, Vol. 25, p. 537-544.

Florides, G.A, Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Wrobel, L.C. (2002). Modelling and simulation of an absorption solar cooling system for Cyprus, Solar Energy, Volumen 72, edición 1, p. 43–51.

Rasul, M.(2006). Solar Powered Intermittent Absorption Refrigeration Unit", Australasian Universities Power Engineering Conference, 10-13 December, Victoria University, Australia.

Rivera, C.O., Rivera, W. (2003). Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixtures, Solar Energy Mater. Solar Cells, Vol. 76, p. 417-427.

SRCC (2009). Solar Rating & certification corporation, Directory of SRCC certified solar collector ratings. Solar Rating and Certification Corporation. web: www.solar-rating.org.

Sumayths, K., Huang, Z.C., Li, Z.F. (2002). Solar absorption cooling with low grade heat source e a strategy of development in South China. Solar Energy, Vol. 72, No.2, p. 155-165.

Sun, D.W. (1998). Comparison of the performances of NH_3-H_2O, NH_3-$LiNO_3$ and NH_3-NaSCN absorption refrigeration systems, Energy Conversion Management, vol. 39, No. 5/6, pp 357-368.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DESARROLLO DE SEGUIDOR SOLAR PARA LA MEJORA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Irving A. A. Ramírez Maya, Antonio Trejo Morales, Guillermo Ronquillo Lomeli y Rodolfo Coria Silva
Energía, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Playa pie de la cuesta 702, Querétaro, Qro., 76125, México,
(442) 211-9800, **irving.ramirez@cidesi.edu.mx.**

RESUMEN

Para aprovechar al máximo la radiación solar disponible, la posición del sol requiere ser seguida de la forma más precisa posible por los sistemas de captación de energía térmica solar. La intensidad de la radiación solar varía durante el día, así como con las estaciones del año. En trabajos previos se ha determinado que el uso de un seguidor en un colector solar puede mejorar la captación de energía del 10 al 100% dependiendo de la hora y la posición geográfica del sitio. La alineación correcta de los colectores es trascendental para un buen desempeño de los seguidores solares. Existen diversos métodos utilizados para la alineación de los colectores. Los métodos mecánicos incluyen el uso de inclinómetros o de goniómetros, el método de calibración por bloque, y el método transductor de desplazamiento lineal y son aplicables para la alineación de sistemas solares. Sin embargo, estos métodos mecánicos no son adecuados para campos a gran escala. Por el contrario, métodos de alineación ópticos, que incluyen la fotogrametría, el uso de láser, el método de superposición de imágenes teórico, el método de revisión retrospectiva de la cámara, método de reflexión de franja, etc. Estos métodos son más precisos que los métodos mecánicos comerciales, pero su costo resulta elevado. Además, los colectores solares no son perfectos, siempre existen errores debido a diversos factores como el diseño, proceso de fabricación, condiciones meteorológicas, etc. que modifican su geometría disminuyendo la capacidad de captación de energía. En este trabajo se presenta el desarrollo de seguidor solar de dos ejes con algoritmo de seguimiento de alta precisión e instrumentado para evaluar errores de seguimiento derivado de las condiciones de alineación y operación lo que permitirá el desarrollo de nuevas herramientas para mejorar la captación de energía solar térmica en colectores bajo las condiciones de operación actuales.

ABSTRACT

To maximize the available solar radiation, the sun's position needs to be followed by the most accurate possible systems capture solar thermal energy form. The intensity of solar radiation varies during the day and with the seasons. In previous studies it has been determined that the use of a follower in a solar collector can improve energy capture from 10 to 100% depending on the time and the geographical position of the site. Proper alignment of the collectors is crucial for a good performance of solar trackers. There are various methods used for alignment of the collectors. Mechanical methods include use of inclinometers or goniometers, the calibration method by block, and the linear displacement transducer and method are applicable to the alignment of solar systems. However, these mechanical methods are not suitable for large scale fields. By contrast, optical alignment methods, including photogrammetry, using laser, the method of superposition of theoretical images, the method retrospective review of the chamber strip reflection method, etc. These methods are more accurate than commercial mechanical methods, but the cost is high. In addition, the solar collectors are not perfect; there are always errors due to various factors such as design, manufacturing process, weather conditions, etc. modifying its geometry decreasing the energy capture capability. In this paper the development of solar tracker with two axes with tracking algorithm precision and instrumented to evaluate tracking errors resulting from alignment conditions and operation which will allow the development of new tools to improve solar energy collection presents in thermal collectors under current operating conditions

Palabras claves: Seguidor Solar, Colector Solar, Sensor solar, Algoritmo, Error de Seguimiento, Optimización Energética.

INTRODUCCIÓN

El suministro suficiente de energía limpia para el futuro es uno de los mayores retos de la sociedad. Fuentes alternativas de energía renovable, como la energía solar puede sustituir parte de las necesidades de energía humana. Los sistemas colectores de energía solar requieren de un sistema de seguimiento solar que presente alta precisión y exactitud para aprovechar al máximo la radiación solar disponible. Mousazadeh (2009) menciona que el uso de seguidor solar puede mejorar la captación de la energía de un 10 al 100% dependiendo de, entre otras cosas, la ubicación geográfica y la hora del día. Un proceso con estas características debe considerar la variación de la radiación solar durante el día, las estaciones del año, la ubicación geográfica y mientras más grande sea el sistema de

captación la precisión del sistema debe ser mejor. El control de los seguidores solares a lo largo del tiempo se ha realizado por medio de lazo abierto o lazo cerrado, utilizando algoritmos que calculan la posición del sol en base a ecuaciones astronómicas o haciendo uso de sensores solares respectivamente. El uso de ambas técnicas resulta en la mejora de operación en comparación con la utilización de las técnicas por separado. Los seguidores solares para captadores se han dividido en 2 categorías; seguimiento solar en 1 eje y seguimiento de 2 ejes.

Se ha realizado una gran investigación en tema de algoritmos de seguimiento solar con diversas ecuaciones y bajo diferentes condiciones, pero en general se puede decir que los algoritmos de seguimiento se clasifican en 2 grupos; el primero el más básico que calcula parámetros de posición del sol en base a los días del año, mientras que el segundo grupo son algoritmos más complejos, los cuales calculan con mayor precisión en donde se encuentra posicionado el sol en un determinado instante. Las desventajas que deben ser evitadas en los algoritmos de seguimiento son la precisión de seguimiento y el intervalo de tiempo en el que tendrán validez.

(Blanco-Muriel et al. 2001) realizó una comparación entre algoritmos, donde clasificaba en el primer grupo los algoritmos de (Cooper 1969); (Lamm 1981); (Spencer 1971); y (Swift 1976), debido a los pocos parámetros que podían calcular, y en el segundo grupo a (Pitman & Vant-Hull 1978); (Walraven 1978) y el más importante (Michalsky 1988); el cual podía calcular aún más variables tales como declinación, ecuación del tiempo, azimut y elevación. Además realiza una comparación entre estos algoritmos, los cuales son evaluados gracias a la exactitud del Multiyear Interactive Computer Almanac (MICA) propiedad del Observatorio naval de los Estados Unidos, en base a esta evaluación Blanco-Muriel desarrollo el algoritmo PSA en el cual se mejora la velocidad y la robustez eliminando operaciones innecesarias y utilizando expresiones robustas, obteniendo un menor error en la desviación que el algoritmo de Michalsky. Posterior a Michalsky y al PSA se han desarrollado algunas otras adaptaciones con estos algoritmos con una incertidumbre menor a ±0.01° y en ocasiones con funcionamiento limitado a cierto número de años, como por ejemplo (Grena 2008) desarrollo un algoritmo de alta precisión con un error máximo de 0.0027° con un periodo de 2003 a 2023.

Reda & Andreas (2008) del National Renewable Energy Laboratory, implementaron un algoritmo en base al trabajo de (Meeus 1998) aún más preciso con variaciones de ±0.0003° y con un periodo de funcionamiento del año -2000 al 6000. Características sumamente mejoradas en comparación a los algoritmos de los autores mencionados anteriormente.

En algunos sistemas de captación de energía solar, además de la mejora que incorpora el seguidor solar, también es importante una correcta alineación de los colectores para maximizar la colección de la radiación solar. Ren et al. (2014) discute varios métodos de alineación, que pueden ser clasificados en métodos mecánicos y ópticos. Los métodos mecánicos que incluye el uso de inclinómetros, goniómetro, calibración por bloque y el transductor de desplazamiento lineal, son muy utilizados para la alineación de heliostatos que cuentan con una gran cantidad de espejos planos. Por otro lado están los métodos ópticos, que incluyen la fotogrametría, el uso del láser, el método de superposición de imágenes teórico; estos métodos resultan ser más precisos y eficientes que los mecánicos pero por el contrario su costo resulta elevado.

La mayoría de los desarrollos se ha concentrado en los sistemas de seguimiento solar los cuales consideran que el colector solar es ideal, sin embargo en (Noriega Gil & García de Castro 2014); (Fangman 2013); y (Chong & Wong 2009) se abordan temas no considerados en la operación de los seguidores solares como lo son el sitio de instalación, errores por acumulación de tolerancias resultado del proceso de fabricación y ensamble así como el proceso de instalación del campo solar, y desviaciones causados por movimientos dinámicos de la estructura de los colectores solares debido a cambios de temperatura, ráfagas de viento, lluvia, etc. Estos problemas, propios de los sistemas solares, disminuyen la eficiencia de colección de energía solar llegando a perdidas hasta del 100 % (Del Pozo Polidoro & Enrile Medina 2011) por lo que es necesario desarrollar una metodología de bajo costo para optimizar al desempeño de los sistemas solares considerando todos los factores propios de la instalación y operación de los campos solares.

En este trabajo se presenta el desarrollo de seguidor solar de dos ejes con algoritmo de seguimiento de alta precisión e instrumentado para evaluar errores de seguimiento derivado de las condiciones de alineación y operación lo que permitirá el desarrollo de nuevas herramientas de bajo costo para mejorar la captación de energía solar térmica en colectores en condiciones de operación reales.

DESARROLLO DEL SEGUIDOR SOLAR

De los algoritmos de seguimiento solar desarrollados hasta el momento el que presenta (Reda & Andreas 2008) del National Renewable Energy Laboratory (NREL) es uno de los que tiene mejores características de precisión e intervalo de tiempo de validez. Se seleccionó este algoritmo para el seguidor solar en este trabajo. A continuación se describe el algoritmo.

Algoritmo de Seguimiento Solar

En este algoritmo de posición solar (SPA) se calcula el ángulo cenital solar y el azimut con incertidumbres igual a ± 0,0003° en el período comprendido entre los años -2000 a 6000. Este algoritmo fue adaptado a partir de algoritmos astronómicos (Meeus 1998) basado en variaciones seculares de las orbitas planetarias.

Las entradas al algoritmo son la fecha (día, mes y año), la ubicación del seguidor (latitud y longitud); con estos datos se calculan variables intermedias como, el día Juliano, latitud y longitud geocéntrica, la corrección de aberraciones, la declinación del sol, para finalmente obtener los valores de los ángulos zenit y azimutal por medio de las siguientes ecuaciones:

Zenit

$$e_0 = \arcsin(\sin\varphi * \sin\varphi + \cos\varphi * \cos\delta * \cos H') \quad (1)$$

Azimut

$$\Gamma = \arctan2\left(\frac{\sin H'}{\cos H' * \sin\varphi - \tan\delta * \cos\varphi}\right) \quad (2)$$

donde:

$e_0 =$ Ángulo Zenit. El cual tine valor de 0 cuando el sol esta debajo del horizonte.
$\Gamma =$ Ángulo Azimut
$H' =$ Ángulo topografico de la hora local
$\delta =$ Declinacion geocentrica del sol
$\varphi =$ Latitud geografica del observador

Plataforma de hardware del seguidor solar

Los sistemas de seguimiento solar de dos ejes requieren al menos de microprocesador, sensores fotoeléctricos, interface hombre-máquina (HMI por sus siglas en inglés), controladores de motor y motores. En la figura 1 se muestran los componentes que componen el seguidor solar. El microprocesador (cRIO-9068 de National Instument) es el dispositivo base del sistema usado para procesar las señales de entrada, aplicar algoritmos de control y dar instrucciones de control para estas actividades. Los sensores fotoeléctricos (ISS T60-B0008 de Solar MEMS) detectan si la luz del sol incide verticalmente sobre el sistema solar. Interface hombre-máquina (PC/LabVIEW) se utiliza para controlar el sistema manualmente y configurar los parámetros del sistema y mostrar la información como parámetros del sistema y estado actual. Controlador de motores (NI9505) son sistemas encargados de ajustar la posición y velocidad de los ejes azimutal y zenital y orientar el sistema solar directamente al sol. Motores (URSXXBCC) sistemas electromecánicos encargados de proporcionar el trabajo mecánico de soporte del seguidor solar. Adicionalmente el seguidor solar está equipado con un sistema de posicionamiento Global (GPS pos sus siglas en inglés) instrumentado a través del NI9467 para la lectura de las coordenadas.

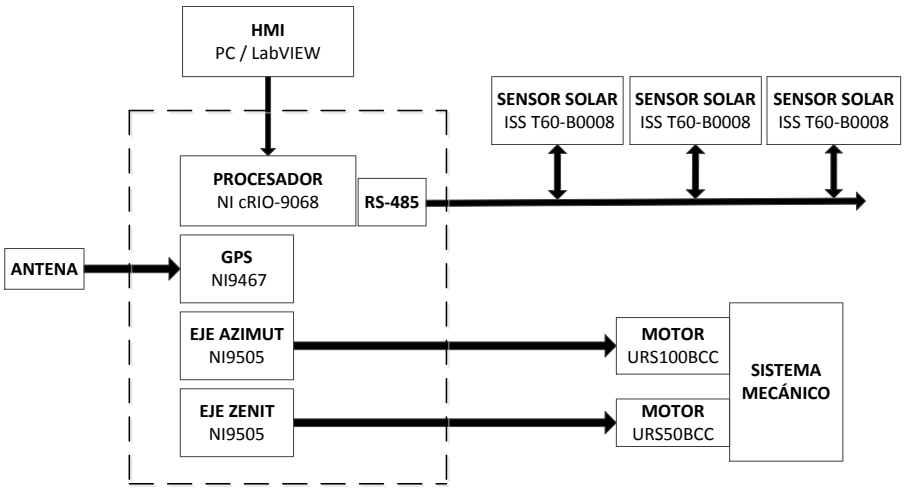


Figura 1. Diagrama a bloques del seguidor solar.

El algoritmo de posición solar fue embebido en una plataforma CompactRIO (cRIO) de National Instruments (NI cRIO-9068) el cual cuenta con un sistema operativo en tiempo real (RTO) basado en Linux. Este sistema dispone de un FPGA Xilinx Zynq 7020, un chasis de 8 slots, un reloj interno de tiempo real con una exactitud de 5ppm y algunas otras de sus características como 1Gb de almacenamiento no volátil, procesador ARM Cortex-A9 667 MHz, puertos Ethernet, USB, RS32 y RS485. En la figura 2 se muestra un diagrama a bloques de este sistema.

La plataforma cRIO tiene software altamente integrado, una variedad de opciones de rendimiento y formato y diversas E/S que proporcionan versatilidad, impulsan el rendimiento del sistema y simplifica el diseño de sistemas avanzados de monitoreo y control embebidos lo cual lo hace ideal para el desarrollo de nuevos algoritmos y metodologías para la optimización de la captación de energía solar.

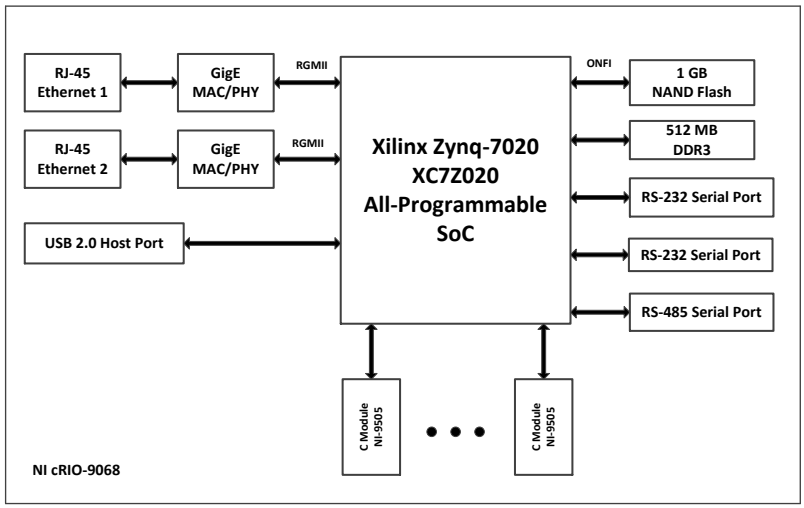


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema NI cRIO-9068.

La precisión óptica durante el seguimiento solar continuo es un criterio clave para la evaluación del rendimiento en sistema de colección solar. Se requiere un instrumento de diagnóstico óptico para medir la precisión de seguimiento solar en los ejes azimutal y elevación para evaluar el rendimiento del sistema. El sensor de sol ISS-TX de Solar MEMS proporciona mediciones ópticas muy precisas del vector de

incidencia del rayo del sol y está diseñado para aplicaciones en satelitales de alta precisión. Utiliza una estructura de circuito integrado con un tipo de sustrato para la detección de alta precisión en la medición de ángulos de incidencia de rayos de sol respecto a su perpendicular ver Figura 3. Los ángulos **x** y **y** especifican la posición angular de los rayos del sol incidentes dentro del campo de vista del sensor; la precisión del sensor incrementa cerca del cero (posición perpendicular). Esto garantiza que el dispositivo ISSTX proporcione mediciones ópticas confiables a bajos niveles de consumo de energía. Estas características lo hacen un dispositivo adecuado para sistemas de posicionamiento y seguimiento solar de alta precisión, por ejemplo, seguimiento solar, medición de niveles de radiación solar, errores de seguimiento, etc. Para el desarrollo del seguidor solar se instalaron 3 sensores solares modelo ISS T60-B0008 de Solar MEMS, estos dispositivos cuentan con una precisión de 0.06°, tienen un campo de visión de 120°, y la información es proporcionada a través de un canal RS485.

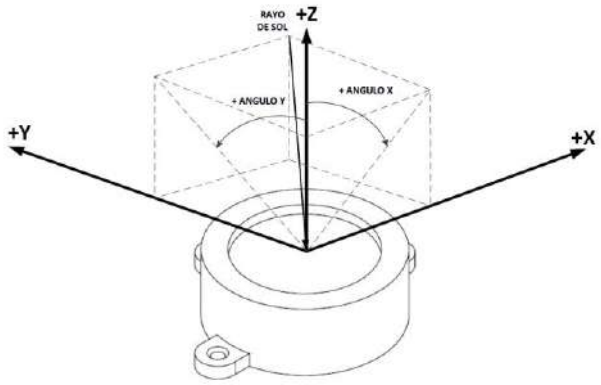


Figura 3 Referencia de los angulos medidos.

Sistema Mecánico de Seguidor Solar

Se desarrolló un sistema mecánico, Figura 4, basado en mesas rotatorias de alta precisión para la ejecución de los movimientos de seguimiento solar (azimutal y elevación). Las mesas rotatorias son de la marca Newport modelo URS100BCC (para movimiento azimutal) y URS50BC (para el movimiento de elevación), estos sistemas tienen una exactitud de 0.015° y 0.04° respectivamente lo cual los hace un mecanismo muy confiable; cuentan con motores CD instrumentados con encoders con resoluciones de 0.00016° y 0.0005° respectivamente para la corrección de la posición deseada.

Las mesas rotatorias se ensamblan sobre estructuras diseñadas para garantizar que los ejes de giro de las mesas rotatorias sean perpendiculares y proporcionar el soporte para los instrumentos de medición de desviación de la posición del sol. Las mesas rotatorias instaladas perpendicularmente generan los movimientos de los ángulos azimutal y zenital, mientras que en una segunda estructura montada sobre la mesa rotatoria del movimiento de altitud se instalan los sensores solares lo que nos permite orientarlos para las lecturas de posibles desviaciones de la posición del sol ocasionadas por algún factor intrínseco en aplicaciones de seguimiento solar y de esa manera tener datos para el análisis y desarrollo de metodologías para la optimización de sistemas solares.

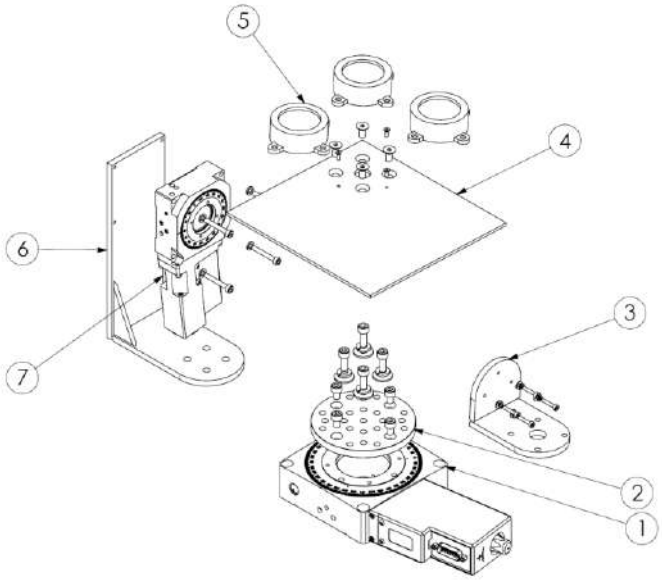


Figura 4: Esquema del mecanismo del seguidor solar. 1) Mesa Rotatoria URS100BCC. 2) Platina de montaje URS100BCC. 3) Platina de montaje URS50BC. 4) Base de soporte para Sensores Solares. 5) Sensores Solares ISS T60-B0008. 6) Base Soporte Mesa Rotatoria URS50BC. 7) Mesa Rotatoria URS50BC.

Resultados

El seguidor solar fue implementado y puesto en operación, se realizaron varias pruebas en diferentes días durante. Para las pruebas se utilizaron métodos mecánicos de baja precisión para la alineación del seguidor solar (inclinómetros, brújulas), el modo de operación del seguidor solar fue en lazo abierto, la posición del sol fue determinada únicamente con el algoritmo de seguimiento solar seleccionado. El sensor de posición solar solo es usado para medir la desviación de seguimiento. En la figura 5 se presenta la desviación reportada por el sensor en los ángulos x y y tomando como referencia el eje +X, ver figura 3, orientado hacia el sur cuando los ángulos zenital y azimutal en el seguidor solar son cero.

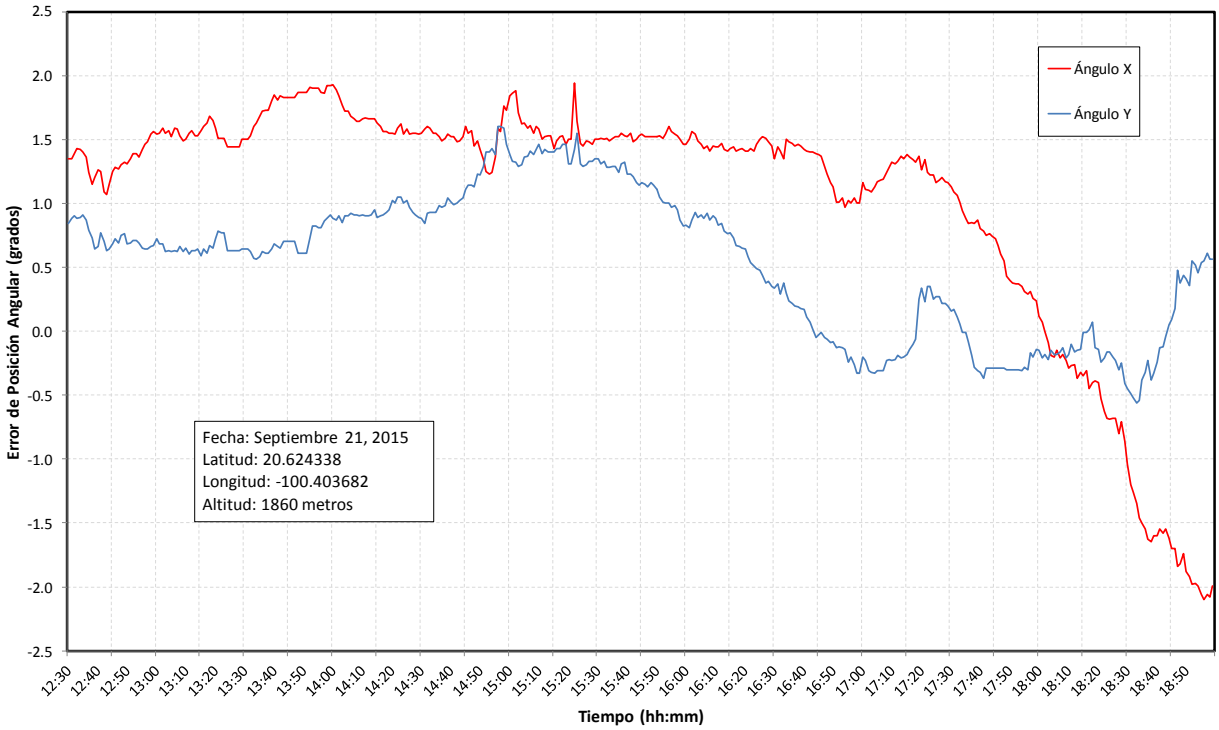


Figura 5: Errores de seguimiento solar.

Los errores de seguimiento solar son ocasionados por varios problemas relacionados con el proceso de fabricación, instalación y operación del seguidor solar. Al no haber una correcta alineación del seguidor solar se inducen errores de posición aun cuando la precisión del algoritmo de rastreo solar es alta este efecto se observa en variaciones en el error de seguimiento de baja frecuencia. Durante las pruebas de seguidor solar el sistema estuvo expuesto a variaciones en las condiciones ambientales, estas variaciones inciden directamente provocando ruido en la orientación del seguidor solar en cual se ve reflejado en las mediciones del error de posición de alta frecuencia.

Conclusiones

Es evidente que los algoritmos de seguimiento de alta precisión no son adecuados por si solos en aplicaciones de explotación de energía solar debido a los grandes errores a los cuales están expuestos, por lo que es necesario recurrir a métodos avanzados de alineación o corrección de alineación por software, compensación del error de la posición solar mediante la retroalimentación de mediciones de la desviación del vector solar, métodos para la optimización de captación de energía solar, etc. El seguidor solar desarrollado en este trabajo esta instrumentado con componentes de alta precisión y desempeño el cual es capaz de ejecutar operaciones a gran velocidad y procesar grandes cantidades de información en tiempo real, es un sistema ideal para el desarrollo de nuevas herramientas de bajo costo orientados a mejorar la captación de energía solar en colectores en condiciones de operación reales. El trabajo futuro debe estar orientado la evaluación de las pérdidas de energéticas inducidas por las irregularidades geométricas derivadas del proceso de fabricación e instalación en diferentes tecnologías de energía solar.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), a través del Proyecto: P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA. Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

REFERENCIAS

Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., & Lara-Coira, M. (2001). Computing the solar vector. Solar Energy, 70(5), 431–441.

Chong, K. K., & Wong, C. W. (2009). General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. Solar Energy, 83(3), 298–305.

Cooper, P. I. (1969). The absortion of radiation in solar stills. Solar Energy, 12, 333–346.

Del pozo Polidoro, E., & Enrile Medina, J. (2011). Seguidor solar con cilindros oleohidraúlicos y método de funcionamiento. España.

Fangman, M. E. (2013). Calibration system for solar collector installation. US.

Grena, R. (2008). An algorithm for the computation of the solar position. Solar Energy, 82(5), 462–470.

Lamm, L. O. (1981). A new analytic expression for the equation of time. Solar Energy, 26(5), 465.

Meeus, J. (1998). Astronomical Algorithms (Second). Richmond, Virginia, USA: Willmann-Bell, Inc.

Michalsky, J. J. (1988). The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). Solar Energy, 40(3), 227–235.

Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 1800–1818.

Noriega Gil, P., & García de Castro, J. A. (2014). Método para la determinación de la corrección de errores de seguimiento de la plataforma de un seguidor solar, unidad Central de Proceso adaptada para llevar a cabo dicho método y seguidor solar que comprende dicha unidad central de proceso. España.

Pitman, C. L., & Vant-Hull, L. L. (1978). Errors in locating the Sun and their effect on solar intensity predictions. In Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society (pp. 701–706). Denver.

Reda, I., & Andreas, A. (2008). Solar position algorithm for solar radiation applications.

Ren, L., Wei, X., Lu, Z., Yu, W., Xu, W., & Shen, Z. (2014). A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 76–83.

Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. Search, 2(5), 172-.

Swift, L. W. (1976). Algorithm for solar radiation on mountain slopes. Water Resources Research, 12(1), 108–112.

Walraven, R. (1978). Calculating the position of the sun. Solar Energy, 20(5), 393–397.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA AGREGAR VALOR EN LA TRANSFORMACIÓN DE MADERAS DURAS TROPICALES

Juan Quintanar Olguin
Campo Experimental San Martinito, CIRGOC-INIFAP, Km. 56.5 Carretera Federal México-Puebla,
San Martinito Tlahuapan, Puebla. CP 74100. México. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 87717.
quintanar.juan@inifap.gob.mx

RESUMEN

En el proceso de transformación de productos forestales, el secado de la materia prima es la etapa que mayor tiempo y energía consume. De forma tradicional, esto se realiza exponiendo el producto a los rayos solares de manera directa, donde la calidad final no es la óptima. Una alternativa para mejorar el proceso ha sido el aprovechamiento de la energía solar mediante el uso de secadores solares, donde el uso de éste tipo de secadores puede mejorar la productividad y la capacidad de negociación de pequeños productores con baja inversión de capital. La evaluación del proceso de secado se realizó con madera de *Enterolobium cyclocarpum* (Parota), mediante la obtención de su curva de secado y el contenido de humedad final, que es apropiado para la elaboración de productos de alto valor agregado, con una muy baja inversión en el secador.

ABSTRACT

In the process of transformation of forest products, drying of the raw material stage is the most time and energy consuming. Traditionally, this is done by exposing the product to sunlight directly, where the final quality is not optimal. An alternative to improve the process has been the use of solar energy by using solar dryers, where the use of this type of dryers can improve productivity and the bargaining power of small producers with low capital investment. The evaluation of the drying process was performed with wood Enterolobium cyclocarpum (Parota), by obtaining the drying curve and the final moisture content which is suitable for the manufacture of high added value, with a very low investment in the dryer.

Palabras claves: Secado madera, Eficiencia secado, Curva secado.

INTRODUCCIÓN

El secado de productos forestales mediante el aprovechamiento de la energía solar es una de las muchas aplicaciones solares que se han venido practicando desde tiempos remotos. Ante la necesidad actual de contar con materia prima de calidad y los elevados costos de en infraestructura y energéticos de los secadores convencionales, los productores se han visto con la necesidad de buscar alternativas viables para secar su producto a un bajo costo. Como alternativa se han desarrollado diferentes prototipos de secadores solares para aprovechar la energía proveniente del sol, donde se colecta esa energía y se emplea para secar los productos forestales.

En el transcurso de los últimos 60 años, una gran variedad de secadores solares para el secado de madera han sido diseñados y evaluados a nivel mundial, tanto en latitudes tropicales como en latitudes templadas. La mayoría de ellos han sido construidos por Institutos de investigación para su evaluación y solo unos cuantos se han producido para uso comercial. La gran mayoría de los diseños desarrollados están basados en el concepto de "prueba y error", sólo en años recientes se ha iniciado el modelaje matemático del secado solar de madera (Haque, 2002). Se han probado diferentes diseños y materiales, se ha medido la energía que pasa por los secadores y desarrollado equipos de control completamente computarizados.

La tecnología de los secadores solares basa su funcionamiento en el principio "invernadero". Los sistemas de captación de la energía solar, se clasifican en dos grandes grupos: aquellos que cuentan con un dispositivo de captación independiente de la cámara de secado y los que utilizan la propia cámara de secado como área de captación de la radiación solar. Entre los sistemas con captación independiente pudieran considerarse diversas tecnologías de captación: colectores planos, canales cilíndricos parabólicos y túneles de polietileno, entre otros. Sin embargo, la forma y metodología que se pueden aplicar en cada caso específico requiere de un análisis más amplio, por repercutir esto en la calidad del producto, tiempo, factibilidad y costos del proceso entre otros.

La tecnología de los secadores solares basa su funcionamiento en el principio "invernadero", esto es, el aire como elemento secante es calentado en colector y se hace circular a través de las "pilas" que se forman con la madera a secar, por lo que se extrae la humedad que se evapora de la superficie de la madera (Quintanar, 2005 y Viehbeck, 1999).

El principal objetivo de secar la madera, cualquiera que sea el procedimiento para lograrlo, es remover o eliminar el exceso de humedad que posee y ponerla en condiciones de uso. El tanto por ciento de humedad por remover dependerá de la cantidad de agua que tenga en un principio y del uso al que se destinará.

El secado puede definirse como el proceso de eliminación del exceso de agua que contiene la madera, mediante la aplicación de técnicas apropiadas que minimicen los defectos causados por la pérdida de humedad, en tiempos cortos y costos mínimos.

Secado solar de madera

El sol ha sido utilizado tradicionalmente para realizar el secado de madera al aire libre, pero ante la necesidad de contar con materia prima de calidad, se han desarrollado una variedad de secadores de madera solares adecuándolos a las diferentes condiciones geográficas de cada lugar. Debido a esto y a los elevados costos en infraestructura que son necesarios para un secador de madera convencional, se han desarrollado alternativas de menor costo sin mermar la calidad del proceso. Una de estas tecnologías es la "estufa solar de secado de madera" que ha sido probada y usada con éxito en varias zonas del país

El diseño básico de la tecnología de los secadores solares, consta de cuatro partes fundamentales (Quintanar, 2014). Y aunque pueden existir variaciones y agregados de equipo según el diseño o grado de sofisticación del mismo, los elementos principales son: cámara de secado, sistema de captación de la energía solar, sistema de circulación del aire y sistema de control de humedad y temperatura (Figura 1).

La cámara de secado es la parte donde se apila la madera a secar. Para los materiales de construcción, capacidad o forma geométrica de la cámara (diseño) no existen especificaciones, por lo que es necesario ajustarse a las especificaciones técnicas para estufas de secado de madera, como es el ancho y altura de pilas, entre otras o de los materiales locales que tengan las propiedades adecuadas para ser utilizados en la construcción de la misma (Quintanar, 2005).

El colector solar puede o no formar parte de la cámara, se construye con materiales transparentes de tal forma que se impida la pérdida de calor del interior, junto con bastidores para soportar el peso del colector. El caso más común es que el colector solar, se ubica como un techo en la cámara de secado, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar.

El movimiento del aire al interior del secador solar debe ser continúo, tanto para que se caliente al pasar por el colector como para que circule a través de las pilas de madera y se realiza mediante el uso de ventiladores, accionados por motores de baja potencia.

Los objetivos fundamentales de la circulación del aire en el secado solar son:

- Transportar el calor de los colectores y así aumentar la velocidad de transmisión del calor.
- Distribuir uniformemente el calor por todo el secador.
- Proporcionar un medio de mezclado y acondicionamiento del aire antes de entrar a la carga de madera o producto a secar.
- Transportar la humedad evaporada de la superficie de las tablas.

Debido a que la humedad y temperatura al interior del secador, dependen fundamentalmente de las condiciones ambientales, su control básico es manual, mediante la apertura y cierre de ventilas.

SECADOR SOLAR EVALUADO

La evaluación del secador se realizó en el Ejido Miguel de la Madrid, municipio de Manzanillo, Colima. El diseño del secador bajo estudio es de tipo invernadero, con colectores internos y circulación forzada. Consta de un colector de 30 m^2 formando parte de la cámara de secado, construido con láminas galvanizadas del calibre más bajo, pintadas de negro "mate" en la parte expuesta al sol, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar. La construcción es a base de bastidores de PTR y cubierta con polietileno transparente, calibre 720 con tratamiento para rayos UV, comúnmente utilizado en la construcción de invernaderos (Fig. 1).

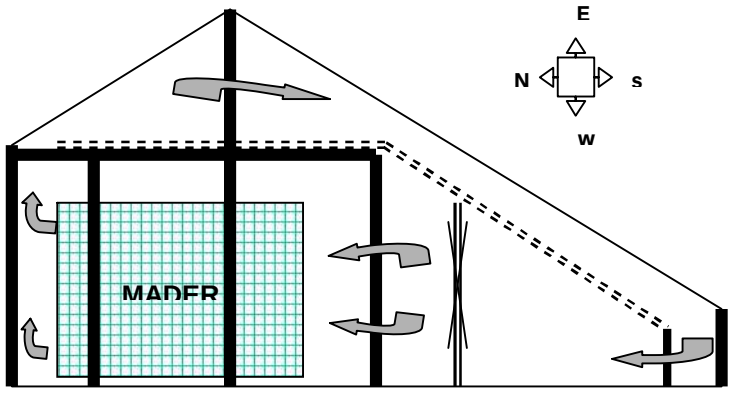


Figura 1. Diagrama del secador solar.

Para mover el aire al interior del secador a una velocidad de 1.5 m/seg, se utilizan dos ventiladores eléctricos con motor de ¼ HP. Además, cuenta con ventilas de cierre manual para la extracción del aire húmedo. La madera de *Enterolobium cyclocarpum* fue apilada al interior del secador, utilizando separadores de 2.5 cm de grueso. Las pilas de madera aserrada tienen un ancho de 1.2 m, y con una altura de 18 camas de tablas (Quintanar, 2016). La determinación de la pérdida de humedad en la madera durante el proceso de secado se realizó mediante el pesado de tablas muestra como testigos y mediante la determinación del contenido de humedad con un medidor de humedad eléctrico. Se determino la curva de secado de la madera (pérdida de humedad vs tiempo) hasta alcanzar un contenido de humedad apropiado para elaborar productos a base de madera con alto valor agregado (muebles).

El tiempo de secado de madera al aire libre es de aproximadamente 24 a 26 días, para alcanzar el contenido de humedad en equilibrio de la zona (18 – 18%), mientras que utilizando un secador solar es de 16 días para alcanzar un 12% de humedad final promedio en la madera. Estos resultados muestran que mediante el uso del secador solar se reduce hasta en un 40-60% el tiempo de secado (Fig. 2).

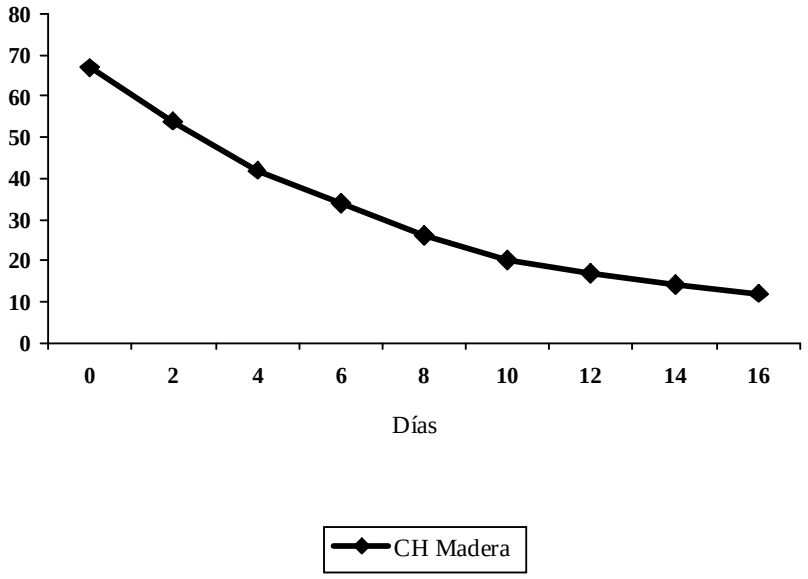


Fig.2. Curva de secado para madera aserrada de parota.

Las temperaturas del medio ambiente durante el mes de marzo en la zona, variaron de 16-18°C por la mañana a 32-34°C aproximadamente a las 16:00 horas, generándose temperaturas de hasta 47-50°C al interior del secador, mostrando que la trayectoria de las temperaturas durante el transcurso del día siempre son mayores al interior del secador que las existentes en el medio ambiente (Fig. 3).

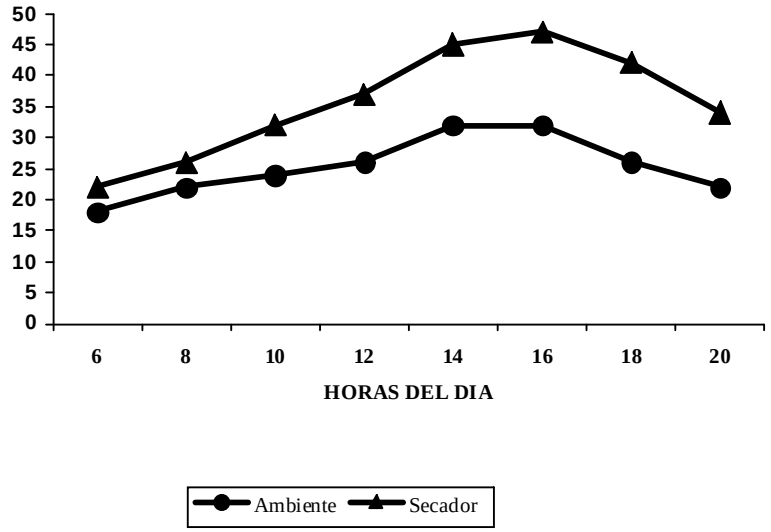


Fig. 3 Temperaturas interior del secador - exterior ambiente.

Bajo éste perfil de temperaturas al interior del secador solar, las condiciones de secado que se generan al interior de éste tipo de secadores, son consideradas suaves, suficientes para cualquier tipo de madera. Sin embargo, esto no implica que se optimice el uso del secador, más bien, estas condiciones son acordes a las necesidades de temperaturas para el secado de aquellas maderas difíciles de secar, como la madera aserrada de algunas especies duras tropicales, que requieren temperaturas del orden de 38°C a 55-60°C y con humedad en equilibrio alta para su secado apropiado. Por lo tanto, los secadores solares cubren los requerimientos energéticos del proceso de secado de este tipo de maderas.

Sin embargo, el perfil de temperatura no es constante durante las horas de un mismo día, y tampoco durante los días que dura el proceso de secado. Esto se debe a que la temperatura del secador depende de la radiación solar (directa y difusa) que llega y puede aprovecharse mediante el colector solar, la cual puede variar por efecto de la nubosidad (Tejeda y Gómez, 2015). Por otro lado, la humedad relativa del aire de secado es un factor crítico para controlar la velocidad de secado del producto. Cuanto menor sea la humedad relativa, mayor es la capacidad de absorción de aire de secado.

Un aspecto relevante a tener en cuenta, es lo que pasa durante la noche, cuando existe un enfriamiento de la cámara de secado, llegando a generarse condensación en las paredes del secador. Una forma de manejar este aspecto es mantener abiertas las ventilas y prendido el ventilador para mover la humedad relativa del interior de la cámara.

CONCLUSIONES

El tiempo promedio para secar madera aserrada de *Enterolobium cyclocarpum* en el área del municipio de Manzanillo, Colima, utilizando un secador solar es de 16 días en promedio, bajando el contenido de humedad de 67% en verde hasta un 12% de humedad en promedio, que es un contenido de humedad apropiado para elabora diversos productos a base de madera con alto valor agregado. Se reduce el tiempo de secado en un 35%, pero con una mayor calidad de secado (sin defectos), con un incremento de la temperatura interior de 15°C respecto a la temperatura ambiente, alcanzando temperaturas apropiadas para el secado de éste tipo de madera.

REFERENCIAS

Haque, M. N. 2002. Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber. Thesis the doctor of philosophy. The University of Sydney. Australia. 140 p.

Quintanar O. J. 2016. Secado solar: Tecnología apropiada para pequeños productores de maderas duras. Folleto técnico (En revisión). Campo Experimental San Martinito, CIRGOC-INIFAP. San Martinito, Puebla. Méx. 20 p.

Quintanar O. J. 2014. Secado solar de madera. Desplegable para productores Núm. 80. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México. 2 p.

Quintanar O. J. 2005. Construcción y operación de un secador solar para madera. Folleto técnico No. 2. Campo Experimental San Martinito, CIRCE-INIFAP. San Martinito, Puebla. Méx. 45 p.

Tejada M., A. y G. Gómez A. (Compiladores). 2015. Prontuario solar de México. Dirección General de Publicaciones. Universidad de Colima. Colima, Colima. 149 p.

Viehbeck, P. 1999. Lo básico del secado de madera con energía solar. GATE-GTZ. Eschborn. Traducido por. Ormaza, E. y A.M. Galindo. Santa Cruz, Bolivia. 49 p.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DEL PERFIL DE TEMPERATURAS EN UN SECADOR SOLAR ACTIVO TIPO INVERNADERO

Juan Quintanar Olguin
Campo Experimental San Martinito, CIRGOC-INIFAP, Km. 56.5 Carretera Federal México-Puebla,
San Martinito Tlahuapan, Puebla. CP 74100. México. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 87717.
quintanar.juan@inifap.gob.mx

RESUMEN

Ante la necesidad actual de contar con materia prima de calidad y los elevados costos en infraestructura y energéticos de los secadores convencionales, los productores se han visto con la necesidad de buscar alternativas viables para secar su producto a un bajo costo. En el transcurso de los últimos 60 años, una gran variedad de secadores solares han sido diseñados y evaluados a nivel mundial. Se han probado diferentes diseños y materiales, pero la gran mayoría de los diseños desarrollados están basados en el concepto de "prueba y error", realizándose la evaluación térmica del proceso de secado. En el presente estudio, se realizo un perfil de temperaturas en un secador solar tipo invernadero, donde el colector solar forma parte de la cámara y el movimiento del aire al interior se realiza de forma activa, mediante el uso de ventiladores. La medición de la temperatura fue realizada con termopares tipo J, ubicados en cinco zonas estratégicas: en la zona activa del colector solar, al final del mismo, en la zona de los ventiladores, antes de entrar y al salir de la pila del material a secar. Los resultados muestran los cambios de temperatura del fluido, siendo más baja al salir de la pila, cuando arrastra la humedad del material que se esta secando y su máximo al final de la zona de calentamiento.

ABSTRACT

Given the current need for quality raw material and high costs in infrastructure and energy of conventional dryers, producers have seen the need to find viable alternatives to dry their product at a low cost. Over the past 60 years, a variety of solar dryers have been designed and evaluated globally. They have tested different designs and materials, but the vast majority of developed designs are based on the concept of "trial and error", performing thermal drying process evaluation. In the present study, a temperature profile was conducted in a greenhouse type solar dryer where the solar collector is part of the chamber and air movement inside is done actively, by using fans. The temperature measurement was performed with thermocouples type J, located in five strategic areas: in the active zone of the solar collector at the end of it, in the area of the fans before entering and leaving the stack of material dry off. The results show temperature changes of the fluid, being lower out of the pile, when you drag moisture is drying material and its maximum at the end of the heating zone.

Palabras claves: Eficiencia secado, Secado solar madera.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos el ser humano se ha visto en la necesidad de secar granos, hierbas, carnes o madera, ya sea para conservar sus alimentos y medicinas, tener material para hacer sus utensilios. En la actualidad el avance mundial en materia de secado solar ha tenido un cierto repunte debido a las perspectivas poco prometedoras de la economía de los combustibles fósiles y la ventaja de usar instalaciones de energía solar, que requieren de poco capital y bajos costos de mantenimiento, son de fácil construcción y cualquier material disponible puede ser usado. Puede ser utilizado como proceso individual o combinado complementando los procesos de secado convencionales, lo cual reduce la cantidad de combustible y energía utilizados. Además, los recursos energéticos que se utilizan son de tipo renovables, teniendo un menor impacto ambiental que otros métodos.

El funcionamiento de los secadores solare está basado en el principio invernadero, donde la energía solar es atrapada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido (aire), el cual realiza el proceso de secado al circular a través del producto a secar, transportando la humedad evaporada de los materiales a secar.

Los sistemas de captación de la energía solar, se clasifican en dos grandes grupos: aquellos que cuentan con un dispositivo de captación independiente de la cámara de secado y los que utilizan la propia cámara de secado como área de captación de la radiación solar. Además, dependiendo de la forma de mover el fluido en el secador solar, se pueden clasificar como secador solar tipo invernadero con convección natural o modo pasivo y con convección forzada o modo activo (Mustayen *et al.*, 2014; Prakash and Kumar, 2014; Kumar *et al*, 2016).

Por otro lado, Kumar *et al* (2016) recomiendan al secador solar tipo invernadero con convección forzada (modo activo) para mejorar el secado de productos con altos contenidos de humedad.

El secado solar consiste básicamente en la utilización de la energía proveniente de la radiación solar para la evaporación del agua contenida en el alimento. Hay dos mecanismos básicos de transferencia de materia, la migración de la humedad desde el interior del producto a su superficie y la transferencia de la humedad desde la superficie hasta el aire circundante, en forma de vapor de agua.

Uno de los puntos básicos que deben ser evaluados en un secador solar tipo invernadero, son las temperaturas interiores a lo largo del día y en diferentes épocas del año. Sin embargo, una primera aproximación seria evaluar las temperaturas en estado estable para un día específico. Ya que en todo proceso de secado, es necesario ejercer control sobre las variables involucradas en el proceso: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, variables que a fin de cuentas definen la calidad para satisfacer las exigencias de los consumidores y asegurar las condiciones óptimas de calidad durante y después del proceso de secado.

En el presente estudio, se realizo un perfil de temperaturas en un secador solar tipo invernadero, donde el colector solar forma parte de la cámara y el movimiento del aire al interior se realiza de forma activa, mediante el uso de ventiladores.

DESCRIPCIÓN DEL SECADOR SOLAR ACTIVO TIPO INVERNADERO

La evaluación del secador se realizó en las instalaciones del Campo Experimental San Martinito, en el municipio de Tlahuapan, Puebla. El diseño del secador es de tipo invernadero, de 2.4 m de ancho y 5.6 m de largo, con colectores internos y circulación forzada. Consta de un colector de 14.6 m^2 formando parte de la cámara de secado, construido con láminas galvanizadas del calibre más bajo, pintadas de negro "mate" en la parte expuesta al sol, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar. La construcción es a base de bastidores de PTR y cubierta con polietileno transparente, calibre 720 con tratamiento para rayos UV, comúnmente utilizado en la construcción de invernaderos. Para mover el aire al interior del secador a una velocidad de 1.5 m/seg, se utiliza un ventilador eléctrico con motor de ¼ HP. El monitoreo de la temperatura se realizo con 8 termopares tipo J, ubicados en distintas posiciones del secador (Figura 1). Las mediciones se realizaron entre las 15 y 16 horas, momento de máxima intensidad solar. La adquisición de datos se realizó mediante el sistema LabVIEW de Nacional Instruments. Los datos fueron tomados con el secador vacío. La primera toma se realizó en modo pasivo, sin mover el aire y la segunda medición se realizó con el ventilador accionado, esto es con el aire interior del secador en movimiento. Las condiciones climáticas exteriores se midieron por una estación meteorológica.

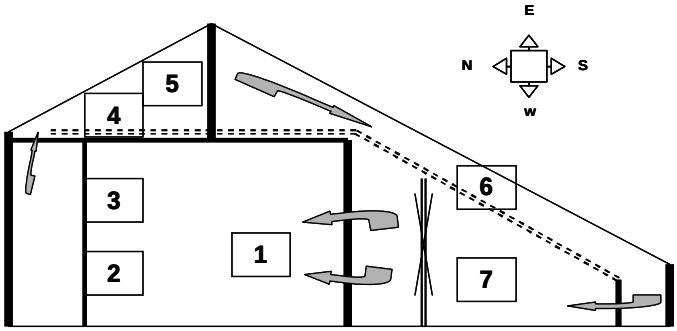


Figura 1. Diagrama del secador solar y ubicación de termopares para monitoreo de temperatura.

La temperatura promedio ambiental al momento de realizar la toma de datos fue de 23.2°C, existiendo una diferencia de 22°C con respecto a la temperatura de la cámara con al aire en reposo, y de 26°C entre la temperatura de la cámara y la zona de calentamiento del aire, lo que genera un diferencial de temperatura de 48°C entre la temperatura ambiental y la del área del colector solar. Estas diferencias son semejantes a las reportadas por Condorí et al (2010), cuando el flujo de aire al interior del secador es estático.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas promedio en el interior secador solar en diferentes puntos de evaluación. Las temperaturas de la Tabla están distribuidas en el siguiente orden; en diferentes alturas del área de colectores, entrada de aire al ventilador y zona de empuje del ventilador, entrada y salida de la cámara de secado. Se pueden observar temperaturas altas en el interior del área de colectores, de aproximadamente 71° y 62°C a las 16:00 horas, cuando el flujo de aire es estático y de 57°C a 63°C, cuando el existe flujo de aire a una velocidad de 1.5 m/seg.

Tabla 1. Temperaturas dentro de la cámara con y sin movimiento de aire.

Numero de Termopar	Dato de temperatura °C	
	Sin movimiento	Con movimiento
1	41.2	45.6
2	45.7	46.6
3	45.9	48.3
4	71.3	57.7
5	71.7	56.5
6	61.8	63.5
7	45.1	56.2

En la Figura 2, se muestra los perfiles de temperatura dentro del secador solar, cuando no existe movimiento de aire al interior, existiendo una temperatura mayor en las zonas comprendidas entre el área de colectores y la cubierta envolvente del secador. Esto se debe a que el aire caliente se encuentra estacionado en el área de calentamiento, datos semejantes a los reportados por Condorí *et al* (2010). Esto genera una diferencia de 26°C en promedio con respecto a la temperatura existente en el área de la cámara de secado y de 48°C en relación con la temperatura del medioambiente.

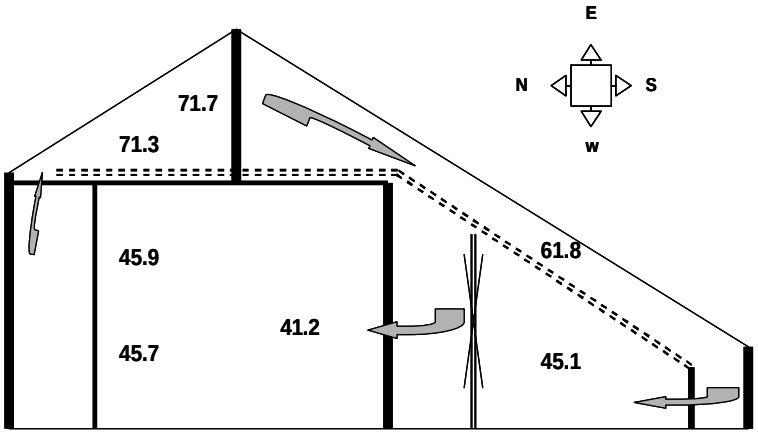


Figura 2. Temperaturas dentro del secador solar, sin movimiento de aire.

En la Figura 3, se muestra los perfiles de temperatura dentro del secador solar, cuando existe movimiento de aire al interior, esto genera un perfil de temperaturas es más homogéneo. Se eleva y tiende a homogeneizarse la temperatura de la cámara de secado, con un decremento marcado de la temperatura del área de calentamiento. Existiendo un valor más alto en el área donde la cubierta de plástico esta más cerca de las láminas, esto es, donde se forma un colector solar plano. Por lo que existe una tendencia a homogeneizar la temperatura del fluido de secado, esto es, el flujo de energía transmitido es afectado por el tamaño y material del envolvente y captador solar, generando distintas condiciones de secado o evaporación en el fluido que interactúa con el material a secar (Serrano-Arellano *et al*, 2013).

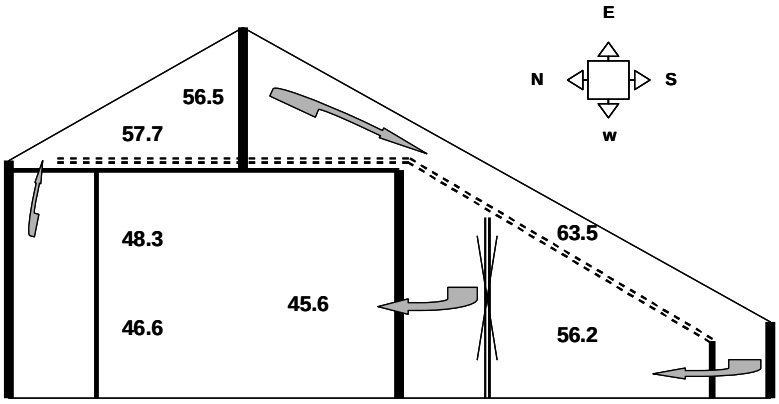


Figura 3. Temperaturas dentro del secador solar, con movimiento de aire de 1.5 m/seg..

CONCLUSIONES

Las diferencias de temperatura entre el interior del secador y el medio ambiente, son mayores cuando el flujo de aire es estático, con marcadas diferencias entre las temperaturas de la cámara de secado y la zona de calentamiento de aire; diferencias que tienden a minimizarse, tanto entre el medio ambiente y con el interior de la cámara y área de calentamiento, como la diferencia entre cámara y área de calentamiento, dado que tiende a homogeneizarse la temperatura al interior del secador solar.

REFERENCIAS

Condorí, M. A., G. Durán y r. Echazú. (2010). Diseño, construcción y análisis de un secador solar industrial en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, Argentina. Memorias IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar y XVII Simposio Peruano de Energía Solar. Cusco, Perú.

Kumar S. T., V. Gupta and A. Kumar S. (2016). A review on solar drying techniques and solar greenhouse dryer. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineerin. Volume 13(3):31-37.

Mustayen, A. G. M. B., S. Mekhilef and R. Saidur. 2014. Performance study of different solar dryers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 34:463–470.

Prakash O. and A. Kumar. 2014. Solar greenhouse drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 29:905-910.

Serrano-Arellano, J., J. L. Chávez-Servín., K. Torre-Carbot. M. Gijón-Rivera y A. Mercado-Luna. 2013. Estudio numérico del ambiente térmico de un invernadero. Memorias del XIX Congreso Internacional SOMIM. Pachuca, Hidalgo, México. 1313-1321.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

CARACTERIZACIÓN DE UNA COCINA SOLAR DE TUBO EVACUADO Y SU IMPLEMENTACIÓN EN EL ÁREA RURAL Y URBANA

Cynthia Salero Velázquez, Sandra Soto Álvarez, Ángel Marroquín de Jesús
Universidad Tecnológica de San Juan del Río, División de Química Industrial y Energías Renovables
Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial y Energía Renovable
Av. La Palma no. 125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Qro. C.P. 76800, México
01 (427) 129 2000, amarroquind@utsjr.edu.mx

RESUMEN

El uso de energías renovables se ha convertido en la mejor alternativa para disminuir los graves efectos del calentamiento global. En el presente artículo se muestra la caracterización de una cocina solar, elaborada a partir de un tubo evacuado que se utiliza en calentadores solares para calentar agua para uso sanitario, en el interior del tubo se ha introducido una charola, elaborada con acero inoxidable grado alimenticio, la cual se utiliza para colocar los alimentos, aprovechando los altos valores de radiación solar que se tienen en el altiplano mexicano, los valores de temperatura en el interior de la charola donde se colocan los alimentos, fueron medidos utilizando un sensor y una tarjeta Arduino y las variables climatológicas fueron registradas por la estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO PLUS 2, la cocina tiene una capacidad para preparar alimentos para una familia de 4 a 5 personas, se han caracterizado diversos alimentos entre ellos, carnes, aves, postres y verduras, así como el horneado de pan, se ha realizado un análisis de su comportamiento y se ha evaluado la efectividad de la tecnología, lo anterior es una propuesta viable, que permitirá mejorar la calidad de vida de las personas y ahorrar en el consumo de gas.

ABSTRACT

The use of renewable energy has become the best alternative to reduce the serious effects of global warming. In this article the characterization of a solar cooker shown, made from an evacuated tube used in solar heaters to heat water for domestic use inside the tube is inserted a tray, made with stainless steel food grade , which is used to place food, taking advantage of the high values of solar radiation have in the Mexican highlands, the temperature values inside the tray where the food is placed, were measured using a sensor and a arduino and climatic variables were recorded by the weather station DAVIS VANTAGE PRO PLUS 2, the kitchen has a capacity to prepare food for a family of 4 to 5 people, they have characterized various foods including meat, poultry, desserts and vegetables, and baking bread, has performed an analysis of their behavior and assessed the effectiveness of the technology, the above is a viable proposal, which will improve the quality of life of people and save on gas consumption.

Palabras clave: Energías renovables, calentamiento global, caracterización, cocina solar, tubo evacuado, calentadores solares, acero inoxidable, radiación solar.

INTRODUCCIÓN

La energía solar en México supone una excelente fuente de energía calorífica que se platea el uso de energía solar limpia. Una de las fuentes principales de energía son los combustibles fósiles, su alto índice de emisiones de CO2 a la atmósfera nos conduce a buscar nuevas alternativas no contaminantes. Es por ello que las cocinas solares son una gran alternativa, conforman la tecnología limpia, por el uso de la energía solar. En la actualidad el uso de gas u otros combustibles para la cocción de alimentos. Este desarrollo tecnológico se pretende sea utilizado por las personas que habitan en la zonas urbanas como es el caso de la ciudad de Querétaro pero también en zona rurales del estado como es el caso de Sierra Gorda.

CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS

COCINA SOLAR

Las innovaciones de cocción de alimentos con el uso de nuevas tecnologías empleando fuentes renovables, llegando a lo que hoy se conocen como cocinas solares. Una Cocina Solar es un dispositivo que utiliza la energía proporcionada por los rayos solares para lograr la cocción de los alimentos a través de la concentración y/o la acumulación de la energía.

La mayoría de las cocinas solares, tanto parabólicas como paneles y hornos, hacen uso de los dos métodos: concentración y acumulación de energía, aprovechando al máximo la radiación solar y logrando no sólo temperaturas suficientes para la cocción, sino también similares a las cocinas convencionales. El objetivo de este proyecto es la realización de un prototipo de una cocina solar portátil que consta de un

tubo evacuado de Boro Silicato y la realización de diferentes recetas que demuestren la eficiencia de cocinar con energía solar, obteniendo datos de las temperaturas alcanzadas dentro del tubo evacuado, concretando la idea de cocinar sustentablemente.

Descripción

Cada tubo evacuado en realidad consta de dos tubos, uno insertado en el interior del otro de mayor diámetro, formando una cámara de aire el cual es extraído o evacuado, de ahí su nombre, para formar un vacío que evitará la transferencia de calor por convección. Al tubo interior se le reviste con una aleación de Nitrato de Aluminio principalmente, para formar una superficie que capturará la radiación solar y convertirá los rayos solares en calor aprovechable. Para mantener el vacío, un aspersor de gases es utilizado en el anverso de cada tubo evacuado. Durante su fabricación el aspersor es expuesto a campos magnéticos de alta frecuencia las cuales crean altas temperaturas en un segundo y recubren el anverso del tubo con una capa de bario puro. Esta capa de bario absorbe activamente cualquier tipo de gas (CO, CO^2, N^2, O^2, H^2O y H^2) que pudiera emanar el tubo durante su operación, de esta forma los tubos de cristal al alto vacío tienen una vida de uso mayor. Y en la punta una goma de plástico para proteger y asegurar una larga vida al tubo.

Diseño de la cocina

El proyecto de investigación consistió en llevar a cabo la caracterización de una cocina solar utilizando un tubo evacuado de 47mm de diámetro y 52 cm de largo; estos tubos evacuados están construidos con un cristal proveniente de la fundición de dos elementos (Boro y Silicio), y cuenta con excelentes características de rigidez y translucidez, necesarias para la captación solar.
En el interior del tubo y para realizar la cocción de los alimentos se fabricó una charola simulando un sartén en una cocina convencional, la cual no cierra herméticamente para evitar la acumulación de la presión sin tener muchas pérdidas de calor. Esta charola está construida con lamina de acero inoxidable tipo AISI– 304, de 47 cm de largo y doblada a 220° de acuerdo a una circunferencia de 4 cm. También se implementó una base para poner el tubo evacuado y sea más confortable su uso evitando que este al ras del suelo.

Experimentación

Una vez construido el prototipo, se procedió a realizar los experimentos. En esta etapa, se elaboró un circuito utilizando un Arduino con ayuda de un sensor de temperatura Max6675 k, el cual fue previamente programado para tomar datos de temperatura al interior del tubo evacuado para comparar parámetros de cocciones de recetas utilizando diferentes alimentos como carnes, verduras e incluso pan.

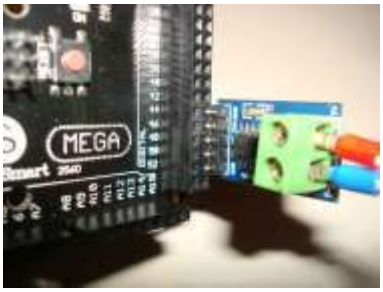


Ilustración 1 sensor de temperatura

Pasos principales para la cocción de alimentos en la cocina solar de tubo evacuado:

1. Seleccionar la receta a preparar.
2. Los utensilios deben ser preferiblemente de acero inoxidable o de otros materiales lisos e impermeables.
3. Persona a preparar los alimentos deberá lavarse bien las manos o usar guantes y cofia para cubrir el cabello.
4. Preparación de vegetales lavarlos minuciosamente, El tiempo de cocción debe ser el mínimo para evitar la pérdida de nutrientes.
5. Preparación de legumbres necesitan remojarse en agua tibia antes de cocinarse.
6. Seleccionar los mejores productos y de alta calidad
7. Cortar, de acuerdo con el producto y la presentación deseada, cortar en forma de cubos, trozos, rodajas o tiras. En todos los casos el espesor de los pedazos no debe pasar los 0.5 cm a 1 cm de grosor, para favorecer mejor su cocción.
8. Preparar la receta como es el marinado de carne, preparación de harina para pan.
9. Colocación de productos en la charola para meter al tubo evacuado para su pronta cocción
10. Colocar el sensor para tomar lecturas de temperatura y tiempo para después compararlas.
11. Cada 30 minutos se verificaba que el circuito estuviera funcionando correctamente, asimismo se monitoreaba el estado de la cocción de los alimentos. Una vez realizada la total cocción de dicho platillo se procedía a servirlo y degustarlo.

Ejemplo: Carne marinada al estilo San Juan del Río

Modo de preparación: en un tazón de vidrio poner el jugo de naranja y el jugo de limón, poner los ajos finamente cortados con la salsa de soya y los demás ingredientes como son el chile chipotle el chile en polvo, cilantro, poner en seguida el aceite de oliva, picara la carne en fajitas y ponerla dentro del tuvo evacuado para su cocción conjunto con un poco de la marinada preparada, colocando la cocina solar en poción al norte 20°. Esperar su cocción de 60 minutos y degustar.

Ingredientes
½jugo de naranja
½ taza de jugo de limón amarillo
4 dientes de ajo picados
½ taza de salsa de soya
1cucharadita de chile chipotle finamente picado
1 cucharada de chile en polvo
Cilantro fresco
Pimienta negra al gusto
½ taza de aceite de oliva
½ kg de arrachera de res

Ilustración 3 colocación en tubo evacuado

Ilustración 4 carne marinada

Ilustración 2 cocción de la carne

Resultados

Se muestran los resultados obtenidos de radiación solar, de temperatura dentro de la cocina.

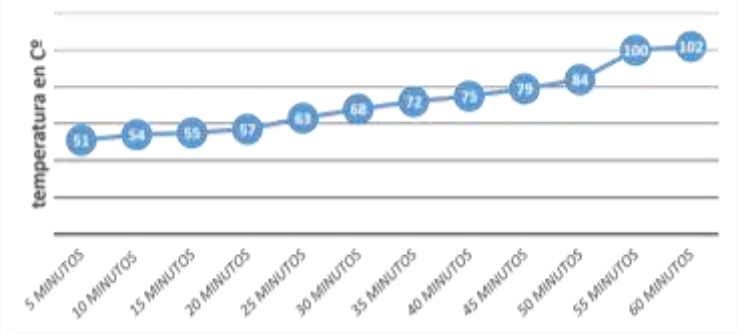


Ilustración 5 Temperatura interior de la cocina

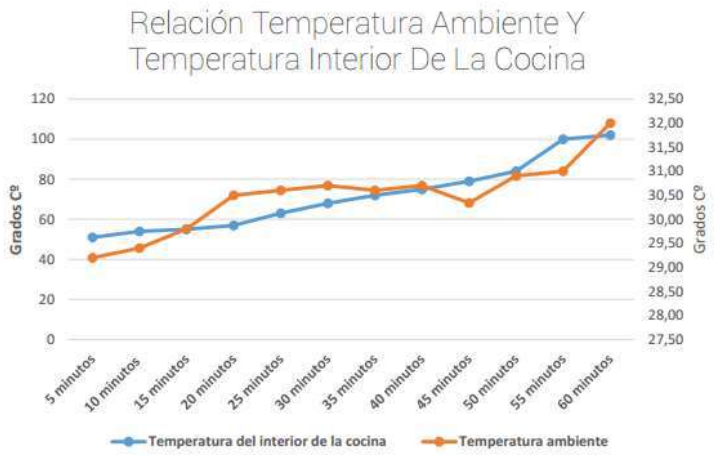


Ilustración 6 Relación temperatura ambiente y temperatura interior de la cocina

Ilustración 7 Relación temperatura del interior de la cocina - radiación solar

Ilustración 8 Relación temperatura interior de la cocina - velocidad del viento

Conclusiones

Se ha presentado un prototipo de una cocina solar portátil de tubo evacuado, cual puede ser muy útil para zonas rurales como urbanas, reduciendo el uso de combustibles fósiles.

Se observó claramente que gracias a los altos niveles de radiación solar que incide sobre San Juan del Río, Qro. (4.78 kWh/m2/d), este prototipo que se diseñó es muy viable para ser utilizado en la región, ya que los tubos evacuados tienen la capacidad de realizar la transferencia de calor por convección al interior y sirven tanto con la radiación difusa como la directa.

Es posible realizar la cocción de los alimentos gracias a la conducción de calor debido a que la charola que está en el interior del tubo, en donde se pone la comida a cocinar, es de metal y conduce perfectamente el calor hacia los alimentos.
Concluye que después de que la cocina solar esté expuesta a la radiación solar alcanzará más de 120 °C en el interior para cocinar. La rapidez de la cocción se verá afectada por la cantidad de comida al interior de la charola, así como los niveles de radiación en el área.
Es posible cocinar con esta cocina durante el día, dependiendo del platillo, se tardará a lo máximo tres horas para cocinar cualquier alimento.
Una alternativa de cocinar sustentablemente ayudando a la economía familiar, además añadiendo un plus ya que no requiere mantenimiento extra, se realizó un recetario de diferentes formas de cocinar con la cocina solar de tubo evacuado presentando los parámetros para comparación, demostrando que si puede cocinar en este prototipo.

Referencias

[1] Taddei, B. J., & Luna, Z. C. (2010). El Cambio Climático. ¿Qué es? ¿Qué podemos hacer? Hermosillo, Son.,Mex.: Universidad de Sonora.

[2] World Energy Council. (2013). *World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050*. Recuperado el Julio de 2015, de http://www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050/

[3] Notimex. (2007). *La Jornada*. Recuperado el Julio de 2015, de http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2007

] Dr. Gallego, H. (Diciembre de 2014). *Grupo empresarial Las Américas.* Recuperado el Julio de 2015, de http://www.conexionlasamericas.com/diciembre12/paginas/humodelenariesgosparalasalud.html

[5] Burgos, D. (2006). *Cocina Lorena.* Bogotá: Organización Panamericana de la Salud.

[6] Ramírez, M. (2015). Tesis. *Cocina Solar con tubos evacuados*. San Juan del Río, Qro.: UTSJR.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA SOLAR TIPO CPC CON TERMOSIFON PARA APLICACIONES RESIDENCIALES

Fernando Lara Chávez, Rafael Ortiz Castañón, Abelardo Mercado Herrera, Manuel Cervantes Astorga, Juan C. Ling López, Rosa V. García Guzmán, Jesús Coronel Meza
Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Baja California, Calle de la Claridad S/N, Col. Plutarco Elías Calles, Mexicali, Baja California, CP 21376, México, (01686) 104 27 30, flarac@upbc.edu.mx

Jesús Cerezo Román
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, CP 62209, México, (01777) 329 70 00, jesus.cerezo@uaem.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación de un sistema de calentamiento de agua con termosifón utilizando Concentradores solares Parabólicos Compuestos (CPC) con la finalidad de satisfacer necesidades de demanda de agua caliente de una vivienda. Los componentes que conforman el sistema son dos módulos CPC con un área de captación total de 1.79 m^2, así como un tanque de almacenamiento de agua aislado con capacidad de 240 litros. El sistema fue evaluado para la ciudad de Mexicali B.C considerando las condiciones climatológicas del lugar, principalmente durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre. De acuerdo a los resultados obtenidos, la mínima cantidad de energía promedio producida por el CPC ocurrió el mes de diciembre con 19.85 MJ, seguido por enero, noviembre y febrero con 20.41, 23.8 y 25.64 MJ. En el caso de la máxima producción se tuvo en junio con 51.49 MJ, seguido por mayo y julio con 47.78 y 47.28 MJ. Desde el punto de vista operativo, el sistema propuesto permitió cubrir satisfactoriamente la demanda de la vivienda durante el mes de diciembre (mes crítico), al alcanzar una temperatura máxima de 36.04°C con autonomía de 7 horas diarias. En cuanto a marzo y septiembre la máxima temperatura del agua almacenada fue de 51.91 y 62.79°C con una autonomía suficiente de 9 y 9.5 horas, respectivamente. En el caso de junio se tuvo que la temperatura ambiente promedio fue de 35.87°C, ocasionando que la demanda de calentamiento de la vivienda fuera nula y no fuera necesaria la operatividad del sistema en gran parte del verano. De manera general, se considera que el sistema propuesto representa una opción viable a los esquemas convencionales de calentamiento de agua debido al potencial de ahorro que puede generar al usuario.

ABSTRACT

This work presents the evaluation of a water heating system with thermosyphon using Compound Parabolic Concentrator (CPC) in order to satisfy residential needs of hot water demand. The components of the system are two CPC modules with a total collection area of 1.79 m^2 and an isolated water storage tank with capacity of 240 liters. The system was evaluated for the city of Mexicali B.C considering the weather condition, mainly during the months of March, June, September and December. According to the obtained results, the average minimum amount of energy produced by the CPC occurred in December with 19.85 MJ, followed by January, February and November, with 20.41, 23.8 and 25.64 MJ. Maximum production was held in June with 51.49 MJ, followed by May and July with 47.78 and 47.28 MJ. The proposed system met the residential demand in December (critical month), reaching a maximum temperature of 36.04°C with autonomy of 7 hours a day. As for March and September the maximum temperature of the storage water was 51.91 and 62.79°C with sufficient autonomy of 9 and 9.5 hours respectively. In June the average ambient temperature was 35.87°C, causing a null heating demand and system operability would not be necessary in summer. Generally, it is considered that the proposed system represents a viable alternative to conventional water heating schemes due to savings potential generated to the user.

Palabras claves: Concentrador Parabólico Compuesto, Almacenamiento Solar, Termosifón, Calentamiento solar, Concentración solar.

INTRODUCCION

En nuestro país la gran mayoría de los estados presentan descensos considerables en los niveles de temperatura, lo que hace necesario el uso de sistemas de calentamiento de agua. La ciudad de Mexicali ubicada al noroeste del país, es una región con climas extremosos donde se requiere satisfacer necesidades personales durante la temporada de invierno. Por otro lado, los calentadores de agua típicos presentan la problemática de consumir una gran cantidad de energía para su operabilidad, lo cual provoca daños serios al medio ambiente. Una opción alterna que permite desacelerar el uso de fuentes contaminantes consiste en la implementación de sistemas de calentadores de agua impulsados con energía solar. De acuerdo a la literatura, los calentadores solares se pueden dividir en colectores solares (c=1) y concentradores solares (c>1). Dentro de los concentradores solares se encuentra al tipo CPC, el cual posee una geometría peculiar que aprovecha la radiación proveniente del sol para elevar la temperatura del agua. Sus inicios se remontan a 1966 en los Estados Unidos de Norteamérica por H. Hinterberger y R. Winston (Hinterberger y Winston, 1974) y de forma paralela en Rusia por Baranov y Melnikov

(Duffie and Beckman, 2006). Los CPC pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones tales como el calentamiento solar pasivo, calentamiento solar activo, calentamiento de espacios, producción de agua caliente, bombas de calor, enfriamiento por absorción, sistemas de refrigeración, calor de procesos industriales para aplicaciones de agua o aire, desalinación (evaporación súbita multietapa, ebullición múltiple efecto, compresión de vapor) y sistemas químicos solares para sistemas de potencia térmica (Kalogirou, 2004). Distintos estudios numéricos y experimentales se han llevado a cabo con la finalidad de evaluar el desempeño de la tecnología CPC de forma individual o acoplada a un sistema de calentamiento solar. De acuerdo a un estudio efectuado por Okoronkwo (Okoronkwo et al, 2014), un calentador solar tipo CPC con sistema de reservorio tipo termosifón tiene la capacidad de calentar agua desde los 25°C hasta los 99.1°C. Con base en esto y considerando el clima extremoso de la ciudad de Mexicali, Baja California, se ha visto como viable el uso de calentadores solares tipo CPC con sistema termosifón para satisfacer las necesidades de demanda de agua caliente sanitaria, debido a los niveles de temperatura alcanzados con un área de captación menor a la requerida por un colector tipo placa plana.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema de calentamiento de agua tipo CPC con termosifón es mostrado en la figura 1. Los elementos básicos que lo componen son dos colectores solares tipo CPC, un depósito para almacenamiento de agua con capacidad de 240 litros, así como tuberías de conducción para la interconexión de los elementos. La operación del sistema se puede describir como sigue; durante las primeras horas del día el depósito aislado contiene agua a una temperatura inicial superior a la temperatura ambiente. A medida que la radiación solar incide sobre la superficie de captación de los CPC, estos empiezan a provocar un incremento en la temperatura del agua que circula dentro de los tubos absorbedores. La diferencia de densidades ocurrida a lo largo de las tuberías de conducción de los concentradores, permitirá la circulación del agua hacia el depósito a manera de termosifón, dicho efecto se repetirá hasta tratar de alcanzar una temperatura homogénea. En caso de existir la necesidad de suministro de agua caliente a la vivienda, la masa extraída del depósito será repuesta por agua de menor temperatura proveniente de la red, provocando la reactivación del termosifón.

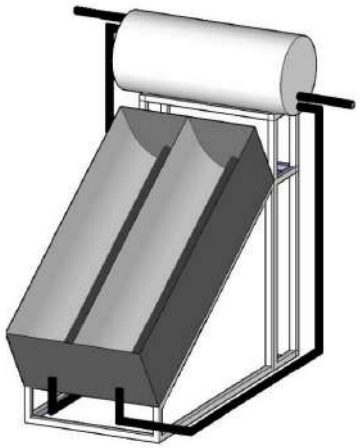


Figura 1. Sistema de calentamiento de agua tipo CPC con termosifón

MATERIALES Y METODOS

En la figura 2 se muestra el esquema del concentrador solar tipo CPC utilizado como dispositivo de calentamiento, el cual se compone por una sección simétrica de parábolas e involutas con altura (H) y un absorbedor tubular de longitud (L_{CPC}).

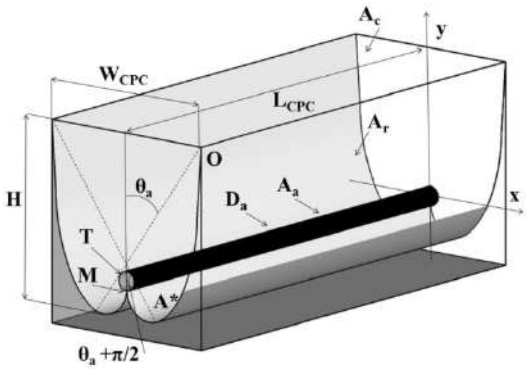


Figura 2. Esquema del concentrador parabólico compuesto con absorbedor tubular.

Las ecuaciones utilizadas para la obtención de la geometría corresponden a las reportadas por Khonkar y Sayigh (1995). De acuerdo con un ancho de cavidad del concentrador (W_{CPC}) y considerando las horas de captación requeridas a lo largo del día, se puede establecer que todos los rayos incidentes en la apertura del concentrador (A_c) serán aprovechados en el área del tubo absorbedor (A_a) de diámetro (D_a).

Por definición (θ_a), se tiene que es el ángulo que permite la máxima concentración alcanzada por el CPC y se obtiene a partir de su eje vertical considerando la trayectoria del rayo solar a través del borde de la parábola (O) pasando por la tangente al tubo absorbedor (T) y recorriendo la distancia restante hacia la parábola (A*). Para cuantificar dicha concentración se utiliza la ecuación (1):

$$C_{CPC} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_a)} \tag{1}$$

Desde el punto de vista óptico, la ecuación característica que describe el proceso de cuantificación de la radiación global atrapada por el absorbedor se describe como: $S = I_g \tau_c \rho_r^n \alpha_a \gamma_1 A_a$, donde ($S$) corresponde a la energía disponible en el tubo absorbedor, (I_g) la energía global incidente, (τ_c) la transmitancia de la cubierta, (ρ_r) reflectancia de la geometría CPC, (α_a) absorbancia del tubo absorbedor y (n) corresponde al número de reflexiones ocurridas en el área reflectiva (A_r) del CPC, (Oommen y Jayaraman, 2001). De acuerdo con Duffie y Beckman (1991) se ha establecido un valor de 0.9 para el factor de intercepción (γ_1).

En el caso del análisis térmico del concentrador se tiene que:

$$Q_u = U_{L/a} A_a (T_a - T_f) \tag{2}$$

$$U_L = \left\{ \frac{1}{h_{tot,c-ext}} + \frac{h_{tot,a-c}^{-1} \left[h_{cond,i}^{-1} + \left(h_{rad,r-c} + h_{tot,a-r} \right)^{-1} \right]}{h_{tot,a-c}^{-1} + h_{cond,i}^{-1} + \left(h_{rad,r-c} + h_{tot,a-r} \right)^{-1}} \right\}^{-1} \tag{3}$$

$$h_{tot,c-ext} = h_{conv,c-amb} + h_{rad,c-sky} \tag{4}$$

$$h_{tot,a-c} = h_{conv,a-c} + h_{rad,a-c} \tag{5}$$

$$h_{tot,a-r} = h_{conv,a-r} + h_{rad,a-r} \tag{6}$$

Donde (Q_u) corresponde a la ganancia de calor útil y está conformada por el coeficiente global de transferencia de calor hacia el absorbedor ($U_{L/a}$), la temperatura del absorbedor (T_a), temperatura del fluido a la salida del CPC (T_f) y el área del tubo absorbedor. Por otro lado, la ecuación (3) establece el coeficiente global de pérdidas térmicas del CPC relacionando los fenómenos de transferencia de calor ocurridos por radiación (rad) convección (conv) y conducción (cond) entre los componentes del concentrador: absorbedor (a), reflector (r) y la cubierta (c). Agrupando dichos fenómenos se tiene que las ecuaciones (4), (5) y (6) corresponden a la sumatoria de coeficientes de transferencia de calor (h_{tot}) como un total de la operación.

En cuanto a la obtención de la temperatura final del agua en el tanque de almacenamiento (T_s^+) se utilizó la ecuación (7) descrita por Duffie y Beckman (1991), donde el primer término corresponde a la ganancia de calor obtenida por el CPC, el segundo a las pérdidas de calor ocurridas en el tanque y el tercer término a la demanda de suministro a la vivienda. Las variables implícitas son T_s, T_R, m, Δ_t, U_T y A_T las cuales corresponden respectivamente a la temperatura inicial del agua en el tanque de almacenamiento, temperatura del agua de reposición, capacidad del tanque, lapso de tiempo, coeficiente global de pérdidas térmicas y área transversal del tanque.

$$T_s^+ = T_s + \frac{\Delta_t}{(mcp)} \{ A_c F_R [S - U_L (T_s - T_{amb})] - U_T A_T (T_s - T_{amb}) - (\dot{m} cp)(T_s - T_R) \} \tag{7}$$

RESULTADOS

Con la finalidad de establecer las dimensiones totales de los concentradores parabólicos compuestos que conforman el sistema de calentamiento de agua solar, se llevó a cabo un análisis geométrico partiendo de un ancho (W_{CPC}) de 0.56 y longitud fija (L_{CPC}) de 1.6 m. Los resultados mostraron que los valores establecidos para el CPC, demandan una altura de colección (H) de 0.623 m, un ángulo de aceptancia truncado (θ_a) de 26.6° y una concentración geométrica (C) de 2.23, alcanzando un área total de colección (A_c) de 1.79 m^2. Seguido a esto, se obtuvo la cantidad de energía aprovechada por el colector (Q_u), así como la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento (T_s^+), partiendo de las variables climatológicas obtenidas de un archivo meteorológico anual típico de la ciudad de Mexicali, considerando un promedio horario para el día representativo de cada mes en estudio.

En la figura 3 se muestra la cantidad de energía térmica promedio producida por el CPC. La mínima alcanzada ocurrió durante el mes de diciembre contemplando el lapso de 11 horas (8:00 a 16:00 horas) con 19.85 MJ, seguido por enero, noviembre y febrero con 20.41, 23.8 y 25.64 MJ. En el caso de la máxima producción se tuvo en el mes de junio con 51.49 MJ, seguido por mayo y julio con 47.78 y 47.28 MJ, meses donde se tiene una radiación solar que oscila entre los 3.1 y 3.3 MJ/m^2.

La figura 4 detalla el comportamiento del CPC de manera horaria para el día típico del mes de diciembre, dejando ver la mínima producción de agua caliente generada durante el día. De acuerdo a esto, a las 13:00 horas el pico de ganancia de calor útil generado por el CPC alcanzó los 3.71 MJ con una temperatura ambiente de 19.18°C a una radiación solar de 1.9 MJ/m^2. La máxima temperatura del agua en el tanque de almacenamiento se obtuvo a las 15:00 horas con 36.04°C con una temperatura ambiente máxima presente de 20.71°C, mientras que la mínima temperatura del agua almacenada fue de 26.51°C con una temperatura ambiente mínima de 12.83°C, partiendo de una temperatura inicial en el tanque de 31°C. Respecto al calor útil producido a lo largo del día se tuvo 19.85 MJ, con una demanda promedio diario de 17.77 MJ y pérdidas térmicas en el tanque de 0.11 MJ. La diferencia ocurrida entre el suministro y la demanda de

energía térmica asciende a 2.08 MJ, lo cual resulta beneficioso para la vivienda logrando cubrir sus necesidades básicas en la temporada más crítica del año en un periodo autónomo de 7 horas (10:00 a las 16:00 horas). Ver tabla 1.

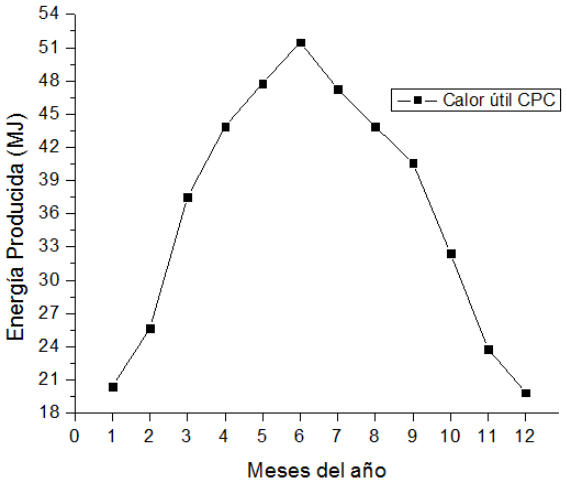


Figura 3. Cantidad de energía diaria mensual almacenada por el sistema de calentamiento solar.

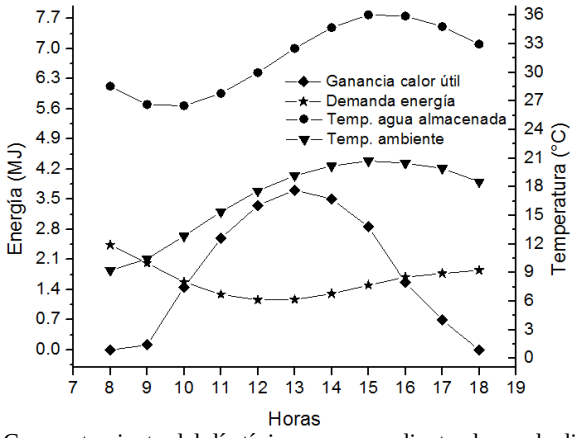


Figura 4. Comportamiento del día típico correspondiente al mes de diciembre.

Tabla 1. Porcentaje de cobertura de la demanda a partir de la ganancia de calor útil. Unidades en MJ.

Tiempo	Diciembre		%	Marzo		%	Junio		%	Septiembre		%
(hr)	Demanda energía	Ganancia calor útil	Cobertura	Demanda energía	Ganancia calor útil	Cobertura	Demanda energía	Ganancia calor útil	Cobertura	Demanda energía	Ganancia calor útil	Cobertura
8:00	2.44	0.00	*0.00*	2.32	0.00	*0.00*	1.83	1.65	*90.11*	1.41	0.53	*37.82*
9:00	2.01	0.11	*5.63*	1.80	1.43	*79.34*	1.48	3.45	*100*	1.03	2.06	*100*
10:00	1.58	1.45	*92.14*	1.47	3.10	*100*	1.40	4.76	*100*	0.81	3.86	*100*
11:00	1.29	2.59	*100*	1.39	4.40	*100*	1.47	6.00	*100*	0.85	5.16	*100*
12:00	1.16	3.35	*100*	1.48	5.35	*100*	1.70	6.33	*100*	1.04	5.86	*100*
13:00	1.17	3.71	*100*	1.68	5.68	*100*	1.95	6.44	*100*	1.31	6.01	*100*
14:00	1.30	3.51	*100*	1.96	5.60	*100*	2.24	6.33	*100*	1.64	5.52	*100*
15:00	1.50	2.86	*100*	2.30	4.56	*100*	2.57	5.80	*100*	1.97	4.46	*100*
16:00	1.69	1.57	*92.53*	2.52	3.88	*100*	2.93	4.82	*100*	2.28	3.81	*100*
17:00	1.77	0.69	*39.09*	2.70	2.54	*94.08*	3.04	3.73	*100*	2.43	2.44	*100*
18:00	1.85	0.00	*0.00*	2.77	0.95	*34.10*	3.20	2.18	*68.31*	2.60	0.86	*33.07*
Σdiaria	***17.77***	***19.85***	*Σdiaria*	***22.41***	***37.49***	*Σdiaria*	***23.79***	***51.49***	*Σdiaria*	***17.34***	***40.57***	

La figura 5 correspondiente a la evaluación realizada para el mes de marzo, es uno de los meses que junto a septiembre representan la ganancia media de energía en todo el año. El pico de ganancia de calor ocurrido alcanzó los 5.68 MJ, con una radiación máxima de 2.9 MJ/m^2 a una temperatura ambiente de 24.3°C, llegando a una ganancia de calor útil producido a lo largo del día de 37.49 MJ, con pérdidas en el tanque de almacenamiento de 0.149 MJ y una demanda promedio diario de 22.41 MJ (ver tabla 1). La máxima temperatura ambiente alcanzada fue de 25.92°C y la máxima temperatura del agua almacenada fue de 51.91°C, partiendo de una temperatura de 35°C. La diferencia ocurrida entre el suministro y la demanda de energía térmica asciende a los 15.08 MJ, valor que permite satisfacer ampliamente las necesidades de la vivienda en un rango aproximado de 9 horas de manera autónoma (9:00 a las 17:00 horas).

De forma similar, en el mes de septiembre (figura 6) se obtuvo un pico de ganancia de calor de 6.00 MJ, con una radiación máxima de 3.0 MJ/m^2 y una temperatura ambiente de 37.91°C, logrando una ganancia de calor útil producido a lo largo del día de 40.57 MJ, con pérdidas en el tanque de 0.110 MJ y una demanda promedio diario de 17.34 MJ. La máxima temperatura ambiente alcanzada fue de 39.66°C y la máxima temperatura del agua almacenada fue de 62.79°C, partiendo de una temperatura de 38°C. La diferencia ocurrida entre el suministro y la demanda de energía térmica asciende a los 23.23 MJ (ver tabla 1).

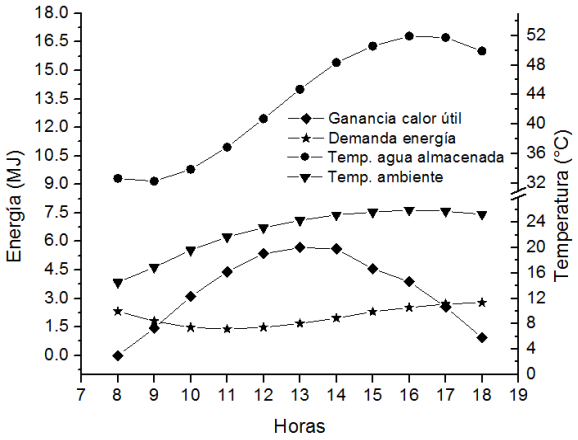


Figura 5. Comportamiento del día típico correspondiente al mes de marzo.

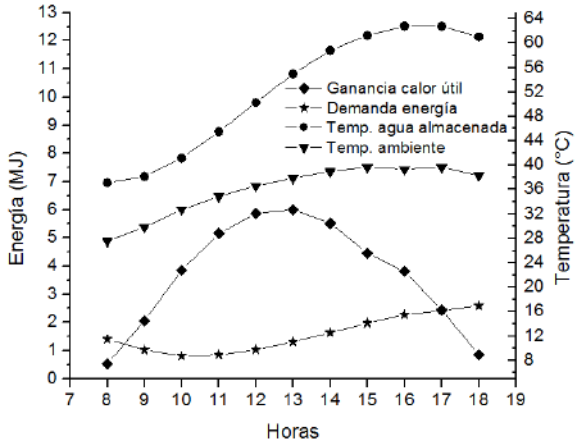


Figura 6. Comportamiento del día típico correspondiente al mes de septiembre.

Por otra parte, en junio, siendo el mes con mayor radiación alcanzó los 3.3 MJ/m^2 a la 1:00 PM, donde se obtuvo un pico de ganancia de calor de 6.43 MJ, con una temperatura ambiente de 35.87°C. La máxima temperatura del agua almacenada fue de 69.48°C y la máxima temperatura del ambiente fue de 38.93°C. Respecto al calor útil producido a lo largo del día se tuvo 51.49 MJ y unas pérdidas térmicas en el tanque de 0.16 MJ (ver tabla 1). Prácticamente para este mes la demanda de calentamiento de la vivienda es nula y se recomienda desconectar el sistema para evitar daños en el sistema hidráulico (ver figura 7).

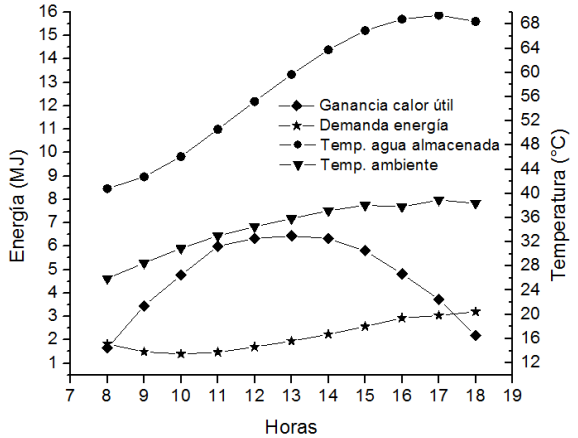


Figura 7. Comportamiento del día típico correspondiente al mes de junio.

En la figura 8 se observa el comportamiento horario de la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento a lo largo del día típico correspondiente a cada uno de los meses seleccionados. Como era de esperarse la máxima temperatura alcanzada se obtuvo en el mes de junio con 69.48°C durante las 17:00 pm, seguido de septiembre con 62.79°C en el mismo horario. En cuanto al mes de marzo la temperatura más alta fue de 51.91°C a las 16:00 pm, mientras que en diciembre fue de 36.04°C a las 15:00 pm. Para cualquier escenario posterior a la máxima temperatura obtenida, la producción de pérdidas térmicas ocurre generando un decremento en la temperatura a lo largo de la noche.

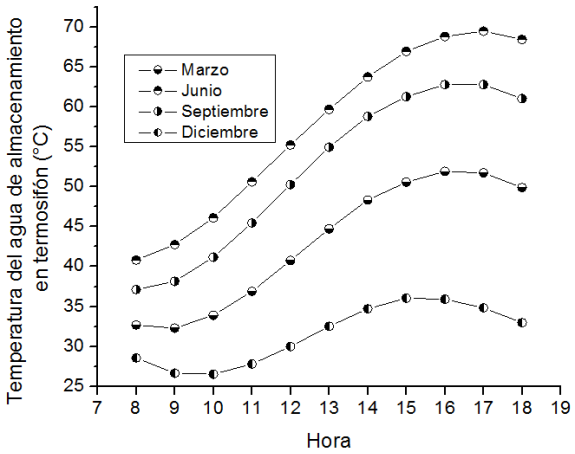


Figura 8. Comportamiento horario de la temperatura en el tanque en distintos puntos del año.

CONCLUSIONES

El uso de un CPC destinado al calentamiento de agua para aplicaciones residenciales bajo el esquema de termosifón se ha visto viable desde el punto de vista técnico para la ciudad de Mexicali. Durante la temporada de invierno (diciembre) cuando la temperatura ambiente alcanza 12.83°C, el sistema propuesto permite cubrir necesidades básicas en un periodo autónomo de 7 horas alcanzando una temperatura máxima de 36.04°C sin necesidad de un sistema auxiliar al emplear un área de captación de 1.79 m^2. En cuanto al mes de marzo, la máxima temperatura del agua almacenada por el sistema fue de 51.91°C, partiendo de una temperatura de 35°C. La diferencia ocurrida entre el suministro y la demanda de energía térmica asciende a los 15.08 MJ, valor que permite satisfacer ampliamente las necesidades de la vivienda en un rango aproximado de 9 horas de manera autónoma. En el caso del mes de septiembre se tuvo que la máxima temperatura de agua en el tanque de almacenamiento fue de 62.79°C en respuesta a un suministro de energía térmica útil de 40.57 MJ, logrando cubrir la demanda de calentamiento por 9.5 horas. En cuanto al mes de junio se tiene que la temperatura ambiente promedio se mantiene elevada en el orden de los 35.87°C, dando como resultado la eliminación de la demanda de calentamiento en la vivienda, ocasionando que el colector en gran parte del verano quede inutilizado y pueda ser destinado a aplicaciones de acondicionamiento de espacios (sistemas de enfriamiento termosolar).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo al Programa de Fortalecimiento de Cuerpos Académicos PRODEP por el apoyo económico a través del proyecto 12864.

REFERENCIAS

Winston, R., (1974). Principles of solar concentrators of a novel design. Solar Energy 16, 89 (1974).

Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes. 3rd Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, inc.

Kalogirou SA., (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30:231–295.

Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. Second edition, John Wiley & Sons, Inc.

Okoronkwo C.A, Nwufo, O.C, Ogueke, N.V, Nwaigwe, K.N, Anyanwu E.E (2014). Evaluation of the Thermal Performance of a Thermo Syphon Water Heating System Using a Compound Parabolic Solar Collector, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol. 4, Issue 3, Sept 2014.

Khonkar, H. E. I. and Sayigh, A. A. M. (1995). Optimization of the tubular absorber using a compound parabolic concentrator, Renewable Energy, 6, 1, pp. 17-21.

Oommen R. y Jayaraman S., (2001). Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses – oversized reflector, Energy Conversion and Management 42, 1379-1399.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES INTERNOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE DESTILACIÓN SOLAR

Sandra Ch. S., Hilario T. P., Arturo L. R., Raymundo L. C.
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 180,
Col. Reynosa Tamaulipas, C. P. 02200, México. D. F., Tel. 5318 9000
scs@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En este trabajo, se realiza un estudio de los coeficientes internos de transferencia de calor en un destilador solar de una vertiente, cuando es operado con salmuera. La estimación se basa en la observación experimental del destilador solar para 4 volúmenes iniciales diferentes (5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L), bajo las condiciones climáticas del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo. Los coeficientes internos a evaluar son: convección, evaporación y radiación mediante el uso del modelo térmico propuesto por Kumar y Tiwari. Como resultados se encontró que el coeficiente interno más representativo en el proceso de destilación solar es el de evaporación ($h_{E,a\text{-}v}$), alcanzando un máximo de 29.4 W/m^2 K, los coeficientes de convección y radiación alcanzaron valores de 2.4 W/m^2 K y 3.7 W/m^2 K respectivamente, también se observó que conforme se incrementa el volumen inicial de salmuera, los coeficientes internos de transferencia de calor disminuyen.

ABSTRACT

In this work, a study of internal heat transfer coefficients is performed in a solar still of a slope, when it operated with brine. The estimate is based on the experimental observation of the solar still for 4 different initial volumes (5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L), under the climatic conditions of the municipality of Ixmiquilpan, Hidalgo. The internal coefficients to evaluate are: convection, evaporation and radiation through the use of the thermal model proposed by Kumar and Tiwari. As a result it was found that the internal coefficient more representative in the process of solar distillation is the evaporation ($h_{E,a\text{-}v}$), Reaching a maximum of 29.4 W/m^2 K, the coefficients of convection and radiation attained values of 2.4 W/m^2 K and 3.7 W/m^2 K respectively, It was also noted that as the initial volume of brine increases, the internal heat transfer coefficients decrease.

Palabras clave: Destilación Solar, Convección, Evaporación, Radiación, Volumen.

INTRODUCCIÓN

La destilación solar es uno de los métodos más antiguos para obtener agua potable a partir de agua salobre o salina mediante la utilización de la energía solar. El comportamiento de un destilador solar se caracteriza por las diferentes transferencias de calor y masa que ocurren en su interior, la absorción de la radiación solar libera vapor de agua, que se eleva a la superficie de cristal o cubierta de vidrio con la ayuda de la transferencia interna de calor por convección que fluye hacia arriba.

La transferencia de calor en el interior del destilador solar de la superficie del agua hacia la cubierta de vidrio donde se produce la condensación, se lleva a cabo por convección, evaporación y radiación, donde la transferencia de calor por convección y evaporación se transporta de forma simultánea y son independientes de la transferencia de calor por radiación. Para analizar el rendimiento del destilador solar, es esencial conocer el valor de estos coeficientes con mayor precisión. Algunas aportaciones de trabajos realizados de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el interior de estos dispositivos a continuación son expuestas. Anil y Tiwari (2006), estudiaron el efecto que tiene la profundidad de agua con los coeficiente de transferencia de masa por evaporación en un sistema de destilación solar pasivo de una pendiente para las condiciones climáticas de verano. Realizaron experimentos para diferentes profundidades de agua de 0.04 m, 0.08 m, 0.12 m, 0.16 m y 0.18 m, con una inclinación de la cubierta de vidrio 30° y encontraron que los coeficientes de transferencia de calor internos depende significativamente de la profundidad del agua. Finalmente encontraron que la mayor productividad y eficiencia se encuentran en la profundidad más baja.

Tripathi y Tiwari (2005), estudiaron los efectos de los coeficientes de transferencia de calor y de masa para un destilador solar activo para diferentes profundidades de agua en el recipiente absorbedor, encontrando que el rendimiento disminuye significativamente con el aumento de la profundidad del agua en el recipiente absorbedor del destilador solar. Realizaron experimentos durante 24 horas, los meses de invierno para las diferentes profundidades de agua de la recipiente absorbedor (0.05, 0.1 y 0.15 m), y encontraron que el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y el interior depende en gran medida de la profundidad del agua. Kumar y Tiwari (2009), realizaron un estudio para estimar los coeficientes de transferencia de calor internos de un destilador solar activo híbrido (PV/T).

Evalúan el destilador solar para las condiciones climáticas de Nueva Delhi (28°35'N 77°12'E). Como resultados obtuvieron los valores medios anuales del coeficiente de transferencia de calor por convección para el destilador solar activo híbrido (PV/T) los cuales son de 0.78 y 2.41 W/m^2 K, respectivamente, para una profundidad de 0.05 m.

Amimul y Teruyuki (2010), proponen un modelo nuevo de transferencia de masa y calor para un destilador solar tubular (TSS), en el cual incorporan diversos coeficientes de transferencia de masa y calor tomando en cuenta las propiedades del aire húmedo dentro del destilador. Con el modelo propuesto lograron calcular las variaciones de la temperatura del agua, la cubierta y el canal, la densidad de vapor de agua, la humedad relativa del aire húmedo y además predice el flujo de condensación y evaporación por hora. La validez del modelo propuesto se verificó utilizando el campo de resultados experimentales llevadas a cabo en Fukui, Japón y Muscat, Omán en 2008, los resultados teóricos y experimentales muestran que el modelo propuesto es aceptable para predecir el flujo de producción diaria y horaria precisa. Zheng et al. (2002), establecen una correlación empírica basada en la analogía de la transferencia de calor y masa en la cuenca de un destilador solar. Para realizar la validación de la correlación, construyen un destilador solar multi-etapa de aluminio con área de la cuenca de 0.665x0.650 m como resultados obtienen que el grupo de correlaciones desarrolladas puede proporcionar mejores predicciones para la tasa de evaporación en destiladores solares, para la amplia gama de número de Rayleigh ($3.5x10^3<Ra<2.26x10^7$), así como la temperatura ($35<T_{fluido}<86°C$).

El objetivo del presente trabajo está dirigido a encontrar la relación del comportamiento térmico de un destilador solar con respecto de los coeficientes internos de transferencia de calor cuando este es operado con salmuera y variando el espesor que ocupa el fluido, para tal fin se establecen balances de energía para observar el comportamiento térmico del dispositivo.

DESARROLLO

Básicamente el destilador solar empleado para llevar a cabo la investigación es de una vertiente, cuenta con un recipiente absorbedor pintado de negro mate con un área de 0.36 m^2, la cubierta transparente que sirve como condensador está hecha de vidrio con un ángulo de inclinación de 40°, además el destilador solar tiene 4 canaletas de vidrio con una inclinación de 5° aproximadamente, en las cuales se recolecta el condensado de cada una de las paredes de la cubierta, en la figura 1 se muestra el destilador solar.

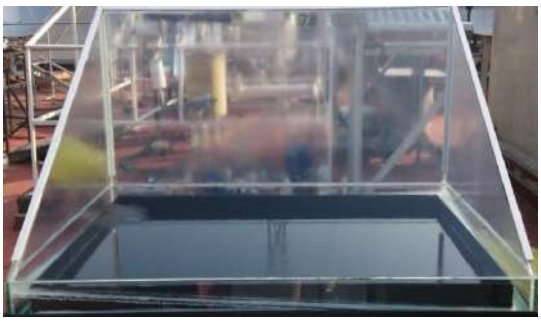


Figura 1. Destilador Solar de una vertiente.

En el dispositivo se realizaron 4 pruebas experimentales cada una con un volumen inicial diferente, los cuales son: 5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L, el fluido de trabajo empleando fue salmuera y fue operado en el municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, donde las condiciones climáticas son muy favorables. Se implementó la instrumentación que permitió obtener datos de temperatura y radiación solar incidente mediante un equipo Compact FieldPoint, termopares tipo K y un piranómetro que sumados a una interfaz en LabVIEW se obtuvieron los datos en el periodo de tiempo 10:00 am a 18:00 pm en intervalos de 10 minutos, considerando que en este periodo de tiempo se tiene la mayor insolación. Para poder efectuar el estudio correspondiente, se colocaron 7 termopares tipo K, principalmente en las paredes internas de la cubierta de vidrio, fluido, recipiente absorbedor y medio ambiente, tal como se muestra en la figura 2.

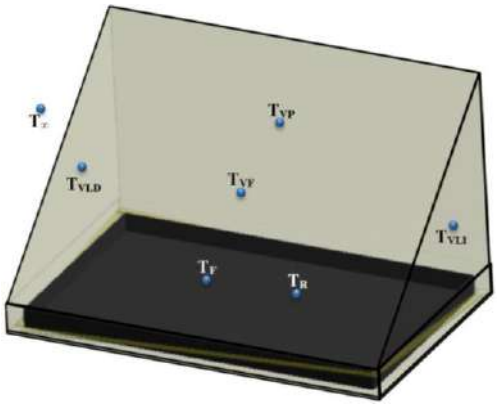


Figura 2. Ubicación de los termopares en el destilador solar.

Donde:

T_{VP} Temperatura interna del vidrio posterior

T_{VLD} Temperatura interna del vidrio lateral de lado derecho

$\mathbf{T_{VF}}$	Temperatura interna del vidrio frontal	$\mathbf{T_{VLI}}$	Temperatura interna del vidrio lateral de lado izquierdo
$\mathbf{T_{CH}}$	Temperatura del recipiente absorbedor (charola)	$\mathbf{T_F}$	Temperatura del fluido
$\mathbf{T_\infty}$	Temperatura del medio ambiente		

El comportamiento del destilador solar se caracteriza por las diferentes transferencias de calor y masa que ocurren en su interior, en la Figura 3, se muestran los fenómenos de transferencia de calor que son involucrados en el proceso de evaporación-condensación. Generalmente la transferencia de calor en sistemas de destilación solar puede ser clasificada en términos de modo interno y externo.

El modo de transferencia de calor externo es principalmente gobernado por los procesos de conducción, convección y radiación y son independientes uno del otro. Esta transferencia de calor ocurre fuera del destilador solar, es decir, de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente exterior. Por otra parte la transferencia de calor dentro del destilador es principalmente radiación, convección y evaporación, en este caso la transferencia de calor por convección ocurre simultáneamente con la transferencia de calor por evaporación, estos dos procesos a su vez son independientes de la transferencia de calor por radiación.

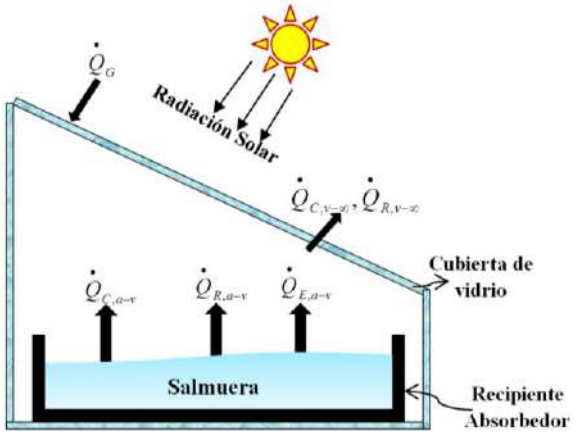


Figura 3. Flujos de calor que intervienen en el proceso de destilación solar.

Donde:

$\dot{Q}_G$	Flujo de radiación solar	[W]	$\dot{Q}_{C,a-v}$	Flujo de calor por convección del agua hacia la cubierta de vidrio	[W]
$\dot{Q}_{C,v-\infty}$	Flujo de calor por convección de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente	[W]	$\dot{Q}_{E,a-v}$	Flujo de calor por evaporación del agua hacia la cubierta de vidrio	[W]
$\dot{Q}_{R,v-\infty}$	Flujo de calor por radiación de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente	[W]	$\dot{Q}_{R,a-v}$	Flujo de calor por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio	[W]

Basándose en lo mencionado anteriormente y en la figura 3, se ha observado que los estudios más aceptables en la transferencia de calor por convección y evaporación en un espacio cerrado se han llevado a cabo por Kumar y Tiwari (2009), debido a que el modelo puede ser utilizado de manera más realista para la más amplia gama de temperatura del agua.

En el interior del destilador solar se produce un movimiento del vapor saturado de agua, debido a la diferencia de temperaturas que se generan, este vapor es conducido por convección natural, la cual es causada por el efecto de flotabilidad y principalmente es debido a la variación de densidad que se genera entre el fluido húmedo y la cubierta de vidrio. Así la tasa de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio, está dado mediante la siguiente expresión, ecuación (1).

$$\dot{Q}_{C,a-v} = h_{C,a-v} A_a \left(T_a - T_v\right) \tag{1}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección del agua hacia la cubierta de vidrio, $h_{C,a-v}$ [W/m^2 K], puede ser determinado por las siguientes relaciones.

$$Nu = \frac{h_{C,a-v}\, d}{k} = C\left(Gr\,\mathrm{Pr}\right)^n \qquad \text{ó} \qquad h_{C,a-v} = \frac{d}{k}\, x\, C\left(Gr\,\mathrm{Pr}\right)^n \tag{2}$$

Donde:

$$Gr = \frac{d^3 \rho^2 g \beta}{\mu^2} \Delta T' \qquad \mathrm{Pr} = \frac{\mu Cp}{k} \qquad \Delta T' = \left[\Delta T + \frac{\left(P_a - P_v\right)\left(T_a + 273\right)}{268.9 x 10^3 - P_a}\right]$$

Los números adimensionales de Nusselt [*Nu*], Grashoft [*Gr*] y Prandtl: [*Pr*] deben ser evaluados mediante las propiedades físicas del aire húmedo, *d* es la distancia entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio en [m], *g* es la aceleración de la gravedad 9.798 [m/s^2], ΔT es la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta (T_a-T_v), [K], P_a, es la presión de vapor del agua a la temperatura del fluido

[N/m^2], P_v, es la presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio [N/m^2]. Los valores de P_a y P_v, pueden ser obtenidas de la expresión obtenida por Fernández y Chargoy (1990), las cuales son empleadas para el rango de temperaturas de 10ºC–90ºC.

$$P(T) = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273}\right) \tag{3}$$

La tasa de transferencia de calor por evaporación de la superficie del agua hacia la superficie interna de la cubierta de vidrio, puede ser obtenida por la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{E,a-v} = h_{C,a-v} A_a (P_a - P_v) \tag{4}$$

El coeficiente de transferencia de calor por evaporación del agua hacia la cubierta de vidrio, $h_{E,a-v}$ [W/m^2 K], puede ser determinado como:

$$h_{E,a-v} = 16.273x10^{-3} h_{C,a-v} \frac{P_a - P_v}{T_a - T_v} \tag{5}$$

Al combinar la Ec. (2) y (5), se obtiene la siguiente expresión:

$$h_{E,a-v} = 0.01623 \frac{k}{d} C(Gr\,\mathrm{Pr})^n \left[\frac{P_a - P_v}{T_a - T_v}\right] \tag{6}$$

Debido a que el agua radia calor hacia el vidrio, y considerando que la superficie de agua y la cubierta de vidrio son planas y paralelas, la tasa de transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta de vidrio, está dada por:

$$\dot{Q}_{R,a-v} = A_a h_{R,a-v} (T_a - T_v) \tag{7}$$

Siendo, $h_{R,a-v}$, [W/m^2 K], el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta de vidrio y está dado por:

$$h_{R,a-v} = \left(\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{-1} \sigma\left[(T_a + 273)^2 + (T_v + 273)^2\right](T_a + T_v + 546) \tag{8}$$

Donde:

ε_a	Coeficiente de emisividad adimensional del agua.	ε_v	Coeficiente de emisividad adimensional del vidrio.
σ	Constante de Stefan Boltzmann, 5.67× 10^{-8}, [W/m^2 K^4].	T_a	Temperatura del fluido, [K].
T_v	Temperatura de la cubierta de vidrio, [K].	A_a	Área que ocupa el fluido, [m^2].

RESULTADOS

Mediante la experimentación en el destilador solar empleando salmuera, se lograron obtener las temperaturas y la radiación solar, en las figuras 4 a 7, se muestra la distribución de la temperatura para el recipiente absorbedor, fluido, superficie interna de la cubierta de vidrio y la radiación solar incidente.

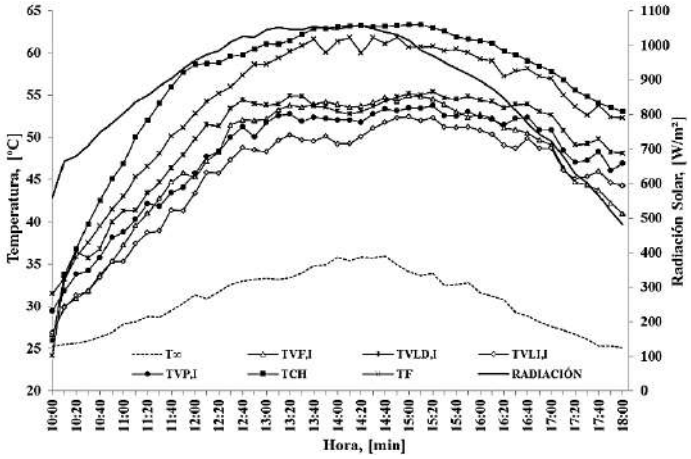


Figura 4. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 5.5 L de salmuera.

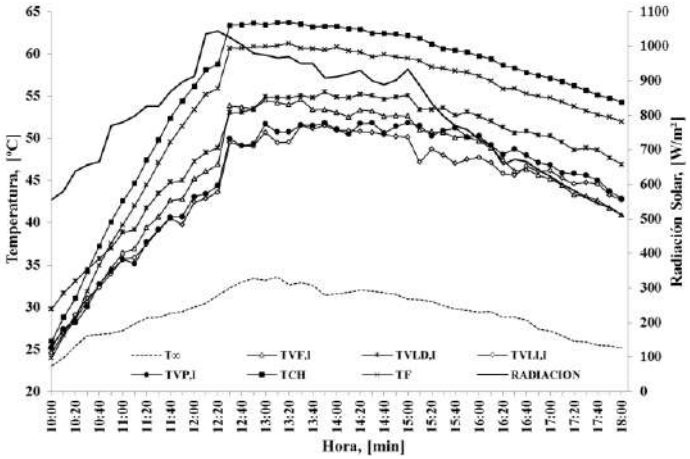


Figura 5. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 6.5 L de salmuera.

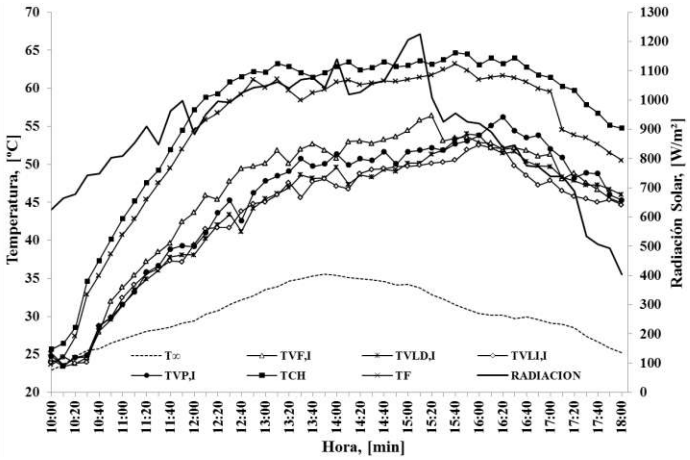


Figura 6. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 7.5 L de salmuera.

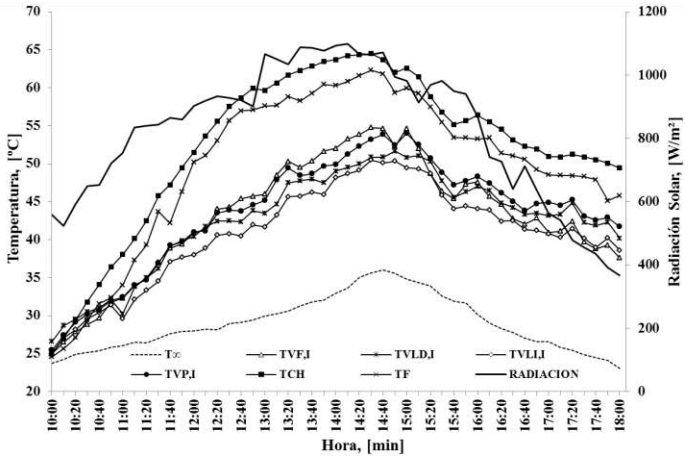


Figura 7. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 8.5 L de salmuera.

Los datos obtenidos de temperatura y radiación fueron procesados para el cálculo correspondiente de los coeficientes internos de transferencia de calor. En las figuras 8 a 10, se muestra la distribución de los coeficientes de transferencia de calor por convección, evaporación y radiación para cada una de las pruebas.

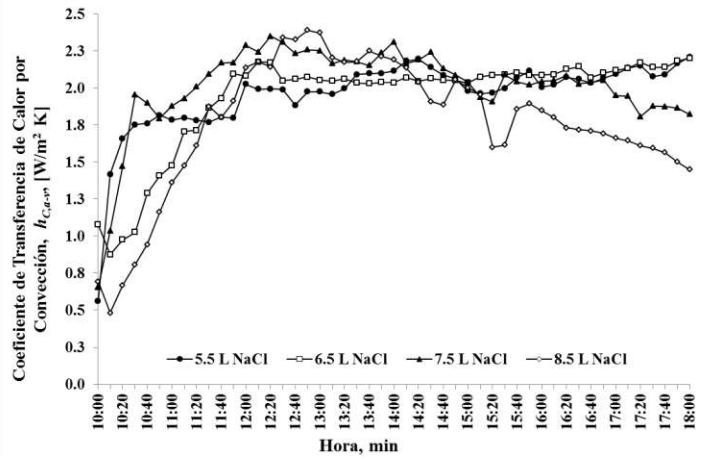


Figura 8. Coeficientes de transferencia de calor por convección para 5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L de salmuera con respecto del tiempo.

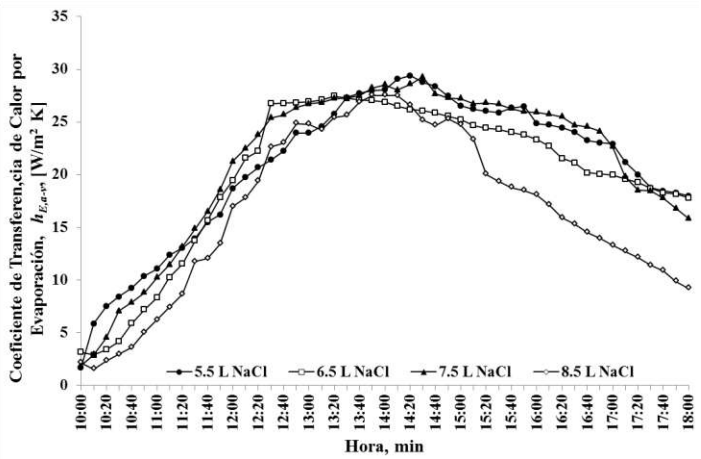


Figura 9. Coeficientes de transferencia de calor por evaporación para 5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L de salmuera con respecto del tiempo.

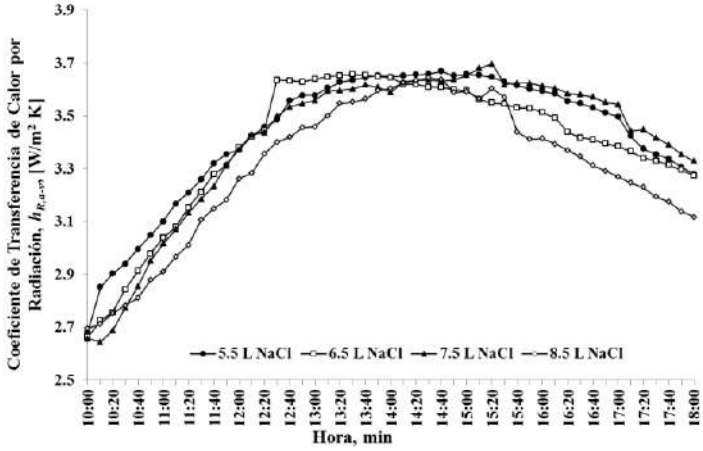


Figura. 10. Coeficientes de transferencia de calor por radiación para 5.5, 6.5, 7.5 y 8.5 L de salmuera con respecto del tiempo.

En las figuras 4 a 7, se visualiza que la distribución de la temperatura y radiación solar se va incrementando con el paso del tiempo, alcanzando sus valores máximos a partir de las 12:30 pm hasta las 15:30 pm, después de este tiempo el valor de las temperaturas y radiación van disminuyendo. Se tiene que en el recipiente absorbedor se registraron los valores más altos de temperatura siendo estos de 63.4°C a 65 °C, posteriormente el fluido con valores máximos de 63.4 °C a 64.7 °C y finalmente la superficie interna de la cubierta de vidrio logro valores de 53.6 °C a 56.4 °C. Como se puede observar en cada una de las figuras el comportamiento de las temperaturas es muy similar al de la radiación solar, debido a que esta sufre alteraciones por nubosidad, polvo, etc., de tal forma que las temperaturas se ven afectadas ante este hecho.

Por otra parte, con la ayuda de las ecuaciones antes expuestas y el registro de temperaturas, se logra calcular los coeficientes internos de transferencia de calor por convección, evaporación y radiación para cada una de las pruebas experimentales, en las figura 8 se visualiza el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección, teniéndose que para 5.5 L , 6.5 L, 7.5 L y 8.5 L de salmuera se adquieren valores mínimos de 0.6, 0.9, 0.7 y 0.5 W/m^2 K, y los valores máximos adquiridos son 2.2, 2.2, 2.3 y 2.4 W/m^2 K respectivamente, seguidamente, se tienen los coeficiente de transferencia de calor por evaporación en la figura 9, obteniendo los valores más altos de 29.4, 27.5, 29.3 y 27.5 W/m^2 K, para 5.5 L , 6.5 L, 7.5 L y 8.5 L respectivamente, sin embargo para los coeficientes de transferencia de calor por radiación se alcanzaron valores máximos de 3.6 W/m^2 K, para todas las pruebas. Se observa un incremento de los tres coeficientes de transferencia de calor conforme transcurre el tiempo, después de las 15:00 hrs, van disminuyendo, de la misma manera que la radiación solar, los coeficientes sufren variaciones al paso del tiempo debido a que estos dependen de la temperatura del fluido y de la superficie interna de la cubierta de vidrio, las cuales dependen de la radiación solar y los parámetro climáticos que se presentan cada día de experimentación.

CONCLUSIONES

El estudio de la variación de los coeficientes internos de transferencia de calor en un destilador solar, empleando el modelo de Kumar y Tiwari, para diferentes volúmenes iniciales de salmuera, permite establecer que el coeficiente interno que predomina es el de evaporación $h_{E,a\text{-}v}$, alcanzando valores desde 1.5 hasta 29.4 W/m^2 K, seguido del coeficientes de radiación $h_{R,a\text{-}v}$, y últimamente convección $h_{C,a\text{-}v}$, los cuales alcanzan valores de 0.5 hasta 3.7 W/m^2 K siendo estos menos relevantes. De acuerdo con los resultados, los coeficientes dependen significativamente de la profundidad del agua, es decir, conforme se incrementa el volumen inicial los coeficientes disminuyen y en consecuencia el rendimiento del destilador solar se ve afectado. Se concluye que si la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie interna del vidrio se incrementa, el coeficiente por evaporación aumentara desempeñando un papel importante en la optimización del rendimiento, así como en el coeficiente por convección y finalmente en la transferencia de masa, los cuales son los parámetros más importantes en el proceso de destilación solar.

REFERENCIAS

Anil Kr and Tiwari G. N. (2006). Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition, Desalination, Vol. 195, p. 78–94.

Tripathi R and Tiwari G. N. (2005). Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation, Desalination, Vol. 173, p. 187-200.

Kumar S and Tiwari G.N. (2009). Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still, Solar Energy, Vol. 83, p. 1656–1667.

Amimul A and Teruyuki F. (2010). Mass and heat transfer model of Tubular Solar Still, Solar Energy. Vol. 84, p. 1147–1156.

Zheng H. Zhang X. Zhang J. Wu Y. (2002). A group of improved heat and mass transfer correlations in solar stills, Energy Conversion and Management. Vol. 43, p. 2469–2478.

Fernandez J. and Chargoy N. (1990). Multistage, Indirectly Heated solar Still, Solar Energy, Vol. 44, p. 215.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA PRODUCTIVIDAD DE AGUA EN UN DESTILADOR SOLAR

Sandra Ch. S., Hilario T. P., Arturo L. R., Raymundo L. C.
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C. P. 02200, México. D. F., Tel. 5318 9000
scs@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En este trabajo, se presenta la evaluación de 3 pruebas experimentales en un destilador solar, aplicando 5, 6 y 7 L de agua de rio. Se obtuvieron datos de temperaturas en diferentes partes del dispositivo, radiación solar y además se midió el volumen de salida cada 5 minutos durante un intervalo de tiempo de 10:00 am a 18:00 pm, el cual es comparado mediante un estudio de transferencia de masa, analizando la transferencia de calor por evaporación, la cual ayuda a predecir la salida del volumen destilado.

Los resultados experimentales muestran que se destilan 2.08, 1.9, 1.6 L para el volumen inicial de 5, 6 y 7 L respectivamente, sin embargo al aplicar el modelo térmico el volumen que se destilaría es 2.2, 2 y 1.7 L, para el volumen inicial de 5, 6 y 7 L, respectivamente.

Este estudio indica que el modelo térmico empleado tiene un 6% de error aproximadamente comparado con lo experimental, sin embargo puede ser empleado para estimar de manera precisa el volumen de salida de destilado.

ABSTRACT

In this paper, evaluation of 3 experimental evidence is presented in a solar distiller, applying 5, 6 and 7 L water river. were obtained in different parts of the device temperature data, solar radiation and also the output volume was measured every 5 minutes during a time interval from 10 a.m. to 6 p.m., which is compared by a transfer study mass analyzing heat transfer by evaporation, which helps to predict the output of the distillate volume. Experimental results show that distill 2.08, 1.9, 1.6 L to the initial volume of 5, 6 and 7 L respectively, however when applying the thermal model the volume to distill is 2.2, 2 and 1.7 L for the initial volume 5, 6 and 7 L, respectively.

This study indicates that thermal model used has a 6% error compared to approximately experimental, but can be used to accurately estimate the output volume of distillate.

Palabras clave: Destilación Solar, Productividad, Evaporación, Radiación, Transferencia de masa.

INTRODUCCIÓN

Los procesos térmicos para la destilación del agua de mar, son conocidos por ser una de las primeras tecnologías adaptadas para aprovechar la energía solar. La evaporación del agua salina se lleva a cabo mediante el uso de la energía térmica y su posterior condensación para la producción de agua dulce, desde hace varios siglos prácticamente se ha aplicado para simular la humidificación y deshumidificación del aire atmosférico durante el ciclo hidrológico. Sin embargo, las consideraciones graves para el empleo de aplicaciones de destilación solar en varias regiones del mundo comenzaron hace casi seis décadas, lo que llevó a los primeros esfuerzos sistemáticos hacia la descripción precisa de los fenómenos de transporte que están relacionados entre sí durante el proceso de destilación solar, presentando una formulación matemática completa y modelos teóricos que son fundamentales para la predicción de los procesos de transferencia de calor y masa en los destiladores solares. A continuación se muestran algunas aportaciones de este tópico.

Tiwari et al. (2003). Introdujeron el concepto de fraccionamiento solar, así como la investigación de la transferencia de calor y masa que ocurren en destiladores solares pasivos y activos y la relación que guardan con la profundidad de salmuera. También han sido investigado por Tripathy y Tiwari (2006), encontraron los coeficientes de transferencia de calor por convección para un sistema de destilación solar activa, realizaron experimentos durante 24 horas en los meses de invierno para diferentes profundidades de agua en la cuenca, tales como: 0.05, 0.1 y 0.15 m, para las cuales estudiaron el efecto de la profundidad de agua y los coeficientes de transferencia de calor y masa. Como resultado encuentran que el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta interior de condensación depende en gran medida de la profundidad del agua en la cuenca. También observan que el destilador solar obtiene un mayor rendimiento durante las horas de asoleamiento en comparación con el día para mayores profundidades de agua en (0.10 m y 0.15 m) debido al efecto de almacenamiento de la energía. Tsilingiris (2011), presenta una investigación sobre la validación de la teoría existente en los procesos internos de transferencia de calor y masa en destilación solar, la validación es mediante mediciones experimentales en un destilador solar pasivo y el modelo básico desarrollado originalmente por Dunkle, la validación tuvo éxito, encontrando que el número adimensional *Ra* modificado hasta aproximadamente $6x10^6$, determina la transferencia de calor y masa en los procesos destilación solar.

Farshad et al (2010), diseñaron un destilador solar tipo cascada para la purificación del agua con el fin de mejorar la productividad diaria, estudiaron la influencia de la tasa de flujo de calor en el agua, la transferencia de masa interna y la productividad diaria del destilador solar. Emplearon la relación de Dunkle debido a su amplia aplicación en la literatura para predecir el comportamiento del destilador. Los resultados mostraron una disminución en las tasas de transferencia interna de calor y masa, así como la productividad diaria con un aumento en la tasa de flujo de agua. En este sentido, encontraron que la productividad diaria es de 7.4 y 4.3 kg/día m^2, para velocidades de flujo mínimo y máximo, respectivamente. El objetivo del presente trabajo está dirigido a la comprobación de resultados teóricos y experimentales de la cantidad de destilado que se se obtiene mediante pruebas experimentales en un destilador solar cada 5 minutos, el cual es comparado mediante un estudio de transferencia de masa, analizando la transferencia de calor por evaporación, la cual ayuda a predecir la salida del volumen destilado.

DESARROLLO

El abastecimiento de agua contribuye de varias e importantes maneras al desarrollo económico y social de un país. Es una necesidad básica para: uso doméstico, en la industria, en la agricultura, en la construcción y para contribuir a un ambiente sano, así la destilación solar aprovecha la radiación solar para llevar a cabo el proceso de separación de una mezcla homogénea para su purificación y su posterior utilización. El funcionamiento de un destilador solar a continuación se describe: El agua salada o no potable es colocada en la charola o también conocida como recipiente absorbedor, situada en el fondo, donde se calienta por la absorción de la radiación solar; la charola debe estar pintada de negro mate para facilitar el proceso, ya que el agua es prácticamente transparente para las radiaciones de onda corta procedentes del sol. Conforme aumenta la temperatura, el agua comienza a evaporarse, con el fin de minimizar la pérdida de calor del vapor de agua, la charola de agua deberá estar rodeada con aislante de calor al fondo y en los lados. Además la charola se encuentra dentro de una caja que va tapada con una cubierta de vidrio transparente. El aire húmedo que esta más caliente, asciende hasta la cubierta transparente que se encuentra más fría, posteriormente parte del vapor de agua se condensa, deslizándose hacia abajo y cae en el canal destinado para recoger el agua dejando la sal y otros minerales (no evaporables a baja temperatura) en la charola. Este proceso ocurre continuamente mientras el destilador esté recibiendo energía solar. El agua destilada se recoge en recipientes que son colocados fuera del destilador.

El destilador solar empleado está construido de puro vidrio, consiste en un recipiente cerrado con una cubierta transparente de vidrio con un ángulo de inclinación de 40º, el cual permite el paso de la radiación solar. En el interior de la zona del destilador se encuentra un recipiente absorbedor con una área de 0.36 m^2, a su vez se tienen 4 canaletas unidas al recipiente absorbedor para recolectar mediante probetas que se encuentran por debajo del destilador, el condensado que se genera en las 4 paredes de la cubierta de vidrio, tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Destilador solar.

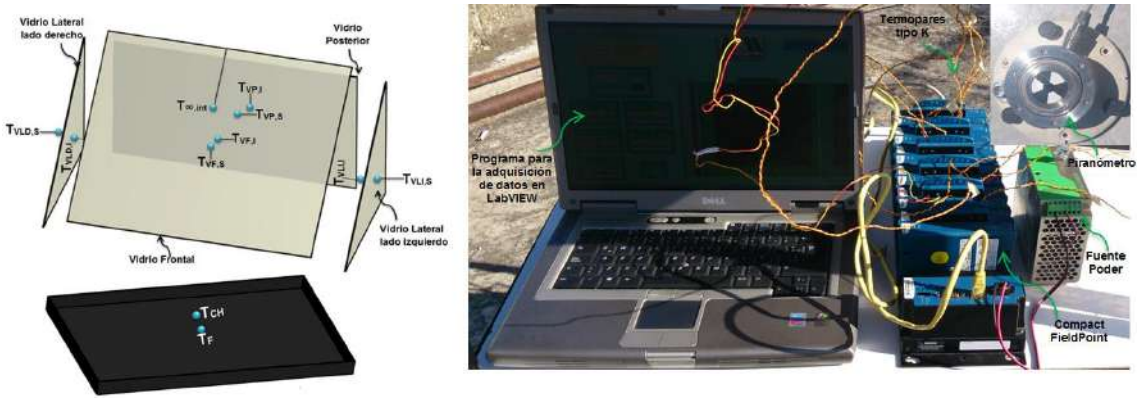


Figura 2. Instrumentación completa del destilador solar y ubicación de los termopares.

En él se realizaron 3 pruebas experimentales, empleando 5, 6 y 7 L de agua de rio, para cada una de ellas se obtuvieron datos de temperatura implementando termopares tipo K y la radiación solar incidente con un piranómetro Eppley. La instrumentación empleada

para la obtención de las temperaturas, fue mediante un equipo Compact FieldPoint que sumado a una interface en LabView, se logran registrar dichas temperaturas y la radiación solar cada 5 minutos durante un intervalo de tiempo de 10:00 am a 18:00 pm, debido a que en este periodo de tiempo se tiene mayor insolación. Las temperaturas registradas fueron básicamente en el fluido, recipiente absorbedor y cubierta de vidrio. En la figura 2, se muestra la instrumentación completa del destilador solar y la ubicación de los termopares

Una vez realizada la instrumentación, y la obtención de los datos de temperatura y radiación, se procede a realizar el estudio y análisis de la transferencia de masa para el proceso de destilación solar.

Existen numerosas relaciones empíricas de transferencia de calor y masa que permiten predecir la salida del destilado por hora y día para los diferentes diseños de unidades destiladores solares, la mayor parte del desarrollo de estas relaciones están basadas en estudios de simulación. Dunkle (1961) formuló una relación semi-empírica de la transferencia calor interno y de masa en destiladores solares, propuso para el numero adimensional de Nusselt, los valores de las constantes C= 0.075 y n=1/3, establecidos en la simulación, para números de Grasshoft Gr>3.2xl0^5. Sin embargo, esta relación tiene las siguientes limitaciones. (i) Sólo es válido para un rango de temperatura media de funcionamiento de ≈60°C. (ii) El volumen de la charola es independiente, es decir, la distancia media entre la superficie de condensación y la de evaporación. (iii) El calor fluye hacia arriba en posición horizontal en el espacio cerrado de aire. Asi en este trabajo se emplea el modelo propuesto por Dunkle, debido a que ha sido el más aceptable para el estudio de la trasferencia de calor y masa.

La transferencia de calor se produce a través del aire húmedo dentro de la unidad de destilación, principalmente es mediante convección libre que es causada por la acción de la fuerza de flotación provocada por la variación de densidad en el aire húmedo, dicha variación de densidad es originada por un gradiente de temperatura en el fluido y la superficie interna de la cubierta de vidrio. Por lo tanto, la tasa de transferencia de calor desde la superficie del agua a la cubierta de vidrio por convección puede ser estimada por:

$$\dot{Q}_{C,a-v} = h_{C,a-v}\left(T_a - T_v\right) \tag{1}$$

Donde, $h_{C,a-v}$, se encuentra de la relación.

$$Nu = \frac{h_{C,a-v}\, d}{k} = C\left(Gr\,\mathrm{Pr}\right)^n \tag{2}$$

Donde:

$$Gr = \frac{d^3 \rho^2 g \beta}{\mu^2} \Delta T' \tag{3}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu Cp}{k} \tag{4}$$

y

$$\Delta T' = \left[\left(T_a - T_v\right) + \frac{\left(P_a - P_v\right)\left(T_a + 273\right)}{268.9x10^3 - P_a}\right] \tag{5}$$

Los números adimensionales de Nusselt [Nu], Grashoft [Gr] y Prandtl: [Pr] deben ser evaluados mediante las propiedades físicas del aire húmedo, d es la distancia entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio en [m], g es la aceleración de la gravedad 9.798 [m/s^2], $\Delta T'$ es la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta (T_a-T_v), [K], P_a, es la presión de vapor del agua a la temperatura del fluido [N/m^2], P_v, es la presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio [N/m^2]. Los valores de P_a y P_v, pueden ser obtenidas de la expresión obtenida por Fernández y Chargoy (1990), las cuales son empleadas para el rango de temperaturas de 10ºC–90ºC.

En la ecuación (2) se observa que el valor de $h_{C,a-v}$, depende de los valores de dos constantes, es decir, C y n. En la tabla 1, se muestran los diferentes valores de C y n para una gama particular del Número de Grashof, siempre y cuando se trabaje con flujos de calor por convección en espacios cerrados horizontales con aire.

Tabla 1. Valores del número de Grashof.

Gr	***C***	***n***
$Gr<10^3$	0.21	1/4
$10^4<Gr<3.2x10^5$	0.21	1/4
$3.2x10^5<Gr<10^7$	0.075	1/3

Por lo tanto, hay una necesidad de modificar los valores de C y n en la ecuación (2). La modificación de los valores de C y n se llevan a cabo mediante análisis de regresión, utilizando el flujo másico de salida del destilado experimental ($\dot{M}_a$), la temperatura del agua de (T_a) y la temperatura del vidrio (T_v).

Ahora bien el destilado, depende en gran medida de la tasa de transferencia de calor por evaporación, el cual está dado mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{E,a-v} = 0.016273 h_{C,a-v}\left(P_a - P_v\right) \tag{6}$$

Usando la ecuación (2) en (6), puede ser reescrita como: $\dot{Q}_{E,a-v} = 0.016273\left(P_a - P_v\right)\cdot\frac{k}{d}\cdot C\left(Ra\right)^n$ (7)

Donde: *Ra* es el número adimensional de Raleigh, el cual se determina mediante la siguiente expresión $Ra = Gr\cdot \mathrm{Pr}$

El flujo másico de salida del destilado, puede ser determinado mediante la ecuación (8)

$$\dot{M}_a = \frac{\dot{Q}_{E,a-v}\times 3600}{L} \tag{8}$$

La cual puede ser reescrita usando la ecuación (7) en (8).

$$\dot{M}_a = 0.016273\left(P_a - P_v\right)\cdot\frac{k}{d}\cdot\frac{3600}{L}\cdot C\left(Ra\right)^n \tag{9}$$

Las ecuaciones antes mostradas son empleadas para comprobar los resultados teóricos y los que se obtuvieron experimentalmente para cantidad de destilado.

RESULTADOS

En base a la instrumentación que se llevó a cabo en el destilador solar empleando como fluido agua de río, se tiene el registro de datos de temperatura y radiación solar, en la figura 2, se muestra la ubicación de los termopares, sin embargo se obtuvo un promedio de las temperaturas internas y externas de la cubierta de vidrio para realizar los cálculos pertinentes. En las figuras 3 a 5, se muestra la distribución de la temperatura y radiación para el destilador.

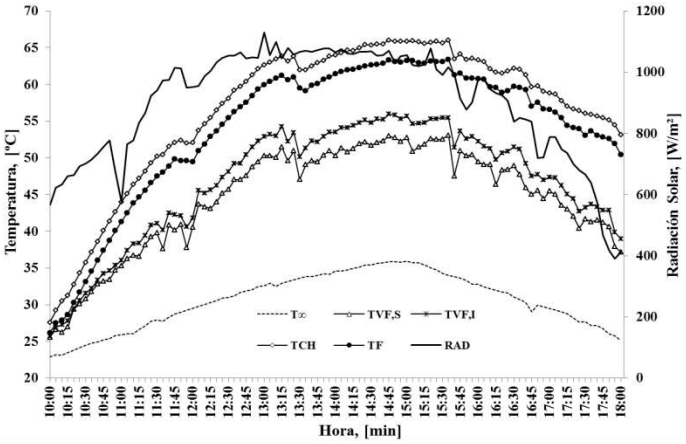


Figura 3. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 5 L de agua de río.

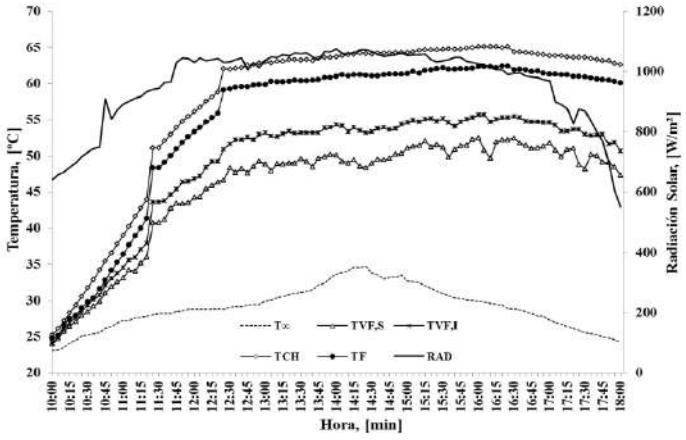


Figura 4. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 6 L de agua de río.

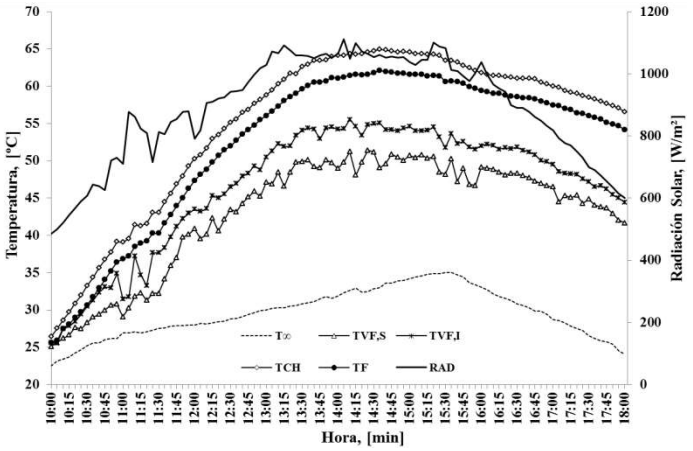


Figura 5. Distribución de temperatura para la prueba experimental con 6 L de agua de río.

Aplicando las ecuaciones (1) a (9) y los datos correspondientes de temperatura para cada una de las pruebas, se muestra la variación de la salida de destilado teórico y experimental en las figuras 6 a 8.

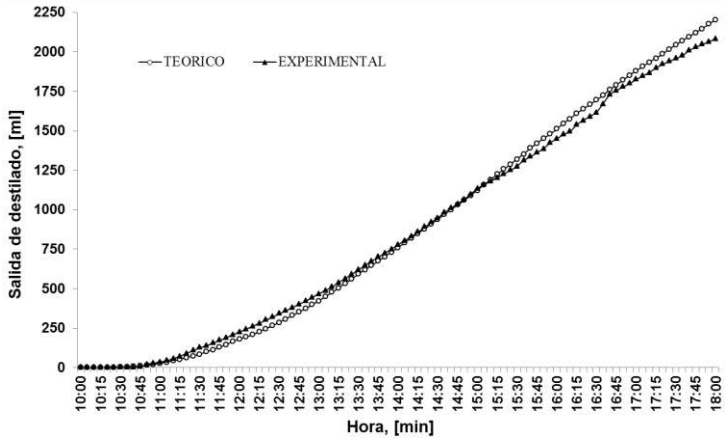


Figura 6. Variación de la salida de destilado teórico y experimental para 5 L de agua de rio.

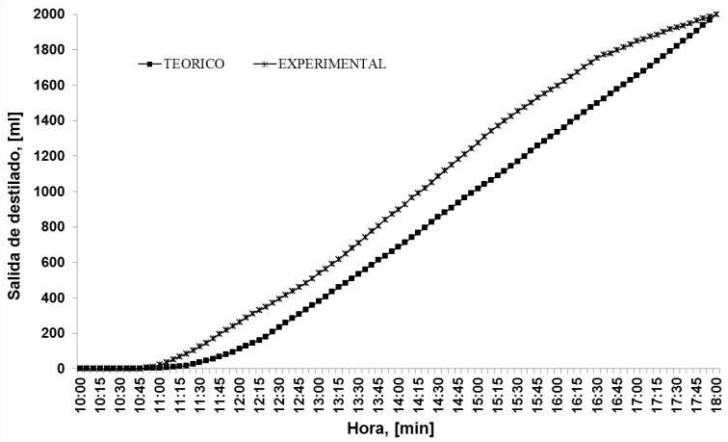


Figura 7. Variación de la salida de destilado teórico y experimental para 6 L de agua de rio.

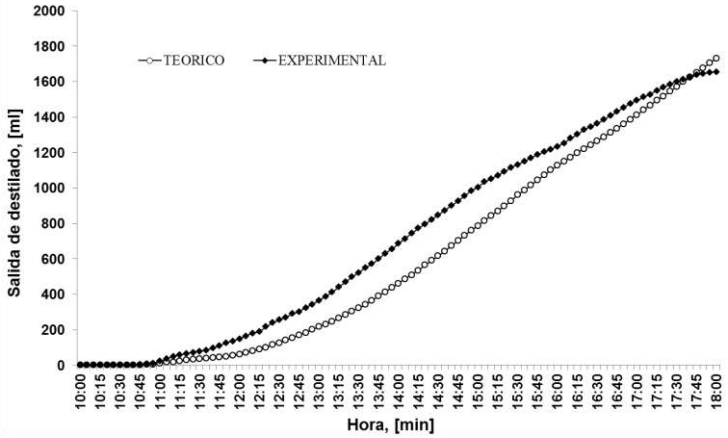


Figura 8. Variación de la salida de destilado teórico y experimental para 7 L de agua de rio.

En las figuras 3 a 5, se visualiza que la distribución de la temperatura y radiación solar se va incrementando con el paso del tiempo, alcanzando sus valores máximos a partir de las 13:0 pm hasta las 16:00 pm, después de este tiempo el valor de las temperaturas y radiación van disminuyendo. Como se puede observar en cada una de las figuras el comportamiento de las temperaturas es muy similar al de la radiación solar, debido a que esta sufre alteraciones por nubosidad, polvo, etc., de tal forma que las temperaturas se ven afectadas ante este hecho. Se observa la relación que guarda la intensidad de la radiación solar con el volumen de destilado, teniéndose que para el intervalo de tiempo de 10:00 -11:00 a.m., la radiación es muy baja, y se observa en las figuras 6, 7 y 8 que no hay presencia de un volumen de destilado, es decir, después de 60 min el destilador comienza a generar destilado. En la figura 6, se observa que para 5 L de agua de rio se comienzan a destilar 8 ml experimentalmente mientras que teóricamente solo se destilarían 6 ml, cuando se tiene la mayor insolación solar el destilado experimental anda del orden de 26-39 ml y el teórico en 22-35 ml, consecutivamente en la figura 7 se observa que para 6 L de agua de rio se comienzan a destilar 6 ml experimentalmente y teóricamente solo se destilarían 2 ml, para la mayor insolación solar el destilado experimental es de aproximadamente 22-36 ml y el teórico en18-29 ml, finalmente para 7 L de agua de rio , se comienzan a destilar experimentalmente 4 ml mientras que teóricamente solo 1.5 ml, para la mayor insolación, el destilado experimental es de 20-30 ml y el teórico en 12-26 ml. Las figuras 6, 7 y 8 representan un acuerdo razonable, entre el destilado de salida experimental y teórico, donde los resultados se han logrado dentro de una precisión del 6% aproximadamente.

CONCLUSIONES

Se valida el modelo de Dunkle para evaluar con precisión el rendimiento de los destiladores solares tanto teórico como experimentalmente, de acuerdo con los resultados experimentales se destilan 2.08, 1.9, 1.6 L y teóricamente se destilarían 2.2, 2 y 1.7 L, para el volumen inicial de 5, 6 y 7 L, respectivamente, por lo que el modelo térmico empleado tiene un 6% de error aproximadamente comparado con lo experimental.

Para la configuración diseñada en el destilador solar empleado, la máxima destilación se obtiene para el volumen de 5 L donde el equipo es capaz de destilar el 41.6% de su volumen inicial, al incrementar el volumen inicial, la productividad del dispositivo comienza a disminuir debido a que se requiere más energía para que se produzca la evaporación y posterior condensación.

Por otra parte, al trabajar con agua de rio se logra evaluar el alcance del potencial de aplicación de los destiladores solares para condiciones diferentes donde se requieran fuentes de energía de bajo costo en los procesos térmicos. Con esta técnica se puede ahorrar en el consumo de energía eléctrica, se disminuyen los costos del proceso destilación de agua y se reduce la contaminación ambiental mediante el descenso de emisión de sustancias nocivas por el uso de combustibles fósiles en la obtención de agua destilada, además una de las orientaciones de aplicación de los resultados de este trabajo, está vinculado hacía comunidades rurales, como contribución a la solución de la problemática de la escases de agua potable.

REFERENCIAS

Duffie J. A. and Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Process. Wiley Interscience, New York, USA.

Dunkle R. V. (1961). Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. In Int. Development in Heat Transfer, ASME, Proe. Int. Heat Transfer, Part V, University of Colorado, pp. 895-902

Farshad F.T. Mohammad D. Hamid M. Kiyanoosh R. (2010), Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still, Desalination, Vol. 260, p. 239–247.

Fernandez J. and Chargoy N. (1990). Multistage, Indirectly Heated solar Still, Solar Energy, Vol. 44, p. 215.

Tiwari G.N. Shukla S.K. Singth I.P. (2003). Computer modelling of passive/active solar stills by using inner glass temperature, Desalination, Vol. 154, p. 171–185.

Tiwari G. N. (2002). Solar Energy, Fundamentals, Design, Modelling and Applications. Alpha Science, New Delhi,

Tripathi R. and Tiwari G.N. (2005). Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation, Desalination, Vol. 173, p. 187-200.

Tsilingiris P.T. (2011), Prediction and measurement of mass transport in experimental solar stills, Solar Energy, Vol. 85, p. 2561–2570.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO EXERGÉTICO PARA EL PROCESO DE DESTILACIÓN DE $MgCl_2$

Sandra Ch. S., Hilario T. P., Arturo L. R., Raymundo L. C.
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C. P. 02200, México. D. F., Tel. 5318 9000
scs@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis exergético para el proceso de destilación solar de solución de $MgCl_2$. El destilador solar empelado es de tipo caseta y se experimenta para 3 espesores diferentes de fluido que son: 1.5, 2 y 2.5 cm, para los cuales se registran datos de temperatura y radiación solar. Posteriormente se establece un balance de energía en las partes principales del destilador tales como: cubierta de vidrio, recipiente absorbedor y fluido. Los resultados muestran que la eficiencia exergética en el destilador solar para los espesores de 1.5, 2 y 2.5 cm son de 9.5 %, 9.3% y 9.1% respectivamente. Los bajos valores de eficiencia por la segunda ley de la termodinámica muestran un bajo rendimiento, sin embargo, esta eficiencia indica cuanta de la energía proveniente del Sol es aprovechada realmente para llevar a cabo el proceso de destilación solar.

ABSTRACT

In this work an exergetic analysis for solar distillation process $MgCl_2$ solution is presented. The solar still used is experience shed type and three different thicknesses for fluid are 1.5, 2 and 2.5 cm, for which temperature data and solar radiation are recorded. Subsequently an energy balance is set the main parts of the distiller such as: cover glass, container absorber and fluid. The results show that exergy efficiency in the solar distiller for thicknesses of 1.5, 2 and 2.5 cm are 9.5%, 9.3% and 9.1% respectively. The low efficiency values by the second law of thermodynamics show low performance; however, this efficiency indicates how much of the energy from the sun is actually used to carry out the process of solar distillation.

Palabras clave: Destilación Solar, Evaporación, Radiación, Transferencia de Calor, Eficiencia, Exergia.

INTRODUCCIÓN

La destilación de agua y mezclas binarias a través de la utilización de fuentes renovables de energía, tal como la energía solar es un tema cada vez más estudiado y aplicado en muchos países. Experiencias realizadas en todo el mundo demuestran la gran importancia y utilidad de este método de destilación, además de su facilidad de utilización. Sin duda alguna, es más que evidente la necesidad de implementar nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento de la energía disponible, como lo es en éste caso la radiación solar. Los equipos utilizados para este tipo de proceso son los denominados destiladores solares, en los cuales su principal estudio se basa en el análisis del diseño de estructuras que logren resultados de destilación convenientes para su posterior aplicación en diversas áreas. Muchos tipos de destiladores solares han sido construidos y utilizados por parte de numerosos investigadores, sin embargo en el campo de la energía solar, se han realizado estudios sobre balances de energía en destiladores solares para observar el comportamiento térmico de estos dispositivos, mediante un sistema de ecuaciones se ha podido conocer valores de la temperatura en la cubierta de vidrio, el agua a destilar y la bandeja del destilador, así como también se puede determinar el volumen de agua destilada. Algunos trabajos a continuación son mostrados. Ansari et al. (2010), utilizaron un destilador solar pasivo con materiales de cambio de fase para almacenar energía, formulan y resuelven numéricamente las ecuaciones de balance de energía para los distintos elementos del destilador así como para los materiales de cambio de fase, para las condiciones meteorológicas tomadas el 15 de junio 2011 en la ciudad de Errachidia, Marruecos. Por otra parte Shatat y Mahkamov (2010), describen los parámetros de diseño de una desalinizadora de agua de varias etapas, conectada a un colector solar con una área de apertura de 1.7 m^2. Así mismo el destilador solar multi-etapa fue diseñado con el propósito de recuperar el calor latente de los procesos de evaporación y condensación en cuatro etapas, simularon la variación en la radiación solar durante un día típico de verano en la región del Oriente Medio, utilizando una matriz de 110 focos de halógeno que cubría el área del colector. Como resultados de sus pruebas obtienen que el sistema produce cerca de 9 kg de agua fresca por día y el colector solar tiene una eficiencia cerca del 68%. Sin embargo, la eficiencia global de las pruebas en el laboratorio en esta etapa de las investigaciones fue del 33%, esta eficiencia tan baja se debe a las pérdidas de calor excesivo en el sistema. Finalmente el análisis del agua destilada mostró que su calidad estaba dentro de las directrices de la Organización Mundial de la Salud.

Basel (2009), diseñó y fabricó un destilador solar hemisférico simple, para el cual evaluó su desempeño experimentalmente bajo condiciones climáticas exteriores de Dhahran, Arabia Saudita y encontró que durante las horas de pruebas experimentales, el agua destilada varió desde 2.8 hasta 5.7 L/m^2 día. La eficiencia promedio diaria del destilador llegó hasta el 33% y también encontró que la eficiencia media del destilador disminuyó en un 8% cuando la profundidad del agua salina se incrementa en 50%.

Referente a trabajos de análisis de exergía en destilación solar, se tiene el trabajo presentado por Torchia et al. (2008), realizaron un análisis teórico exergético en estado estacionario y transitorio de un destilador solar, se centraron en el estudio de la destrucción de exergía en los componentes del destilador, tales como: placa colectora, salmuera y cubierta de vidrio, resuelven los balances de energía para encontrar las temperaturas de cada componente y a su vez estas temperaturas son utilizadas para calcular la energía y los flujos de exergía. Los resultados muestran la eficiencia de exergía del destilador 12.9%, 6% y 5%, para el colector, la salmuera y el destilador solar. Por otra parte Ranjan y Kaushik (2013), recopilaron información para realizar una análisis de exergía basado en correlaciones de transferencia de calor y modelos matemáticos para un destilador solar, encontraron que la eficiencia energética y la productividad del destilador solar se encuentra en el rango de 20-46% y menos de 6 L/m^2 día, respectivamente. Estimaron que la eficiencia exergética se encuentra entre el 9-26% para un sistema de triple efecto, 17-20% para un sistema de doble efecto, y menos del 5% para un sistema de un solo efecto. La productividad aumenta significativamente por el uso de destiladores solares integrados con una mejor eficiencia. La eficiencia energética y la eficiencia de exergía de los sistemas integrados se eleva hasta en un 62% y 8.5%, respectivamente. Tiwari et al. (2009), presentan un estudio paramétrico de los destiladores solares pasivos y activos integrados con un colector de placa plana. Realizaron un balance de energía y exergía para cada uno de los sistemas (pasivo y activo) y encontraron que a medida de que el número de colectores y la profundidad del agua, aumenta el rendimiento térmico disminuye, mientras que la eficiencia de exergía tiene un cambio muy insignificante en comparación con el cambio en la eficiencia térmica. Zoori et al. (2013), presentaron un estudio teórico y experimental de las eficiencias de energía y exergía de un destilador solar tipo cascada, emplean la ecuación de conservación de la energía y exergía para la cubierta de vidrio, salmuera y la placa de absorción, además desarrollaron un paquete de simulación por computadora para analizar los efectos de la energía y exergía, también investigaron las eficiencias de energía y exergía para diversos parámetros tales como el flujo de entrada de salmuera, el espesor del agua sobre la placa de absorción, la intensidad de la radiación solar, la temperatura ambiente y la temperatura a la entrada de salmuera. Los resultados de la simulación son similares a los resultados experimentales. El análisis de datos revelo que las eficiencias máximas de energía y exergía son del 83.3% y 10.5% respectivamente y se cumplen cuando la salmuera en la entrada alcanza un flujo mínimo de 0.065 kg/min. Además una comparación entre eficiencia de energía y exergía en términos de datos experimentales y computacionales para un flujo mínimo y máximo en la entrada de salmuera fueron de 7.34% y 3.8% para la eficiencia de exergía y, 6.11% y 4.25% para la eficiencia de energía. Además el análisis de irreversibilidad para diferentes partes del destilador en un día especifico, revelo que el 84.17% de toda la irreversibilidad del sistema, fue producido por la placa de absorción.

DESARROLLO

El cloruro de magnesio, $MgCl_2$ es un compuesto mineral iónico a base de cloro, cargado negativamente, y magnesio, cargado positivamente. Cuando se calienta, puede experimentar una hidrólisis parcial. El $MgCl_2$ tiene una alta solubilidad en agua, la cual es 2,350 g/L (20 ºC), en este trabajo se emplea $MgCl_2$ disuelto en agua desionizada, con la finalidad de separar los cristales de $MgCl_2$ y poder obtener agua pura mediante destilación solar. Para ellos se utiliza un destilador solar de una vertiente, también conocido como caseta el cual es el diseño más sencillo que se encuentra en la literatura especializada en este tópico. El destilador solar cuenta con una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor y con un ángulo de inclinación de 40º, la cual busca atenuar los efectos convectivos del viento, lo que se refleja como una disminución en las pérdidas de calor. En su interior se encuentra un recipiente absorbedor (charola), pintado de negro mate con una área de 0.36 m^2, donde se deposita el fluido a destilar (solución de $MgCl_2$), a su vez este recipiente es colocado en un soporte de vidrio con un espesor de 6 mm, este destilador cuenta con canaletas de vidrio que se encuentran en cada uno de los lados del recipiente, para poder recolectar el agua destilada. El destilador solar utilizado se muestra en la Figura 1.

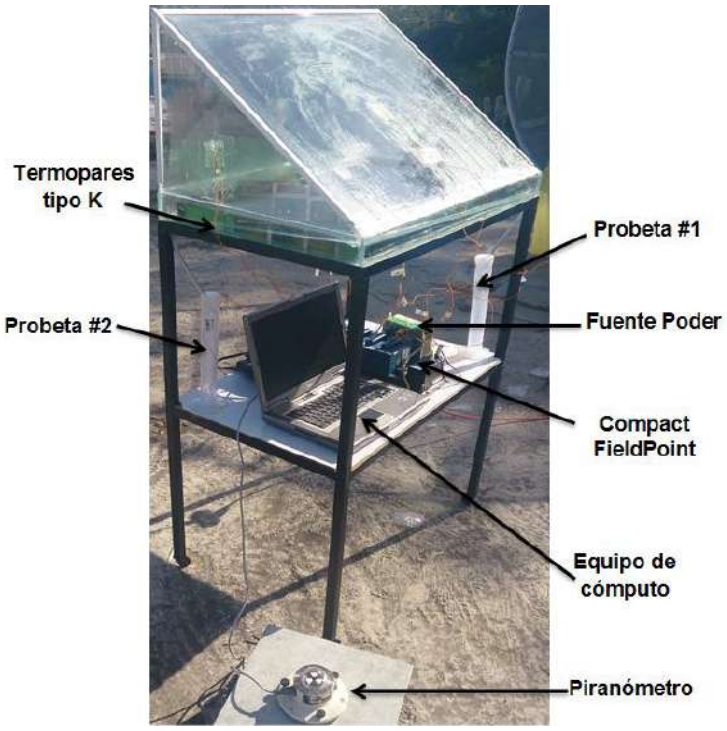


Figura 1. Destilador solar y equipo de instrumentación.

En él se realizaron 3 pruebas experimentales, empleando 1.5, 2 y 2.5 cm de espesor de solución de $MgCl_2$, para cada prueba se adquirieron datos de temperatura con el uso de termopares tipo K y la radiación solar incidente con un piranómetro Eppley. La instrumentación empleada para la obtención de las temperaturas, fue mediante un equipo Compact FieldPoint que sumado a una interface en LabView, (figura 1), se logran registrar dichas temperaturas y la radiación solar cada 10 minutos durante un intervalo de tiempo de 10:00 am a 18:00 pm, debido a que en este periodo de tiempo se tiene mayor insolación. Las temperaturas registradas fueron básicamente en el fluido, recipiente absorbedor y cubierta de vidrio. Una vez realizada la instrumentación, y la obtención de los datos de temperatura y radiación, se procede a realizar el estudio y análisis de la eficiencia exergética en el proceso de destilación de $MgCl_2$. El balance de exergía se analiza para diferentes partes del sistema tales como: (a) Fluido, (b) Cubierta de vidrio, (c) Recipiente absorbedor, para los cuales se obtienen un conjunto de ecuaciones que únicamente dependen de la temperatura. El método de exergía es una técnica de análisis, la cual se aplica para conocer la calidad de la energía con la que se está llevando a cabo un proceso. La calidad de la energía es un sinónimo de su capacidad para causar un cambio, esta calidad depende de la forma de la energía, sus parámetros y los del ambiente. El análisis exergético emplea los principios de conservación de la masa y la energía junto con el segundo principio de la Termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos, es decir la primera ley de la termodinámica, se refiere únicamente a la conservación de energía, pero no proporciona información de la cantidad de energía que se degrada durante el proceso o funcionamiento de un sistema, por ello el método de exergía es una técnica de análisis, la cual se aplica para conocer la calidad de la energía con la que se está llevando a cabo un proceso.

Así la cantidad de exergía que recibe la cubierta de vidrio es la proveniente del Sol y del fluido y es igual a la pérdida de exergía de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente, la destrucción de exergía de la cubierta de vidrio, y la exergía acumulada en la cubierta de vidrio, tal como se muestra en la figura 2 y Ec. (1).

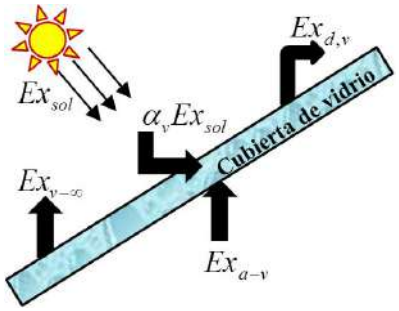


Figura 2. Flujos de exergía que ocurren en la cubierta de vidrio.

$$Ex_{d,v} = \alpha_v Ex_{sol} + Ex_{a-v} - Ex_{v-\infty} \tag{1}$$

Donde: $\alpha_v Ex_{sol}$ es la cantidad de exergía solar absorbida por la cubierta de vidrio, Ex_{a-v}, es la suma de exergía asociada a los intercambios de calor entre la superficie del agua y la superficie interna de la cubierta de vidrio, $Ex_{v-\infty}$, representa las pérdidas de exergía de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente por los procesos del intercambio de calor de radiación y convección. Las pérdidas de exergía de la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente, pueden ser obtenidas mediante la siguiente expresión:

$$Ex_{v-\infty} = h_{T,v-\infty} A_v \left(T_v - T_\infty\right)\left(1 - \frac{T_\infty + 273}{T_v + 273}\right) \tag{2}$$

Donde $h_{T,v-\infty}$, es el coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta de vidrio y el medio ambiente, el cual está dado por:

$$h_{T,v-\infty} = h_{C,v-\infty} + h_{R,v-\infty} \tag{3}$$

El cálculo de exergía proveniente del Sol y de evaporación se determina mediante la Ec. (4) y (5).

$$Ex_{sol} = A_v G(t)\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_\infty + 273}{6000}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_a + 273}{6000}\right)\right] \tag{4}$$

$$Ex_{a-v} = h_{E,a-v} A_a \left(T_a - T_v\right)\left(1 - \frac{T_\infty + 273}{T_a + 273}\right) \tag{5}$$

Por otra parte la cantidad de exergía recibida por el agua es la proveniente del Sol y del recipiente absorbedor y es igual a la exergía por evaporación del fluido a la cubierta de vidrio, la destrucción de exergía del fluido, y la exergía acumulada dentro del fluido, tal y como se muestra en la figura 3 y en la Ec. (6).

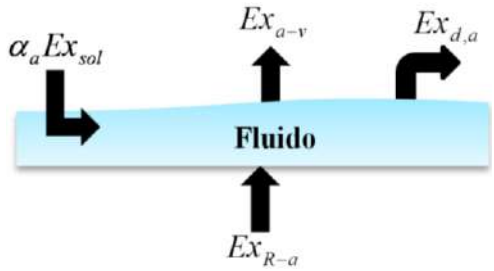


Figura 3. Flujos de exergía que ocurren en el agua a destilar.

$$Ex_{d,a} = \alpha_a Ex_{sol} + Ex_{R-a} - Ex_{a-v} - Ex_a \tag{6}$$

Donde: $\alpha_a Ex_{sol}$, es la cantidad de la exergía solar absorbida en el agua, Ex_{R-a}, es la exergía útil transferida de la charola (recipiente absorbedor) al agua, Ex_a, representa la exergía acumulada en el fluido. Así, la exergía que recibe fluido proveniente del recipiente absorbedor puede ser calculado mediante la Ec. (7).

$$Ex_{R-a} = h_{C,R-a} A_R \left(T_R - T_a\right)\left(1 - \frac{T_\infty + 273}{T_R + 273}\right) \tag{7}$$

La cantidad de exergía recibida por el recipiente absorbedor es proveniente del Sol y es igual a la destrucción de exergía del recipiente absorbedor, la transferencia de exergía del recipiente absorbedor hacia el fluido, la pérdida de exergía del recipiente absorbedor hacia el medio ambiente, y la exergía acumulada dentro del recipiente absorbedor, tal como se muestra en la figura 4 y la Ec. (8).

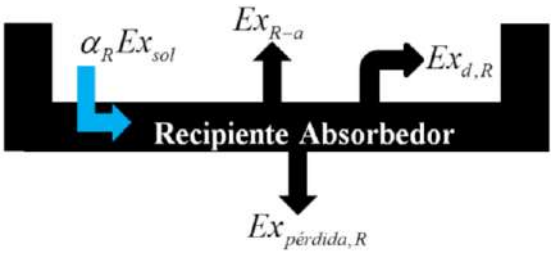


Figura 4. Flujos de exergía que ocurren en el recipiente absorbedor.

$$Ex_{d,R} = \alpha_R Ex_{sol} - Ex_{R-a} - Ex_{pérdida,R} \tag{8}$$

Donde: $\alpha_R Ex_{sol}$, es la parte de la exergía solar absorbida en el recipiente absorbedor, $Ex_{pérdida,R}$, es la pérdida de exergía del recipiente absorbedor hacia el medio ambiente.

La eficiencia exergética de los destiladores solares se define como la relación de salida/entrada de exergía en el destilador solar, la cual se expresa mediante la Ec. (9).

$$\eta_{II} = \frac{Ex_{salida}}{Ex_{entrada}} = \frac{Ex_{a-v}}{Ex_{sol}} \tag{9}$$

Al sustituir las Ecs. (4) y (5), la eficiencia exergética puede ser escrita como:

$$\eta_{II} = \frac{h_{E,a-v} A_a \left(T_a - T_v\right)}{A_v G(t)} \frac{\left(1 - \frac{T_\infty + 273}{T_a + 273}\right)}{\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_\infty + 273}{6000}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_a + 273}{6000}\right)\right]} \tag{10}$$

RESULTADOS

En base a la instrumentación que se llevó a cabo en el destilador solar empleando como fluido $MgCl_2$ y aplicando las ecuaciones (1) a (10) y los datos correspondientes de temperatura para cada una de las pruebas, se muestra la variación de la eficiencia exergética con respecto del tiempo para 1.5, 2 y 2.5 cm de espesor de solución de $MgCl_2$.

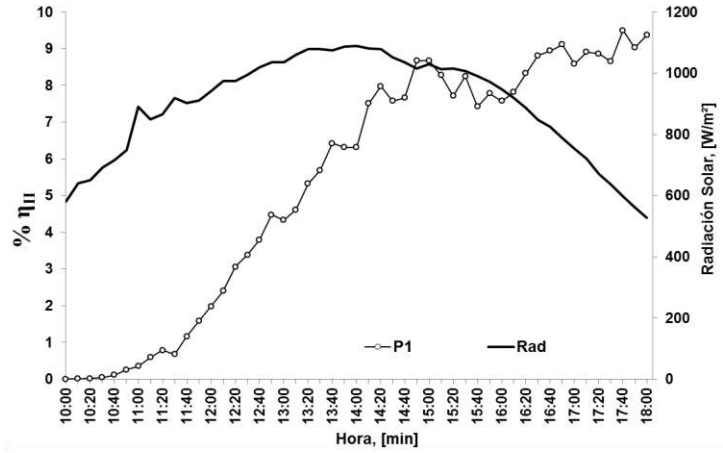


Figura 5. % de Eficiencia Exergética para la profundidad de 1.5 cm de solución de $MgCl_2$.

Figura 6. % de Eficiencia Exergética para la profundidad de 2 cm de solución de $MgCl_2$.

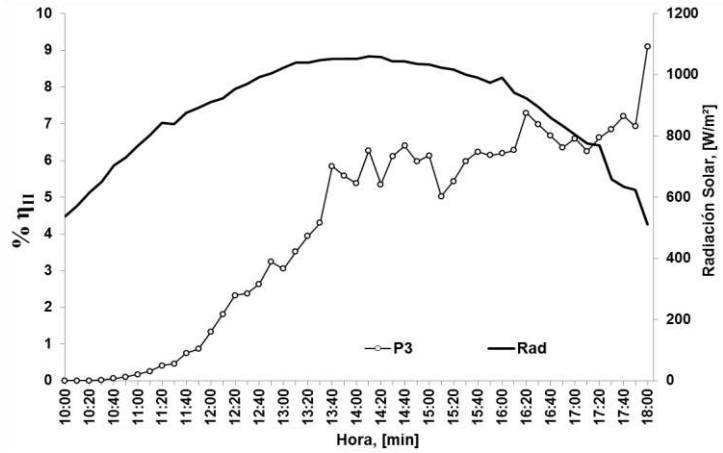


Figura 7. % de Eficiencia Exergética para la profundidad de 2.5 cm de solución de $MgCl_2$.

El análisis exergético en el destilador solar permite cuantificar la calidad de la energía con la cual se está llevando a cabo el proceso de evaporación-condensación, aunque cierto es, el análisis de exergía en un sistema es la entrega máxima de trabajo posible cuando se presenta un proceso reversible del estado inicial al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto, de tal forma que la exergía puede ser

transferido debido a trabajo, masa y transferencia de calor. Mediante el uso de los datos experimentales para cada una de las pruebas, se realiza un balance de energía para los componentes del destilador solar (cubierta de vidrio, fluido, recipiente absorbedor), el cual únicamente proporciona información de la cantidad de energía que es aprovechada en el sistema, sin embargo el análisis de exergía es un instrumento poderoso, principalmente en el diseño, optimización y evaluación del funcionamiento de los dispositivos solares cuyo funcionamiento va depender de las variables termodinámicas.

De acuerdo al análisis y a los resultados obtenidos, la eficiencia exergética es mucho más pequeña comparada con los resultados energéticos de otros trabajos en destilación solar, alcanzando un valor máximo en eficiencia exergética de 9.5% para la prueba realizada con un espesor inicial de 1.5 cm de solución de $MgCl_2$, para 2 cm de espesor se alcanza un máximo de 9.3% y finalmente para 2.5 cm se obtiene un máximo de 9.1%, dichos valores máximos son alcanzados entre 17:40 a 18:00 pm, debido a que la energía se almacena en el interior del destilador solar, el resto de la energía es destruida, sin embargo el incremento en el volumen inicial no produce cambios significativos en dichos valores para el proceso de destilación solar con solución de $MgCl_2$. En las figuras 5 a 7, se visualiza el comportamiento de la eficiencia exergética para cada una de las pruebas, donde se observan alteraciones e incrementos de la misma conforme va transcurriendo el tiempo, básicamente esto ocurre debido a que el flujo de radiación solar que incidió en el dispositivo no es constante afectando así a la temperatura del fluido, recipiente absorbedor y cubierta de vidrio, además de que la eficiencia exergética comienza a tomar valores después de una hora de operación que es el tiempo que tarda el equipo en comenzar a destilar. Se observa también que a partir de las 13:00 pm la eficiencia exergética toma valores en el rango de 3-7%.

CONCLUSIONES

Los valores de las eficiencias exergética (segunda ley de la termodinámica) en los destiladores solares son bastantes bajas en comparación con las eficiencias energéticas (primera ley de la termodinámica), alcanzando valores máximos de 9.1% -9.5%. Para incrementar el valor de la eficiencia exergética, el valor de la temperatura del fluido deberá de incrementarse, así los flujos de calor que se aprovechan son mayores y por consiguiente la eficiencia incrementa y la cantidad de destilado aumentaría. Cuando se habla de valores bajos en eficiencias, se piensa que el sistema tiene un rendimiento bajo, sin embargo la eficiencia únicamente es un indicativo de que tan bien opera un dispositivo bajo ciertos recursos mas no que no sea capaz de realizar el proceso que en este caso es la separación de sustancias. La eficiencia exergética presenta valores muy pequeños con los cual se ratifica el concepto de que el valor exergético del agua destilada obtenida radica fundamentalmente en el uso de la misma y no es su potencia energética. Así el análisis de exergía para el destilador solar representa la calidad de la energía que está contenida en este. Es decir indica cuanta de la energía proveniente del Sol es aprovechada en el sistema. Con este estudio se obtuvieron resultados importantes en el campo de la energía solar ya que no existen suficientes análisis de segunda ley en destilación solar, esto indica, que algunos estudios se limitan al empleo de la primera ley de la termodinámica para el análisis de los sistemas solares.

REFERENCIAS

Ansari O. Asbik M. Bah A. Arbaoui A. Khmou A. (2013). Desalination of the brackish water using a passive solar still with a heat energy storage system. Desalination. Vol. 324, p. 10–20.

Basel I. I. (2009). Design and performance of a transportable hemispherical solar still. Renewable Energy. Vol. 34, p. 145–150.

Ranjan K. R. Kaushik S. C. (2013). Energy, exergy and thermo-economic analysis of solar distillation systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 27, p. 709–723.

Shatat M. I. M. and Mahkamov K. (2010). Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modeling. Renewable Energy. Vol 35, p. 52-61.

Torchia-Nuñez J. C. Porta-Gándara M. A. Cervantes-de Gortari J. G. (2008). Exergy analysis of a passive solar still. Renewable Energy. Vol. 33, p. 608–616.

Zoori H. A. Tabrizi F. F. Sarhaddi F. Heshmatnezhad F. (2013). Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. Desalination. Vol. 325, p. 113–121.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE UN SECADOR SOLAR DE ALIMENTOS PARA EL CENTRO PARA LA SUSTENTABILIDAD INCALLI IXCAHUICOPA

Francisco J. Altamirano García y Mireya Ruiz Amelio
Departamento de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
Av. San Rafael Atlixco No. 186. Col Vicentina, Iztapalapa, 09340, México, D.F.
Tels. 58044600 Fax 58044900, e-mail:"Paco Altamirano" <paco.balam.akab@gmail.com>

RESUMEN

En Tlalmanalco, Edo. de México, parte de la población se dedica a cultivar y cosechar frutas, hortalizas, hierbas medicinales y en particular hongos, tanto para consumo propio como para la venta. Se pretende motivar a la comunidad del Centro para la Sustentabilidad Incalli Ixcahuicopa (Centli), a utilizar fuentes de energía amigables con el ambiente a través de la deshidratación solar de los productos naturales recolectados, con la finalidad de almacenarlos para su consumo posterior en tiempos de escasez o para que adquieran un valor agregado en el mercado. Se construyó un secador de tipo indirecto con dos configuraciones diferentes de los tubos que suministran el aire caliente del colector a la cámara de secado. El secador se instaló en la azotea de un edificio de la Universidad Autónoma Metropolitana para caracterizarlo y posteriormente trasladarlo a Tlalmanalco. Se muestran las curvas de distribución de temperatura del colector y de la cámara de secado con y sin producto a secar para ambas configuraciones. También se presentan las curvas de secado. Se observan mediante termografías los gradientes de temperatura en el producto durante el proceso de secado. Se realiza una simulación en tres dimensiones de la distribución de temperaturas dentro del colector solar y de los tubos que proporcionan el aire caliente a la cámara de secado mediante el programa COMSOL.

ABSTRACT

In Tlalmanalco, State of Mexico, part of the population is engaged in growing and harvesting fruits, vegetables, medical herb, and especially Mushroom, both for household consumption and for sale. It is intended to motivate the community's Center for Sustainability Incalli Ixcahuicopa (Centli) to use energy sources environmental friendly through the solar drying of natural products harvested, in order to store them for later consumption in times of scarcity or to acquire an added value in the market. An indirect solar dryer was built. It has two different configurations of the pipes that supply hot air from flat solar collector to the drying chamber. The dryer was installed on the roof of a building of the Autonomous Metropolitan University to characterize and subsequently move to Tlalmanalco. We show the temperature distribution curves of the collector and drying chamber with and without product to dry for both configurations. The moisture content curves are also presented. We observed by thermography temperature gradients in the product during drying process. A simulation in three dimensions of the temperature gradients in the flat collector and the pipes that supply hot air to drying chamber is performed by COMSOL program.

Palabras claves: secado solar, deshidratación, secador tipo indirecto, cámara de secado, preservación de productos agrícolas, convección natural, termografía, simulación de la distribución de temperaturas.

INTRODUCCIÓN

La energía solar representa una alternativa viable para suministrar energía no contaminante para diversos procesos térmicos como es el secado de una gran variedad de productos agrícolas y marinos. Campesinos y agricultores al utilizar el secado solar pueden preservar los productos cosechados a un costo menor que el requerido por otras técnicas de secado.

Existen diferentes familias de hongos de las que sólo ciertas especies pueden ser consumidas por el ser humano. Se cree que los griegos fueron los primeros en cultivarlos, ya que hasta entonces se recolectaban en estado salvaje. Desde el punto de vista nutricional, los hongos poseen muchas características deseables en los alimentos, frescos tienen un alto contenido de humedad 85–90%, 2–5% de proteína, 3–8% carbohidratos, 0.3-0.4% de grasas, 1% de minerales (hierro, magnesio, cinc, selenio, fósforo, potasio), vitamina D y las del grupo B, así como ácido fólico (Kumar et al. 2013, Khader 1999). Pueden consumirse frescos o bien ser enlatados, deshidratados o congelados. Las vitaminas que contienen se conservan durante estos procesos. El contenido de humedad en los hongos deshidratados está entre 5 y 8%.

Secos conservan sus propiedades organolépticas como apariencia, color, aroma (Kapoor 1989) así que se empaquetan herméticamente y se almacenan en lugares secos por períodos prolongados de tiempo. La calidad de los hongos congelados es excelente pero el costo de eliminar el agua es 10 veces mayor que el de un secado convencional.

El objetivo de este trabajo es diseñar, construir y evaluar el desempeño de un secador solar indirecto que posteriormente se donará a la comunidad de Tlalmanalco. Mediante un taller de secado se pretende sensibilizar a los potenciales usuarios del beneficio de emplear este tipo de dispositivos para deshidratar hongos y otros productos cultivados en la región.

DESHIDRATACIÓN

El secado es un proceso que busca eliminar parcial o totalmente, por evaporación, el agua que contiene un producto líquido o sólido para transformarlo en un producto sólido seco en el que la humedad residual es baja. Al mismo tiempo que se disminuye el agua libre disponible, se disminuye la actividad del agua (a_w <0.7) por abajo del nivel de la actividad mínima para el desarrollo y reproducción de microorganismos (bacterias, levaduras y moho) e igualmente se inhiban las reacciones químicas de degradación enzimática.

La deshidratación solar es una técnica de secado por convección que consiste en hacer pasar por el producto a secar una corriente de aire caliente y seco que suministra el calor necesario para evaporar el agua y arrastrar el vapor formado. En el caso de los materiales biológicos sus estructuras originales son preservadas durante el proceso de secado mediante diferentes mecanismos que actúan desde el nivel molecular y se extienden hasta la matriz microestructural (Aguilera 2003). Las membranas son igualmente resguardadas a través de mecanismos de reemplazamiento de agua (Crowe et al. 2001).

Tlaltmanalco (latitud 19.20°N, longitud 98.80°W) como muchas otras localidades de la República Mexicana goza de un excelente recurso solar durante todo el año. En la figura 1 se muestra una foto satelital del Centli en Tlalmanalco, en la que puede apreciarse la trayectoria solar del sitio (Consultado en SunEarthTools.com http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es el 27/10/2015). En la figura 2 se observa la radiación promedio diaria para cada mes con los datos obtenidos con el programa PVSYST.

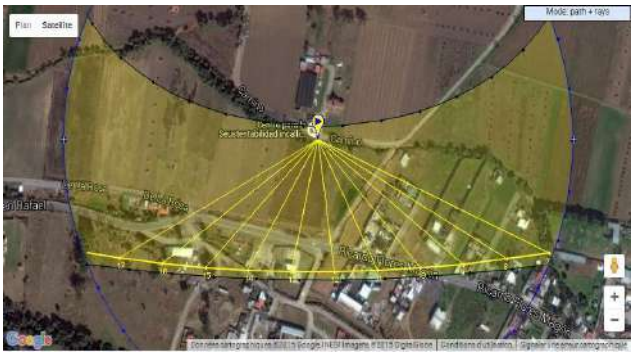


Fig. 1. Trayectoria solar, Tlalmanalco, Edo de México.

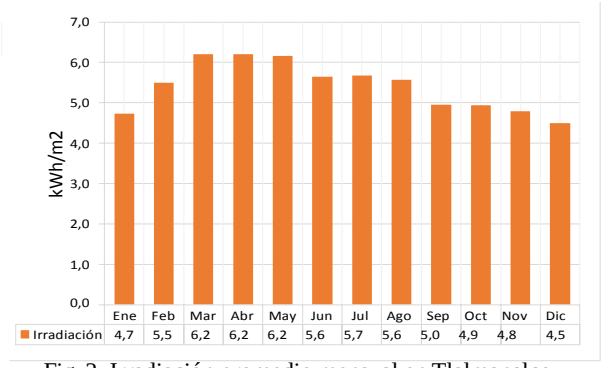


Fig. 2. Irradiación promedio mensual en Tlalmanalco.

El tiempo de secado depende no sólo de la irradiación y condiciones climatológicas sino de la estructura interna del producto a secar. En el sólido, el calor tiene que transmitirse a su superficie y de ahí a su interior. La masa húmeda se transfiere desde el interior del sólido hacia su superficie como líquido y/o vapor, y como vapor desde su superficie al medio externo. Un sólido poroso está hecho de material higroscópico, es decir, que puede contener humedad retenida en los intersticios de su estructura. El producto debe deshidratarse desde su base de masa húmeda, que es el porcentaje de humedad del sólido húmedo hasta su base seca comercial, que es su contenido de humedad en kg de agua por kg sólido al finalizar el proceso de secado. En muchos productos se observa que la velocidad inicial de secado es constante y después disminuye. La magnitud de la velocidad constante depende del coeficiente de transferencia de calor, de la superficie expuesta al medio y de la diferencia entre las temperatura o humedad de la corriente de aire y la superficie húmeda del sólid o.

DESCRIPCIÓN DEL SECADOR SOLAR

El secador solar que se construyó es de tipo indirecto para evitar los posibles daños que puede ocasionar la radiación solar al incidir directamente sobre algunos alimentos principalmente hongos. Está conformado por un colector solar plano, tubería PVC de distribución de aire y una cámara de secado. El colector solar plano es de madera con un ángulo de inclinación respecto a la horizontal de 20º, orientado de Norte a Sur. Sus dimensiones son 2m de profundidad, 0.8m de ancho y 0.2m de alto; en su interior se encuetra una lámina de acero pintada de negro colocada a 0.1m de altura dentro del colector para aumentar el área de intercambio de calor con el aire. En la cara superior se coloca un vidrio y en la parte posterior tiene perforaciones por las que el aire caliente sale hacia la cámara de secado. (Fig. 3a y 3b).

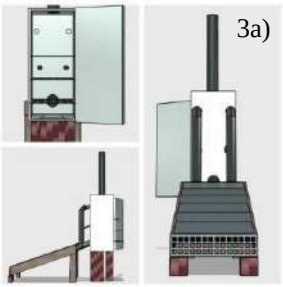


Fig. 3a). Perspectivas del diseño en 3D del secador.

3b). Secador solar construido.

Para la cámara de secado se utilizó un refrigerador de reuso, aprovechando el aislamiento térmico que tiene, y que está construido de metal por lo que es más resistente a la intemperie que la madera Las dimensiones interiores de la cabina de secado son 0.4m de profundidad, 0.4m de ancho y 0.4m de alto, con un aislante térmico de 0.03m de espesor. En las perforaciones del colector antes mencionadas se introduce la tuberia que conduce el aire hacia la cámara de secado. Esta tuberia tiene un diámetro de 0.15 m. Con la finalidad de estudiar los efectos de suministrar aire caliente en diferentes zonas de la cámara de secado en el desempeño del secador, se instalaron diferentes configuraciones de tuberia, en la primera se introdujo el aire en su totalidad por la cara inferior de la cámara de secado, en la segunda se distribuyó el aire mediante tubos de 0.1 m y 0.05 m para suministrarlos por la parte lateral de la cámara a diferentes alturas. (Fig. 4a y 4b).

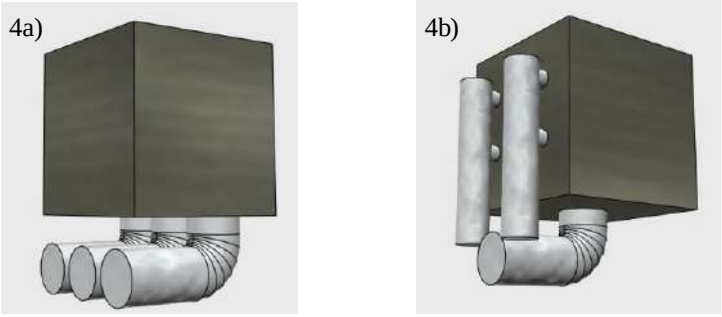


Fig 4. a) Configuración 1 tubería que introduce el aire caliente por la parte inferior de la cámara de secado b) Configuración 2 tubería que distribuye el aire en diferentes posiciones de la cámara de secado.

ANÁLISIS

La cantidad de humedad que contiene el alimento es el parámetro de mayor importancia para saber si el proceso ha terminado o debe continuar. Existen en la literatura valores máximos de humedad que deben tener los alimentos para definirlo como seco, por lo general estos valores son porcentuales y se definen mediante las siguientes ecuaciones.

El contenido de humedad en base húmeda (M) es la cantidad de agua en gramos por unidad de masa de la muestra húmeda:

$$M\ \% = \frac{m_a}{m_T} x100 \tag{1}$$

En la ecuación 1:

M es la humedad en base húmeda.
m_a es la masa de agua que contiene la muestra en kg.
m_T es la masa total de la muestra en kg.

El contenido de humedad en base seca es el peso de la humedad presente en el producto por unidad de peso de materia seca en el producto y se calcula con la ecuación 2;

$$X\ \% = \frac{m_a}{m_s} x100 \tag{2}$$

X es la humedad en base seca.
m_a es la masa de agua que contiene la muestra en kg.
m_s es la masa de solido seco en la muestra en kg.

El contenido de humedad también se puede expresar mediante la relación que hay entre la cantidad de agua en gramos por gramos de materia seca del alimento, a la relación de humedad se le conoce como MR y se calcula usando la siguiente ecuación.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \tag{3}$$

En la ecuación 3:

MR es la relación de humedad.
M es la humedad contenida en cualquier instante del proceso.
M_e es la humedad de equilibrio.
M_i es la humedad inicial.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron pruebas de secado de manzana y hongos para analizar el funcionamiento del secador solar. Los productos también se secaron en un horno a 60°C hasta alcanzar un peso constante de acuerdo con Lidhoo y Agrawal (2006). Las manzanas se cortaron en rodajas de 0.4 cm de espesor y se sumergieron en una solución diluida de ácido ascórbico. A los hongos se les aplicó un procedimiento similar. Se utilizó una balanza electrónica marca Ohaus para medir las masas desde el inicio hasta el final del proceso. Se colocaron sensores de temperatura en diferentes partes del dispositivo y se conectaron a un sistema de adquisición de datos ACRTrendReader. Se registraron datos cada minuto. Los valores de irradiancia se obtuvieron del sistema de adquisición de datos Gridsoft y los de humedad de la estación meteorológica Oregon Scientific que se encuentra en la azotea del edificio en donde se colocó el secador. Las termografías se obtuvieron con una cámara infrarroja Fluke y se procesaron con el programa SmartView. Para la simulación se utilizó el programa Comsol 5.2.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las pruebas se realizaron en el mes de julio que se caracteriza por una irradiancia variable, alta nubosidad, lluvias frecuentes y humedad considerable. Para conocer la distribución de temperaturas en el colector y en la cámara, se colocaron termistores en la placa absorbedora, a la salida del colector, en diferentes alturas de la cabina de secado y a la salida de la misma. También se registró la temperatura ambiente. En las figuras 5 y 6 se muestra, para la configuración de la tubería inferior y lateral respectivamente, el comportamiento térmico de la secadora sin contener producto a secar. Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento de la cámara de secado con alimento. En cualquiera de estas situaciones se observan variaciones importantes en la temperatura de la placa que obedecen a las variaciones de la irradiancia pero que no repercuten con la misma intensidad en el interior de la cámara de secado.

La figura 9 y 10 se ilustran el comportamiento de las temperaturas registradas y la humedad relativa ambiental durante los procesos de secado para ambas configuraciones, es destacable que el día en que se realizó el secado con la tubería inferior (figura 9), la humedad es menor respecto a la del día en que el secador tenía la tubería de distribución.

La figura 11 muestra las curvas de secado de manzana. Se puede observar que el producto pierde más rápidamente la humedad cuando se introduce el aire caliente simultáneamente por la parte inferior y la lateral a pesar de que las condiciones de radiación fueron menos favorables: gran variabilidad de la irradiancia, mayor presencia de humedad en el aire y de que se secó una mayor cantidad de producto.

En la figura 12 se muestra la evolución de la relación de humedad a lo largo del proceso para las dos configuraciones de tubería. Se puede destacar que al introducir el aire de manera distribuida mediante la tubería lateral se obtienen valores de MR inferiores durante el secado de alimento.

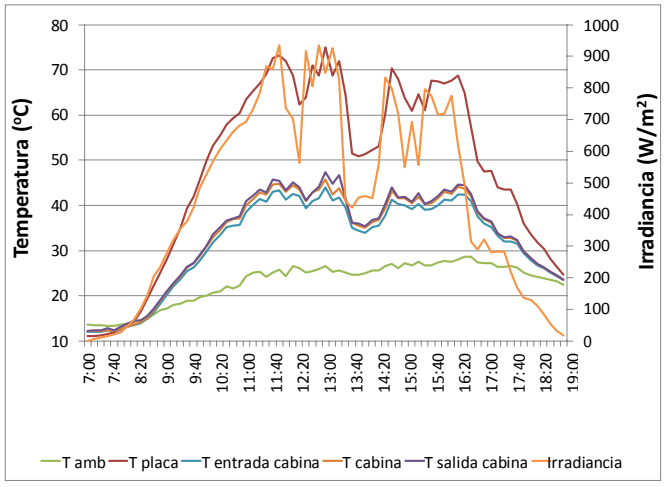


Fig. 5. Distribución de temperaturas tubería inferior.

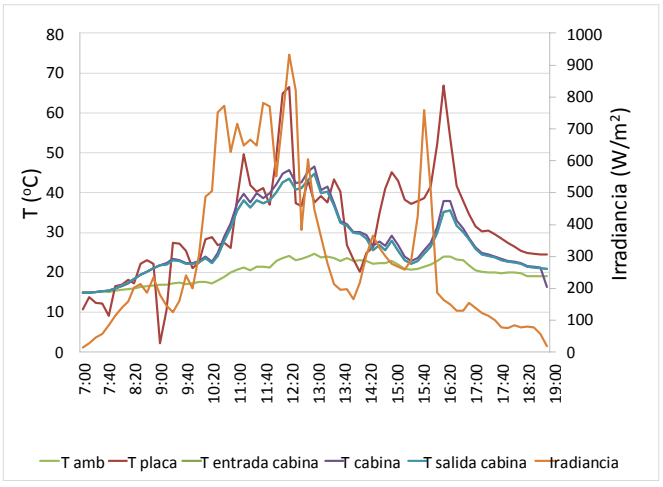


Fig. 6. Distribución de temperaturas tubería lateral.

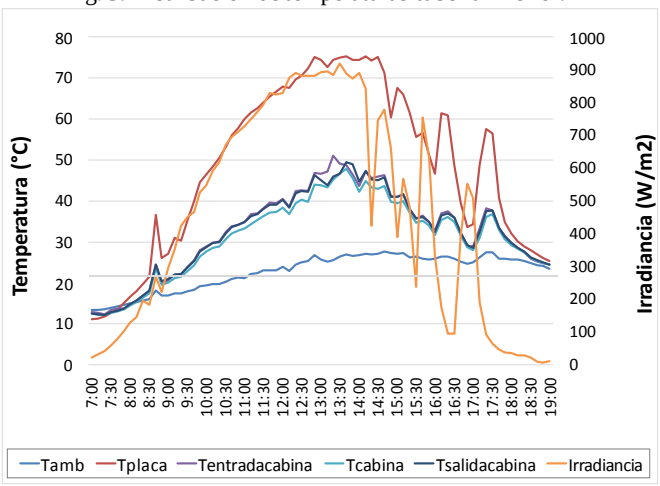


Fig. 7. Distribución de temperaturas tubería inferior.

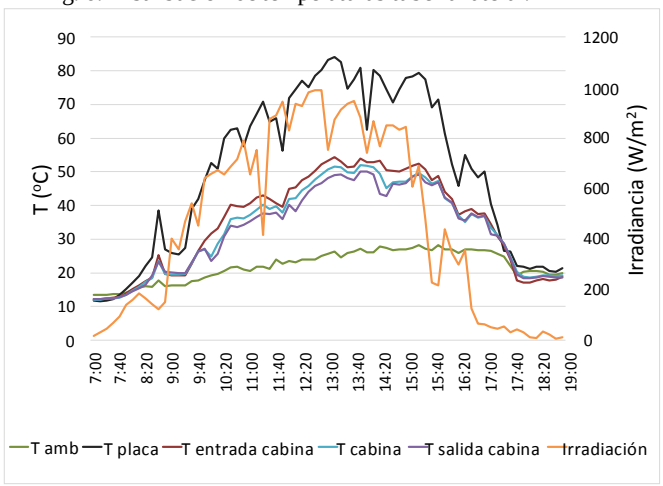


Fig. 8. Distribución de temperaturas tubería lateral.

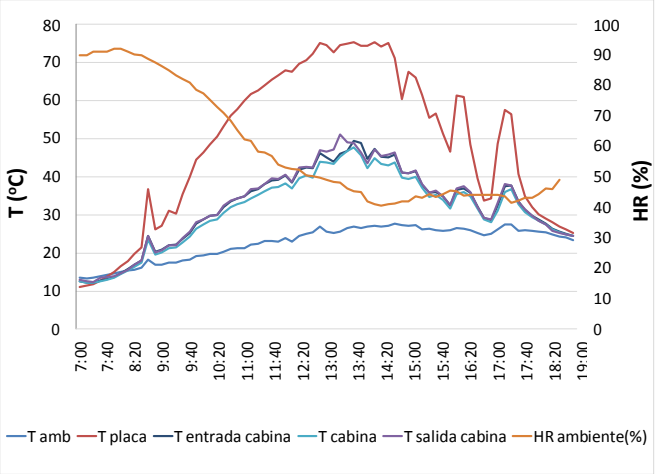


Fig. 9. HR ambiente y temperaturas tubería inferior.

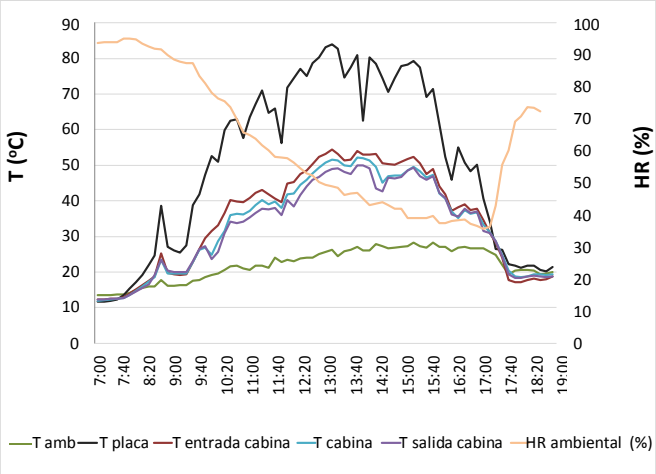


Fig. 10. HR ambiente y temperaturas tubería lateral.

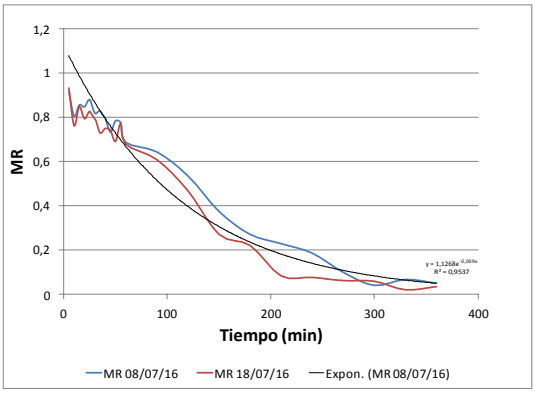


Fig. 11. Curva comparativa de secado de las 2 configuraciones.

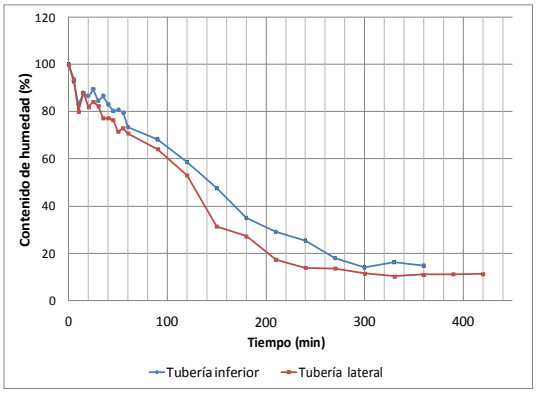


Fig. 12. Curva comparativa de MR de las 2 configuraciones.

Todo objeto con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación infrarroja. Los físicos Josef Stefan y Ludwig Boltzmann en 1884 demostraron que existe una correlación entre la temperatura de un cuerpo y la intensidad de la radiación infrarroja que emite. Una cámara termográfica registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible. Cuando mide la radiación infrarroja de onda larga, calcula a partir de ésta la temperatura del objeto. El cálculo tiene en cuenta la emisividad de la superficie del objeto medido y la compensación de la temperatura reflejada. Cada pixel del detector representa un punto de temperatura y aparece en la pantalla como imagen de color. La termografía muestra la distribución de temperatura en la superficie en un objeto.

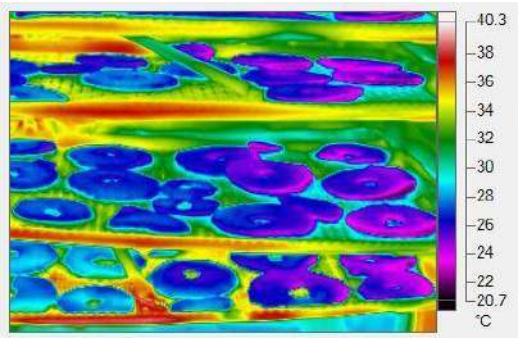


Fig. 13. Termografía a la 11:25 hrs.

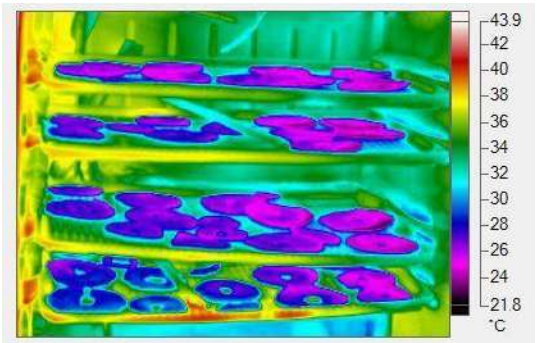


Fig. 14. Termografía a las 12:29 hrs.

Se obtuvieron termografías del producto en el interior de la cabina de secado durante el proceso, lo que permite observar los gradientes de temperatura que se tienen al interior de la cámara de secado. Se muestran dos imágenes que corresponden al secado de manzanas en las figuras 13 y 14. La primera se obtuvo a las 11:25 hrs. Se observa que las charolas tienen una mayor temperatura que las rodajas de manzana. La parte izquierda de la imagen muestra una temperatura mayor que la del lado derecho debido a que el sol incidía a esas horas sobre ese lado de la cámara de secado. En la figura 14 obtenida a las 12:29 hrs, es más homogénea la temperatura de las rodajas de manzana dado que al cambiar la altura solar la radiación incide en la parte superior de la cámara de secado. También se observó, aunque

no se muestra en estas termografías, la temperatura del aire que proviene del colector es de varios grados por encima de la de las charolas y producto. Se puede notar que la temperatura del alimento no alcanza valores nocivos para sus propiedades.

Con el programa Comsol se modeló en tres dimensiones el colector solar, con las propiedades termofísicas de los diferentes materiales se hizo una simulación para conocer la distribución de temperaturas al interior del colector y del aire a la salida de los tubos con la finalidad de apreciar de manera gráfica el fenómeno de transferencia de calor al interior del colector solar.

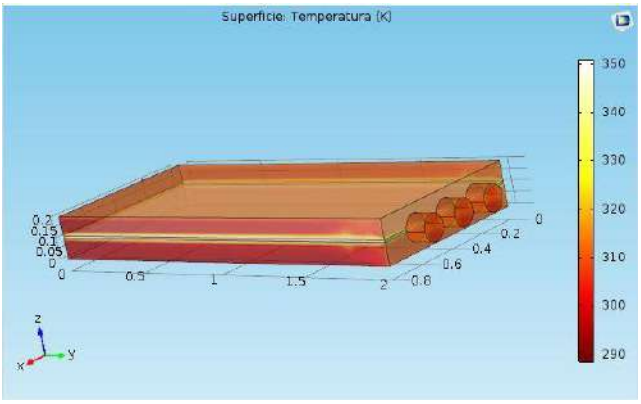


Fig. 15. Simulación de transferencia de calor al interior del colector solar.

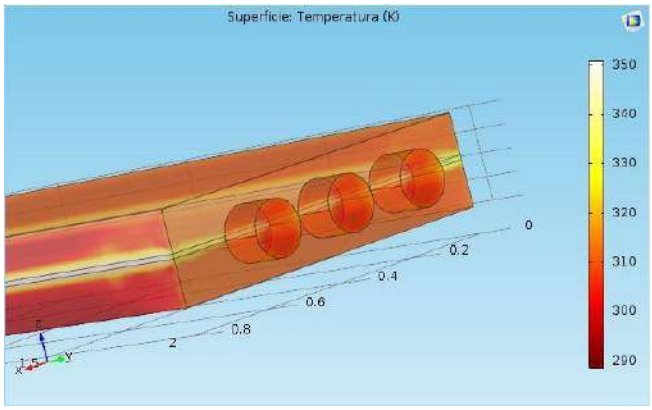


Fig. 16. Simulación de transferencia de calor del aire que sale del colector hacia la cámara de secado.

CONCLUSIONES

A partir de las curvas obtenidas que permiten considerar el efecto de la irradiancia, nubosidad y humedad en el proceso de secado para las dos configuraciones de la tubería, se observa que el tiempo de secado es menor cuando el aire caliente se introduce simultáneamente por la parte inferior y lateral, asimismo se tiene mayor uniformidad de la temperatura en todas las charolas.

Es de gran utilidad en este tipo de procesos el uso de la tecnología infrarroja al permitir visualizar la temperatura que emiten las superficies de los diferentes objetos o de regiones de esos mismos.

El software de simulación es una valiosa herramienta en el estudio de la interacción de múltiples propiedades físicas que determinan, entre otros, los fenómenos de transporte, siempre y cuando se tenga la posibilidad de corroborar dichas simulaciones con resultados experimentales.

Se requiere estudiar los efectos debidos al flujo de aire.

REFERENCIAS

Aguilera, J. M. (2003) Drying and Dried Products Under the Microscope. Food Sci. Tech. Int., 9 (3) 137-143.

Belessiotis, V. and Delyannis, E. (2011) Solar drying. Solar Energy 85: 1665-1691.

Crowe J.H., Crowe L.M., Oliver A.E., Tsvetkova N.,Wolkers W. and Tablin F. (2001). The trehalose myth revisited: introduction to a symposium on stabilization of cells in the dry state. Cryobiology 43: 89–105.

Fudholi, A., Othman, M.Y. and Ruslan M.H. (2013) Drying of Malaysian Capsicum annnuum. (Red Chili) dried by open and solar drying. International Journal of Photoenergy. Article ID 167895, o pages.

Gurta S. F. and Evranuz, O. (2000) Low temperature mushroom drying with desiccant dehumidifiers. Drying Technol 18: 443-446

Kapoor, J. (1989) Mushroom cultivation. Indian council of agricultural research. New Delhi, 5-11.

Khader, V. (1999) Mushroom processing. Preservation of fruits and vegetables. Kalyani Publishers, New Delhi, 124-129.

Kumar, A., Singh M and Singh G. (2013) Effect of different pretreatments on the quality of mushrooms during solar drying. J. Food Sci Technol 50(1):165-170

Lidhoo C. K. and Agrawal Y.C. (2006) Hot-air over drying characteristics of button mushroom-safe drying temperature. Mush Res 15 (1) 59-62.

Shanmugam, V. and Natarajan, E. (2006) Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. Renewable Energy 31:1239-1251.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SÍNTESIS DE NANOESTRUCTURAS DE ÓXIDO DE ZIRCONIO (ZrO_2) UTILIZANDO EL HORNO SOLAR DEL IER-UNAM

Laura G. Ceballos-Mendivil*, Heidi I. Villafán-Vidales, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Claudio A. Estrada-Gasca
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.
Tel +52(777)3620090, *lgcm@ier.unam.mx

Rafael E. Cabanillas-López
Depto. de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México.

Judith C. Tánori-Córdova
Depto. de Inv. en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, 83000, México.

RESUMEN

El óxido de zirconio (ZrO_2) es un material cerámico con únicas propiedades fisicoquímicas, las cuales dependen de su fase cristalina, forma y tamaño de partícula, etc., con aplicaciones en varias áreas como catálisis o soportes catalíticos, dispositivos ópticos, celdas de combustible, biomateriales cerámicos y sensores, piedras preciosas, pigmento, sensor de gas automotriz, etc.

El objetivo de este trabajo es la síntesis de ZrO_2 nanoestructurado, utilizando el horno solar HoSIER en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), obteniendo un nuevo proceso con bajas emisiones de CO_2 para la producción de este material. Se utilizó n-propóxido de zirconio como precursor de zirconio a una temperatura de 1500°C en atmósfera controlada (argón). La síntesis fue llevada a cabo en un reactor solar volumétrico diseñado para trabajar con energía solar concentrada y atmósferas controladas. Se analizó el ZrO_2 obtenido mediante las técnicas de caracterización de FTIR, DRX y TEM.

Palabras clave: zirconia, horno solar, caracterización.

ABSTRACT

Zirconium oxide (ZrO_2) is a ceramic material with unique physicochemical properties which depend on their crystal phase, particle size and shape, among others, with applications in various areas such as catalysis or catalyst supports, optical devices, fuel cells, ceramic biomaterials and sensors, gemstones, pigment, automotive, gas sensor.

The aim of this work is the synthesis of nanostructured ZrO_2 using the Hosier solar furnace on the installations of the Institute of Renewable Energy of the Universidad Nacional Autonoma de México (IER-UNAM), obtaining a new process with low CO_2 emissions for the production of this material. It was used n-propoxide zirconium as zirconium precursor at a temperature of 1500°C in controlled atmosphere (argon). The synthesis was carried out in a volumetric solar reactor designed to operate with concentrated solar energy and controlled atmospheres. ZrO_2 synthesized was analyzed by characterization techniques FTIR, XRD and TEM.

Keywords: zirconia, solar furnace, characterization.

INTRODUCCIÓN

El óxido de zirconio o zirconia (ZrO_2) es un material cerámico con únicas propiedades fisicoquímicas, las cuales dependen de su fase cristalina, forma y tamaño de partícula, etc., con aplicaciones en varias áreas como catálisis o soportes catalíticos, dispositivos ópticos, celdas de combustible, biomateriales cerámicos y sensores, piedras preciosas, pigmento, sensor de gas automotriz [1,2]. La zirconia existe en 3 fases cristalinas: monoclínica, tetragonal y cúbica, donde las fases tetragonal y cúbica poseen propiedades mecánicas superiores pero sufren degradación a bajas temperaturas en agua o vapor de agua [3]. El ZrO_2 tiene amplias aplicaciones biomédicas y en energía debido a su extraordinaria combinación de resistencia, tenacidad a la fractura, conductividad iónica y baja conductividad térmica, características asociadas con la estabilización de las fases tetragonal y cúbica a través de aleación de iones aliovalentes [4].

Hay varios métodos de síntesis en hornos convencionales (utilizando energía eléctrica) de ZrO_2, tales como sol gel, hidrotérmico, micro-emulsión, interface aceite/agua [2], síntesis de combustión [5], técnica pulverización de plasma [3], entre otras.

No existen reportes en la literatura sobre síntesis de ZrO2 con el uso de energía solar concentrada, por medio de hornos solares.

En el presente trabajo, se ha sintetizado ZrO_2 utilizando *n*-propóxido de zirconio como fuente de zirconia, mediante la obtención de polvos precursores a 120°C (proceso sol gel), para su posterior tratamiento térmico en el horno solar HoSIER en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), a una temperatura de 1500°C en atmósfera controlada (argón), obteniendo un nuevo proceso con bajas emisiones de CO_2 para la producción de este material. La síntesis fue llevada a cabo en un reactor solar volumétrico diseñado para trabajar con energía solar concentrada y atmósferas controladas. Se analizó el ZrO_2 obtenido mediante las técnicas de caracterización de FTIR, DRX y TEM.

EXPERIMENTO

Materiales

Los materiales requeridos para la síntesis del ZrO_2 son: n-propóxido de zirconio-$Zr(OPr)_4$ (con una concentración del 70% en peso en 1-propanol, suministrado por Aldrich), ácido bórico, sorbitol ($C_6H_{14}O_6$) y ácido acético ($C_2H_4O_2$).

Experimento

El ZrO_2 se ha sintetizado con el procedimiento siguiente, el cual consiste en dos etapas:

Etapa 1: Síntesis de los polvos precursores mediante el proceso sol-gel a baja temperatura (120°C).

Etapa 2: Síntesis de ZrO_2 nanoestructurada a partir de los polvos precursores, usando energía solar concentrada por medio del horno solar HoSIER a una temperatura de 1500°C en atmósfera de argón por una hora.

Etapa 1: Proceso sol-gel. Consta de los siguientes pasos: 1) se disuelve ácido bórico (H_3BO_3) y sorbitol ($C_6H_{14}O_6$) en ácido acético ($C_2H_4O_2$), con agitación continua a 60ºC por 1 h, resultando una solución homogénea y transparente; 2) la solución obtenida se enfría a temperatura ambiente para después añadir gota a gota *n*-propóxido de zirconio ($Zr(OPr)_4$), bajo agitación constante a temperatura ambiente por 0.5 h, presentando un color amarillo claro y consistencia gelosa; 3) se introduce la muestra en un horno a 70°C por 4 h, resultando un material color blanco amarilloso; y, 4) finalmente, el material se secó a una temperatura de 120°C por 6 h, observando un material color amarillo claro de consistencia vítrea, el cual es molido en un mortero de ágata, resultando así los polvos precursores necesarios para la síntesis de ZrO_2.

Etapa 2: Proceso térmico en el HoSIER. Esta etapa se realizó en el horno solar HoSIER en atmósfera de argón, a una temperatura de 1500°C (1 h) para la formación de ZrO_2, utilizando crisoles de alúmina como portamuestras de los polvos precursores. La Figura 1 muestra el montaje experimental del proceso térmico en el HoSIER, usando un reactor solar volumétrico.

Fig. 1. Montaje experimental de síntesis de ZrO2 a 1500°C (1 h) en atmósfera de argón en el HoSIER

Caracterización

Para confirmar los enlaces característicos, las muestras se analizaron en un intervalo de 400 a 4000 cm^{-1} en un espectrofotómetro FTIR marca Bruker modelo Alpha, en el modo de transmisión, utilizando pastillas de KBr. El DRX se realizó para conocer la distancia interplanar y confirmar las fases cristalinas de los polvos de ZrB_2 con el equipo difractómetro de rayos-X Rigaku ULTIMA IV con un láser de excitación Cu (λ=0.15418 nm). Para conocer la morfología, tamaño de partícula y cristalinidad, las muestras se analizaron mediante un equipo de TEM, marca JEOL 1400 de 120 kV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espectroscopia infrarroja de transformadas de Fourier (FTIR)

La Figura 2 muestra el espectro IR de los polvos precursores, observado dos pares de picos en 803 y 857 cm^{-1}, 1047 y 1096 cm^{-1} y uno más en 1174 cm^{-1}, atribuidos a los enlaces Zr-O, Zr-O-C y Zr-O-C-B, respectivamente, formados en el sol mediante el procedimiento de las reacciones de hidrólisis y condensación como puentes vínculo con el aumento de la viscosidad en este; estos enlaces permitieron estabilizar y uniformizar el sol. El pico en 1413 cm^{-1} es asignado al enlace B-O-C, el cual se encuentra cerca del pico característico del enlace B-OH a 1370 cm^{-1} de acuerdo a lo reportado [6]; ya que el enlace B-OH se transformó en el B-O-C debido a la reacción ocurrida entre el ácido bórico y el sorbitol. Además, se observa un par de picos en 551 y 654 cm^{-1} formados por la hidrólisis del $Zr(OPr)_4$ [7]. Por último, el pico en 3417 cm^{-1} es característico de los enlaces OH, los cuales son debido a la humedad presente en el material.

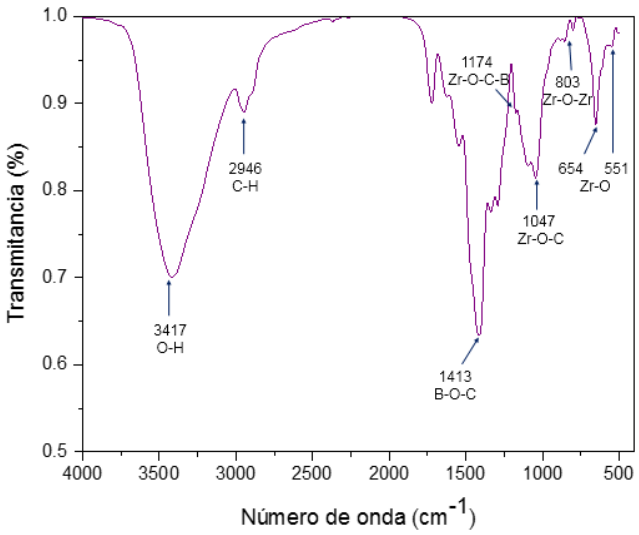


Figura 2. Espectro FTIR con bandas características de la muestra de polvos precursores obtenidos a 120°C.

La figura 3 muestra el espectro IR de la m-ZrO_2 sintetizada a 1500°C en el HoSIER, observando que el pico en 3218 es debido a los grupos O-H y humedad adsorbida. Los picos de 1464 y 1196 cm^{-1} son asignados a las vibraciones de tensión de enlaces C-H; el enlace C-H fue relacionado a la cadena de carbón de los aditivos orgánicos adsorbidos en la superficie de la zirconia. Los picos de 537 y 648 cm^{-1} son asignados a vibraciones Zr-O de la ZrO_2 y por último, el pico en 750 cm^{-1} es característico de m-ZrO [8].

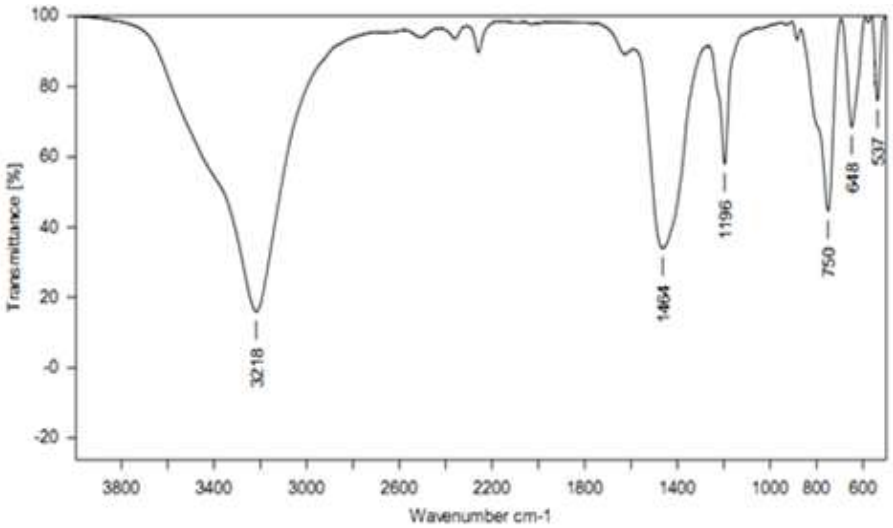


Fig. 3. Espectro FTIR polvos de m-ZrO_2 sintetizada a 1500°C (1 h) en atmósfera de argón en el HoSIER.

Difracción de rayos X (DRX)

La Figura 4 muestra el patrón de difracción de rayos X para la zirconia nanoestructurada sintetizada a 1500°C en el HoSIER, observando los picos característicos de la zirconia de fase cristalina monoclínica (m-ZrO_2), sin impureza alguna de acuerdo al JCPDS # 37-1484.

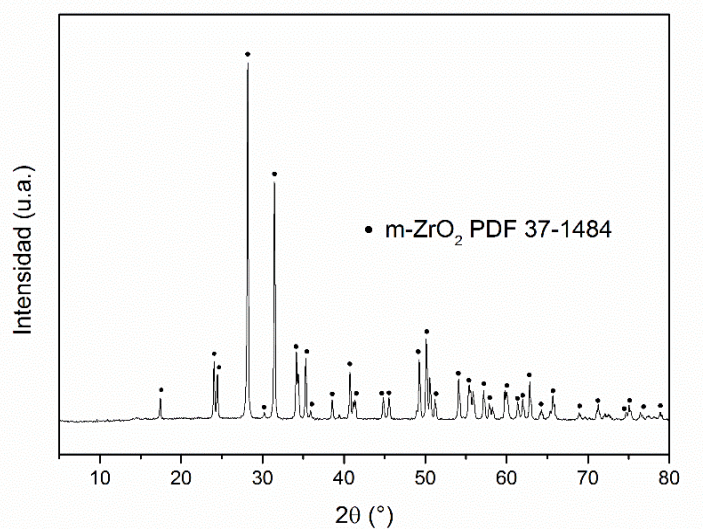


Figura 4. Patrón DRX de polvos de zirconia monoclínica (m-ZrO_2) sintetizada a 1500°C (1 h) en atmósfera de argón en el HoSIER.

TEM

La Figura 5 muestra micrografías de TEM de m-ZrO_2 nanoestructurada, en forma de nanobrarras, donde el ZrO_2 tiene un diámetro de aproximadamente 200 nm y una longitud de 0.3 a 1.5 μm.

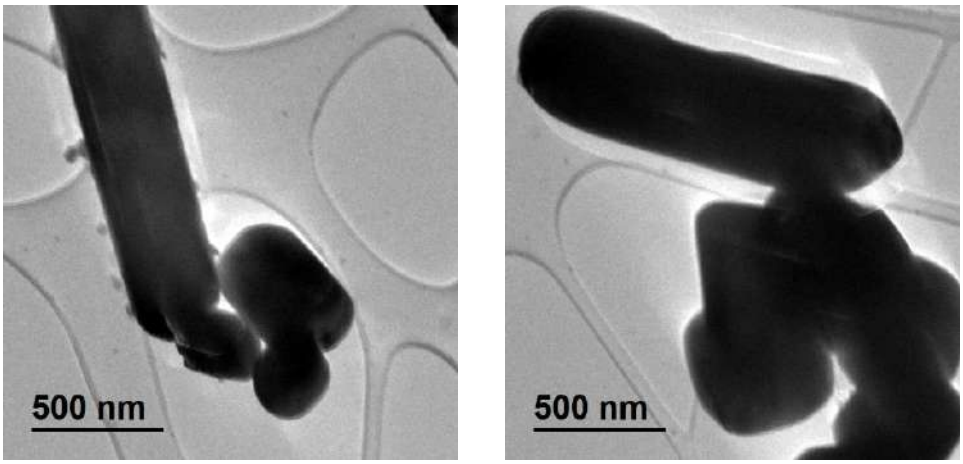


Fig. 5. Micrografías TEM de m-ZrO2 nanoestructurada, sintetizada a 1500°C en el HoSIER.

CONCLUSIONES

Se ha logrado la síntesis de zirconia monoclínica (m-ZrO_2) nanoestructurada, en forma de nanobarras con un tamaño del orden nanométrico, usando energía solar concentrada por medio del horno solar HoSIER en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), obteniendo un nuevo proceso con bajas emisiones de CO_2 para la producción de este material. Se utilizó n-propóxido de zirconio como precursor de zirconio a una temperatura de 1500°C en atmósfera controlada (argón). La síntesis fue llevada a cabo en un reactor solar volumétrico diseñado para trabajar con energía solar concentrada y atmósferas controladas. Se analizó el ZrO_2 obtenido mediante las técnicas de caracterización de FTIR, DRX y TEM.

REFERENCIAS

[1] Z. Wang, Y. Lu, S. Yuan, L. Shi, Y. Zhao, M. Zhang and W. Deng. Hydrothermal synthesis and humidity sensing properties of size-controlled zirconium oxide (ZrO_2) nanorods. *Journal of Colloid and Interface Science.* 396 **(2013)** 9–15.

[2] T. Shi, Y. Cai, L. Liu and X. Zhou. Aspects Formation process of m-ZrO_2 nanoparticles by the oil/water interface method combined with seeding technique. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 469 **(2015)** 83–92.

[3] G. Wang, F. Meng, C. Ding, P.K. Chu and X. Liu, Microstructure, bioactivity and osteoblast behavior of monoclinic zirconia coating with nanostructured surface. *Acta Biomaterialia*. 6 **(2010)** 990–1000.

[4] V. Fr and D.R. Clarke. The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future trends, 1920 **(2009)** 1901–1920.

[5] M. Rajamathi and S. Raghavan. Amorphous, monoclinic, and tetragonal porous zirconia through a controlled self-sustained combustion route, 1755 **(2011)**.
[6] H. Ji, M. Yang, M. Li, G. Ji, H. Fan and X. Sun, Low-temperature synthesis of ZrB_2 nano-powders using a sorbitol modified sol–gel processing route. *Adv. Powder Technol*. 25 **(2014)** 910–915.
[7] H. Wu, W. Zhang and J. Zhang, Pyrolysis synthesis and microstructure of zirconium carbide from new preceramic polymers, *Ceramics International*. 40 **(2014)** 5967–5972.
[8] A. Majedi, F. Davar and A. Abbasi, Sucrose-mediated sol–gel synthesis of nanosized pure and S-doped zirconia and its catalytic activity for the synthesis of acetyl salicylic acid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20 **(2014)** 4215–4223.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

COCCION DE PAPA, ZANAHORIA Y HUEVO EN UNA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA CON REFLECTORES INTERNOS

H. Terres, S. Chávez, A. Lizardi, R. López
Departamento de Energía, Área de Termofluidos, Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzcalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas,
C. P. 02200, México. D. F., Tel. 5318 9061
*tph@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En este trabajo se muestran tanto la aplicación así como el proceso de cocción de papa, zanahoria y huevo, cuando se utiliza una estufa solar con reflectores internos de alta reflectancia para tal fin.

Mediante pruebas experimentales se indican los tiempos de cocción requeridos y las temperaturas alcanzadas en los procesos de calentamiento evaluados.

La estufa solar usada está compuesta de una cubierta con tres vidrios y en su interior tiene un arreglo de reflectores fabricados en papel aluminio, estos se encuentran posicionados en diferentes ángulos respecto a la horizontal. En el interior se encuentra un recipiente que permite colocar los alimentos que se pretenden cocinar.

El funcionamiento de la estufa no requiere de seguimiento, ya que una vez colocada, solo basta esperar el tiempo necesario de cocción.

Sin embargo, es importante señalar que los efectos climatológicos pueden ser totalmente determinantes en su operación, las variables que inciden directamente son la radiación solar y la temperatura ambiente.

Esta estufa solar resulta ser una buena alternativa para su uso en regiones marginadas, así como en provincias donde los métodos de calentamiento convencionales tales como gas, luz o electricidad no son posibles de lograr.

ABSTRACT

In this work are so much the application as well as the process of baking of Pope, carrot and egg, when a solar cooker with internal reflectors of high reflectance is used.

By means of experimental tests the cooking times required and the temperatures reached in the evaluated processes of heating are indicated.

The solar cooker used is make up by a cover with three glasses and in their interior has an adjustment of reflectors made in paper aluminum, these are positioned in different angles with respect to the horizontal. In the interior there is a container that allows placing the foods that are tried to cook.

The operation of the cooker does not require pursuit, since once placed, single it is enough to wait for the necessary time of baking.

Nevertheless, it is important to indicate that the climatologic effects can be totally determining in their operation, the variables that affect directly are the solar radiation and the environment temperature.

This solar cooker turns out to be a good alternative for its use in marginalized regions, as well as in provinces where the conventional methods of heating such as gas, light or electricity are not possible to obtain.

Palabras claves: Estufa solar, reflectores internos, temperaturas, cocción, tiempo de cocción.

INTRODUCCION

Diversos tipos de estufas solares han sido estudiadas, todas ellas con la finalidad última de lograr los mejores resultados en materia de calentamiento, sin embargo, los diversos procesos de transferencia de calor que intervienen deben de tenerse presentes para lograr tales fines.

La estufa solar que se presenta en este trabajo, pertenece a la clasificación de tipo caja con reflectores internos. Otros tipos de estufa solar son con concentrador solar y con uso de colector solar.

Entre los trabajos previos realizados sobre estufas solares se encuentra el realizado por El-Sebaii y Domanski, quienes obtuvieron una estufa solar semejante a la expuesta en este trabajo y para la cual obtuvieron expresiones para determinar las temperaturas más importantes que caracterizan su funcionamiento.

Harmim. et al., mostraron en su trabajo una comparativa experimental para una estufa solar tipo caja con dos vasijas de cocción diferentes, ambas vasijas son iguales en forma y volumen con la diferencia especifica de que una de ellas tiene colocadas aletas. Las

aletas son adicionadas para mejorar la transferencia de calor del aire caliente del interior de la estufa hacia la vasija. Sus resultados mostraron una reducción considerable en el tiempo las pruebas se realizaron en una plataforma experimental en la unidad de investigación de energías renovables en el Sahara, localizado a 27° 53'N y 0°17' W en Argelia.

Schwarzer y Vieira da Silva, presentaron en su trabajo una generalidad de los tipos de estufas solares, sus características básicas y procedimientos experimentales para evaluar diferentes tipos de estufas. Las variables medidas en sus procedimientos son necesarias para calcular parámetros, las cuales son utilizadas para comparar el funcionamiento térmico de estufas solares. También muestran un modelo analítico simplificado para diseñar sistemas de cocción.

Sharma et al., investigaron el funcionamiento térmico de un prototipo de estufa solar basado en un colector de tubos evacuados con cambio de fase. El diseño estudiado tiene por separado una zona de captación de energía y una zona de calentamiento acoplados ambos en una unidad de almacenamiento. La energía solar es almacenada en la unidad durante las horas radiantes del día y es utilizada para el calentamiento en la tarde/noche. Utilizaron como material de almacenamiento eritrol. Se realizaron pruebas de calentamiento para la tarde y noche y observaron que el calentamiento por la tarde no afecta el calentamiento nocturno posibilitando un proceso de calentamiento más rápido. El funcionamiento de la estufa fue estudiado en Mie, Japón en condiciones climáticas de operación de este país.

Chen et al., estudiaron el cambio de fase en materiales empleados como almacenamiento de calor para estufas solares de tipo caja. Los materiales considerados son: nitrato de magnesio hexahidratado, ácido esteárico, acetamida, acetanilida y eritrol. Se realizaron estimaciones en un modelo bidimensional basándose en la aproximación de entalpia, estableciéndose un cálculo para la fracción media únicamente en conducción. Se estableció que los valores mayores de la conductividad térmica en un intercambiador de calor no son contribuciones significativas en la fracción media excepto para bajas conductividades. Basándose en resultados teóricos se encontró que el ácido esteárico y la acetamida tienen buena compatibilidad con el sistema de almacenamiento térmico. Sus resultados también muestran que el efecto del espesor del recipiente es insignificante.

Mirdha y Dhariwal, investigaron varios diseños de estufas solares para optimizar su funcionamiento. Iniciando con una estufa solar de tipo caja convencional, pasaron a varias combinaciones de arreglos con reflectores de espejo para llegar a un diseño final, dirigido a establecer una estufa, la cual pueda ser orientada para diferentes países en el hemisferio norte, principalmente localizados cerca del trópico de cáncer. Esta estufa provee alta temperatura para un gran periodo del día. Propusieron dos y tres cambios de posición en los reflectores para establecer sus variantes. El nuevo diseño logrado fue evaluado experimentalmente y comparado con una estufa solar de tipo caja convencional.

La estufa solar considerada se muestra en las figuras 1 y 2, son mostrados en forma general y detallada las características de la estufa junto con el recipiente de cocción.

Fig. 1 Estufa solar con reflectores internos, vista general

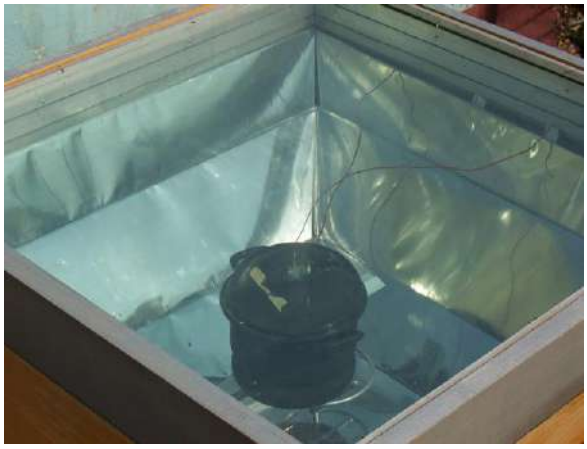


Fig. 2 Estufa solar con reflectores internos, detalle

EXPERIMENTACION

La estufa solar en cuestión consiste de una caja de madera cuyas dimensiones interiores son 0.70 m de largo, 0.70 m de ancho y 0.30 m de alto, dentro de la cual se colocan los reflectores, los cuales están diseñados con formas trapezoidales de madera triplay forrado con papel aluminio. Estos últimos forman cuatro etapas a diferentes ángulos respecto a la horizontal; el primero está a 25º, el segundo a 35º, el tercero a 45º y el cuarto a 64º. El espacio existente entre los reflectores y la caja de madera, se llena con lana mineral, para minimizar las pérdidas de calor en el fondo y los lados de la caja. La tapa de la estufa se compone de tres placas de vidrio de 0.003m de espesor colocados en un marco de madera. La separación entre los vidrios es de 0.025 m. La tapa debe cerrar herméticamente para producir el efecto invernadero y evitar las pérdidas de calor. El recipiente de cocimiento es de aluminio de 0.0015 m de espesor; sus dimensiones son 0.14 m de diámetro y 0.16 m de altura. Por fuera tiene pintura negro mate, la cual absorbe la radiación solar que incide en ella directamente o que le llega a través de los reflectores. El soporte del recipiente es una pequeña estructura fijada al fondo de la caja de madera y tiene una altura de 0.0913 m.

Un reflector plano de forma cuadrada, con 0.16 m por lado, está localizado en el fondo de la estufa por debajo de la base del recipiente en posición horizontal y tiene como función reflejar parte de la radiación solar reflejada por los reflectores laterales.

La experimentación de la estufa se llevó a cabo utilizando termopares tipo k, los cuales fueron colocados en tres partes componentes de la estufa y uno en el exterior de la misma, tal y como se muestra en la figura 3.

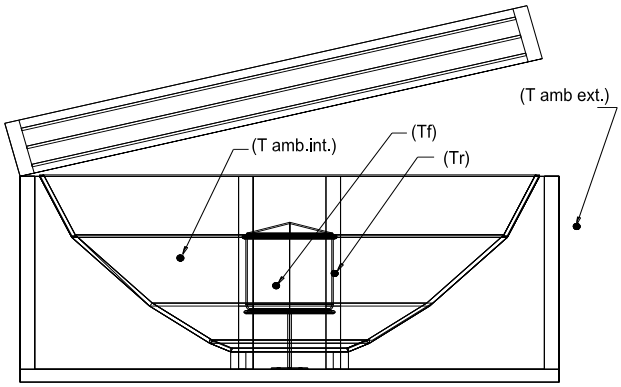


Fig. 3 Colocación de los termopares en la estufa solar

RESULTADOS

Los datos experimentales fueron recabados por medio de un equipo Compac field point, modelo FP-TP-3 de National Instruments y su procesamiento fue realizado mediante el software LabView 7.0. La información recabada en la experimentación se muestra en la tabla 1, e indica los valores de temperatura medidos para los diferentes elementos considerados en la estufa.

Los resultados obtenidos en la experimentación son mostrados en las gráficas de las figuras 4, 5 y 6 que corresponden respectivamente al proceso de cocción para huevo, papa y zahoria respectivamente, en estas se indican las cantidades de agua y producto usado.

En la figura 7 se muestra una comparativa de las temperaturas en conjunto. Los tiempos considerados fueron de las 10:00 a las 14:00 horas, monitoreando tiempos de 10 minutos entre pruebas. Las fechas de las pruebas fueron 5, 4 y 1 de abril de 2004, para huevo, papa y zanahoria. Estas fechas fueron establecidas lo más cercanas posible, teniéndose como única restricción, las condiciones climatológicas de los días (lluvias o exceso de nubosidad).

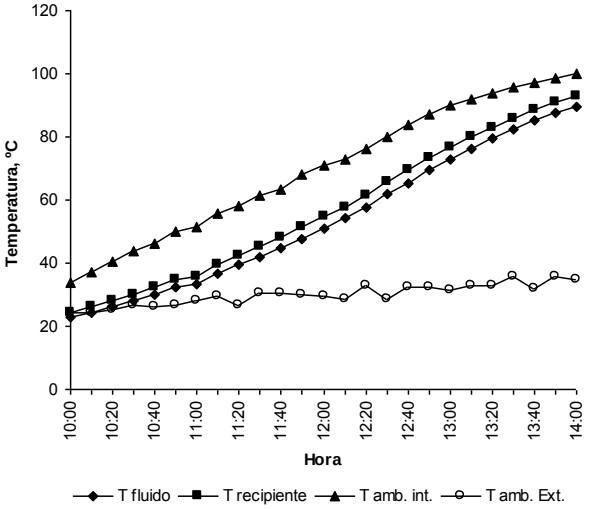


Fig. 4 Datos experimentales para el cocimiento con huevo
Masa =250 kg, agua =1.2 litros

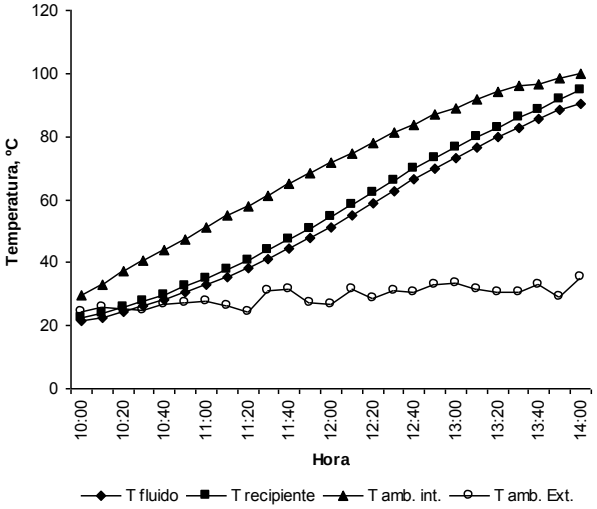


Fig. 5 Datos experimentales para el cocimiento con papa
Masa =350 kg, agua =1.2 litros

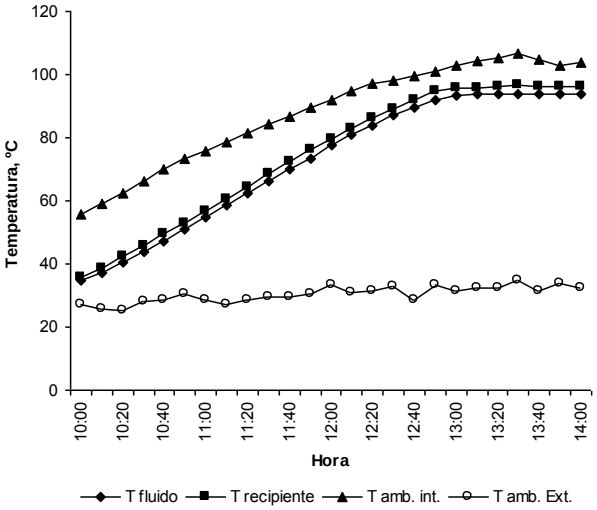


Fig. 6 Datos experimentales para el cocimiento con zanahoria
Masa =210 kg, agua =1.2 litros

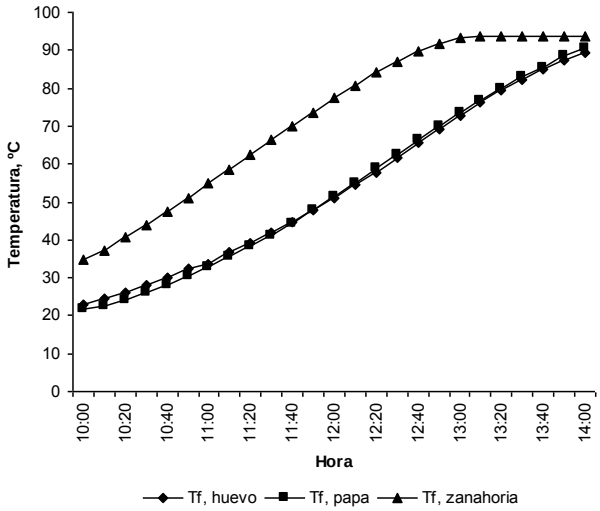


Fig. 7 Datos de temperaturas para huevo, papa y zanahoria

CONCLUSIONES

Los valores de las temperaturas máximas del fluido (agua) son 89.4, 90.5 y 93.6 ºC, que corresponden respectivamente a los procesos de calentamiento de huevo, papa y zanahoria.

Es importante notar que la diferencia entre temperaturas se asocia a los calores latentes de fusión de los alimentos considerados, los cuales son 247, 261 y 294 kJ/kg para huevo, papa y zanahoria.

Al término de todas las pruebas, los alimentos presentaron una cocción visual completa. Si se consideran las temperaturas estándar de cocción para cada caso, se puede establecer el tiempo de cocción requerido a partir de la figura 7.

El máximo valor de la temperatura interior en la estufa es 103.7 ºC, que se logra para el proceso de cocción de zanahoria.

Es de resaltarse este valor y de los otros casos ya que puede propiciar un cocimiento uniforme de los alimentos introducidos en el interior de la estufa.

Como puede apreciarse, esta estufa puede ser una buena alternativa en materia de cocimiento de alimentos, que puede ser aplicada en regiones donde los procesos de calentamiento son convencionales, esto es, mediante leña o carbón.

REFERENCIAS

A.A. El – Sebaii and R. Domanski (1994). Experimental and Theorical Investigation of a Box Type Solar Cooker with Multi-Step Inner Reflectors, Energy, Vol. 19, No. 10, pp. 1011-1021.Harmim, A., Boukar, M., Amar, M., (2008), Experimental study of a double exposure solar cooker withfinned cooking vessel, Solar Energy, Vol 82, Pag 287-289.

Schwarzer, K., Vieira da Silva, M., (2008). Characterisation and design methods of solar cooker, Solar Energy, Vol 82, Pag 157-163.

Sharma, S., Iwata b, T., Kitano, H., Sagara, K., (2005). Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit, Solar Energy, Vol 78, Pag 416-426.

Chen, C., Sharma, A., Tyagi, S., Buddhi, D., (2008). Numerical heat transfer studies of PCMs used in a box-type solar cooker, Renewable Energy, Vol 33, Pag 1121-1129.

Mirdha, U., Dhariwal, S., (2008). Design optimization of solar cooker, Renewable Energy, Vol 33, Pag 530-544.

NOMENCLATURA

T Temperatura (°C)

Subíndice

v : Vidrio
r : Recipiente
amb : Ambiente
f : Fluido
t : Tapa del recipiente

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

FUNCIONAMIENTO DE UNA ESTUFA SOLAR TIPO CAJA CON REFLECTORES INTERNOS BAJO LOS EFECTOS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

H. Terres, S. Chávez, A. Lizardi, R. López
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzcalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C. P. 02200, México. D. F., Tel. 5318 9061, tph@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En los diversos dispositivos que operan mediante el uso de energía solar, son muchas las variables que deben tomarse en consideración, así como su relación con los factores atmosféricos tales como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento entre otros.

En el presente trabajo, se muestra un estudio realizado mediante simulación numérica dirigido a evaluar el efecto que produce la velocidad del viento en el funcionamiento de una estufa solar con reflectores interiores.

Esta tiene dos vidrios en su tapa para disminuir las pérdidas de calor por radiación y convección, además de crear el efecto invernadero en el interior de la estufa. El interior de la estufa tiene espejos planos colocados a diferentes ángulos para reflejar la radiación solar hacia un recipiente que contiene agua y que se encentra en el interior de la estufa.

El modelo matemático utilizado en la simulación numérica toma en cuenta las ganancias y pérdidas de calor en cada componente de la estufa. Este modelo lo forma un sistema de cinco ecuaciones diferenciales que se resuelve por el método de Runge-Kutta de cuarto orden y para el cálculo numérico se utiliza un programa de cómputo desarrollado en C++.

Mediante este análisis numérico es posible obtener la distribución de temperaturas correspondientes para diferentes partes componentes de la estufa, teniéndose así una forma clara para evaluar el efecto que tiene la velocidad del viento sobre la misma. Las velocidades utilizadas en este trabajo son 0, 0.5, 1, 2 y 3 m/s.

Los resultados obtenidos muestran que la variación de la velocidad del viento no repercute de manera significativa en el calentamiento de agua y que el vidrio exterior de la tapa en la estufa es el percibe de manera importante los cambios efectivos de la velocidad del viento, lo cual afirma que este tipo de equipo puede funcionar en regiones donde las condiciones para esta variable son importantes.

ABSTRACT

For the different devices that work with solar energy, many variables should be considered like atmospheric factors, solar radiation, environment temperature and the wind velocity among others.

In the present work, numerical simulation aimed to evaluate the effect that produces the velocity of the wind in the operation of a solar cooker with inner reflectors is shown.

The solar cooker considered has two glasses in its covers to diminish the losses of heat by radiation and convection, besides creating the effect greenhouse in the interior of the stove. The interior of the cooker has flat mirrors placed in different angles to reflect the solar radiation toward a container that contains water which is centered inside of the cooker.

The mathematical model used for the numerical simulation takes into account the gains and losses of heat in each component of the cooker. This model is formed by a system of five differential equations that is solved by using the fourth order Runge-Kutta method and a computational program developed in C ++ for the numerical calculation is used.

By means of this numerical analysis is possible to obtain the distribution of temperatures for different parts in the cooker, this allow to evaluate the effect that has the velocity of the wind on the same one. The velocities utilized in this work are 0, 0.5, 1, 2 and 3 m/s.

The results obtained show that the variation of the wind velocity does not have a significant effect in the warming-up of water and the exterior glass in the cover of the cooker is where an important effect of the velocity of the wind happen, which affirms that this type of device can work in regions where the conditions for this variable is important.

Palabras claves: Estufa solar, reflectores, temperatura, simulación numérica, dispositivo solar.

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos que operan mediante el uso de energía solar, día a día se han desarrollado con miras a un mejor aprovechamiento de este tipo de energía. Este fin, ha dado propiciado el desarrollo de nuevos dispositivos para su uso en la vida cotidiana, tal es el caso de las estufas solares.

Estos dispositivos pueden ser de diferentes tipos, como son con concentradores, calentadas por medio de colectores de placa plana y de tipo caja. Entre estas últimas, las hay con reflectores externos o internos. En este trabajo se trata el caso de las estufas con reflectores internos, figura 1.

Fig. 1 Estufa solar con 3 reflectores interiores.

La estufa solar que se considera tiene en su cubierta dos vidrios para disminuir las pérdidas de calor por radiación y convección, además de crear el efecto invernadero en el interior de la estufa. El interior de la estufa está cubierto por espejos planos colocados a diferentes ángulos para reflejar la radiación solar hacia el recipiente que se encuentra en el interior y que contiene el producto a cocer, en este trabajo se utiliza agua. Figura 2.

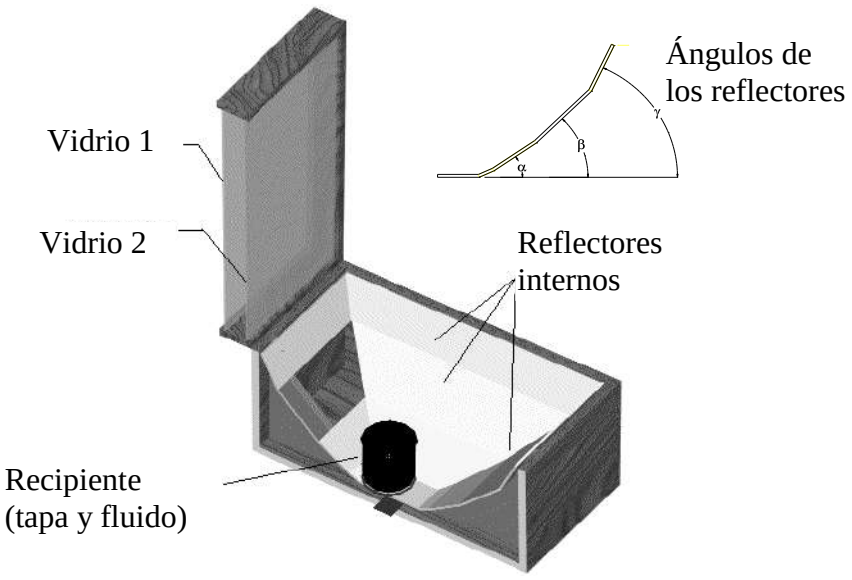


Fig. 2 Estufa solar con 3 reflectores interiores, vista interna

Debido a que el empleo de la energía solar maneja variables que no son controlables, tales son los casos de la radiación solar o la temperatura ambiente, se justifica el uso de herramientas de análisis como los métodos numéricos que se reflejan en programas de cómputo, los cuales permitan evaluar o predecir el comportamiento en el tiempo de las estufas solares.

En este trabajo se utiliza un programa de computo denominado ESCRIM [1] que considera las ganancias y pérdidas de calor que se generan por los procesos de transferencia de calor implicados para cada componente de la estufa solar, con este hecho, es posible obtener las distribuciones de temperatura para las diferentes partes de la estufa: vidrios de la tapa, tapa del recipiente, cuerpo del recipiente y el fluido utilizado en el calentamiento. El modelo matemático en el que se basa el programa ESCRIM, es un sistema de 5 ecuaciones diferenciales que se resuelven de forma numérica mediante el método de Runge – Kutta de 4° orden. El sistema de ecuaciones que es resuelto lo constituyen las ecuaciones (1) a (5).

$$m_g c_g \frac{dT_{g1}}{dt} = A_g G\alpha_g + \frac{A_g\sigma\varepsilon_g(T_{g2}^4 - T_{g1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{g1}}+\frac{1}{\varepsilon_{g2}}-1} - A_g h_{,g1-int1}(T_{g2}-T_{g1}) - A_g\sigma\varepsilon_g(T_{g1}^4 - (0.0552T_{amb}^{1.5})^4) - A_g h_{g1-amb}(T_{g1}-T_{amb}) \quad (1)$$

$$m_g c_g \frac{dT_{g2}}{dt} = \tau_g A_g G\alpha_g - \frac{A_g\sigma\varepsilon_g(T_{g2}^4 - T_{g1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{g1}}+\frac{1}{\varepsilon_{g2}}-1} - A_g h_{g2-int1}(T_{g2}-T_{g1}) + A_t\sigma\varepsilon_t(T_t^4 - T_{g2}^4) + A_g h_{g2-int2}\left[\frac{T_{g2}+T_t+T_r}{3} - T_{g2}\right] + A_r\sigma\varepsilon_r(T_r^4 - T_{g2}^4) \quad (2)$$

$$m_t c_t \frac{dT_t}{dt} = -A_t\sigma\varepsilon_t(T_t^4 - T_{g2}^4) + A_t h_{t-int2}(T_t - T_{int2}) + A_t G\tau_g^2\alpha_t - A_t h_{t-int3}(T_t - T_f) - A_t\sigma\varepsilon_t(T_t^4 - T_f^4) \quad (3)$$

$$m_r c_r \frac{dT_r}{dt} = A_r h_{t-int2}\left[\frac{T_{g2}+T_t+T_r}{3}\right] + 4\sum_{i=1}^{n}\rho A_{ref,n} G\tau_g^2\cos(90-\theta_{ref,n}) - A_r\sigma\varepsilon_r(T_r^4 - T_{g2}^4) - A_r\sigma\varepsilon_r(T_r^4 - T_f^4) - A_m h_{r-fl}(T_r - T_f) \quad (4)$$

$$m_f c_f \frac{dT_f}{dt} = A_t h_{t-int3}(T_t - T_f) + A_t\sigma\varepsilon_t(T_t^4 - T_f^4) + A_r\sigma\varepsilon_r(T_r^4 - T_f^4) + A_m h_{r-fl}(T_r - T_f) \quad (5)$$

EVALUACIÓN NUMÉRICA

Los valores numéricos de los parámetros utilizados en el programa ESCRIM, son mostrados en la tabla 1. Los datos de los coeficientes convectivos en la tabla 1 fueron obtenidos a partir de la información presentada por Thulasi, Karmakar y Rao [2], asi mismo los datos de propiedades radiativas se obtuvieron de los resultados de Habeebullah et al. [3]. Los coeficientes de la tabla 2 son obtenidos de la ecuación de Duffie y Beckman [4]. En la simulación numérica realizada con el programa ESCRIM, se consideraron los datos de temperatura y radiación solar que se muestran en la tabla 3, esta información fue recabada de manera experimental para el mes de junio de 2015

$$h_v = 5.7 + 3.8\, V_v \quad (6)$$

Tabla 1. Parámetros utilizados en el programa ESCRIM, 12 de Junio de 1998, Ciudad de México.

Variable	*Cantidad*	*Unidades*
m_r	0.2	kg
m_t	0.1	
m_f	2.0	
ρ_v	2730.0	kg/m^3
ρ_f	1030.0	
c_v	800.0	J/kg-K
c_t , c_r	900.0	
c_f *(Agua)*	3900.0	
A_t , A_{fs}	0.0201	m^2
A_r	0.0804	
ε_v	0.35	Adimensional
ε_t	0.85	
α_v	0.17	
α_r, α_t	0.9	
α_e	0.5	
$h_{v2\text{-}int2}$, $h_{r\text{-}int2}$, $h_{r\text{-}int3}$, $h_{tapa\text{-}int2}$	4.4	W/m²K
$h_{tapa\text{-}int3}$, $h_{f\text{-}int3}$, $h_{r\text{-}Am}$	4.0	

Tabla 2. Coeficientes convectivos entre el vidrio 1 y el ambiente

Caso	*Velocidad del viento m/s*	$h_{V1\text{-}amb}$ *W/m²K*
1	0.0	5.7
2	0.5	7.6
3	1.0	9.5
4	2.0	13.3
5	3.0	17.1

Tabla 3. Temperatura y radiación solar usados para determinar el comportamiento de estufas solares.

Hora (h)	*Temperatura Ambiente (ºC)*	*Intensidad de Radiación solar (W/m2)*
10:00	19.1	310
10:15	19.4	350
10:30	19.8	390
10:45	20.2	430
11:00	20.6	470
11:15	21.0	512.5
11:30	21.5	555
11:45	22.0	597.5
12.00	22.5	640
12:15	23	665
12:30	23.5	690
12:45	24	715
13:00	24.5	740
13:15	24.8	750
13:30	25.2	760
13:45	25.6	770
14:00	26	780

RESULTADOS

En las figuras 3 a 7 son mostrados de manera gráfica los resultados obtenidos mediante el programa ESCRIM. En estas figuras se han agrupado los valores para cada parte componente de la estufa, teniéndose así, una mejor visualización del efecto de la velocidad del viento. Los elementos considerados son: el vidrio 1, la vidrio 2, la tapa del recipiente, el cuerpo del recipiente y el fluido (agua).

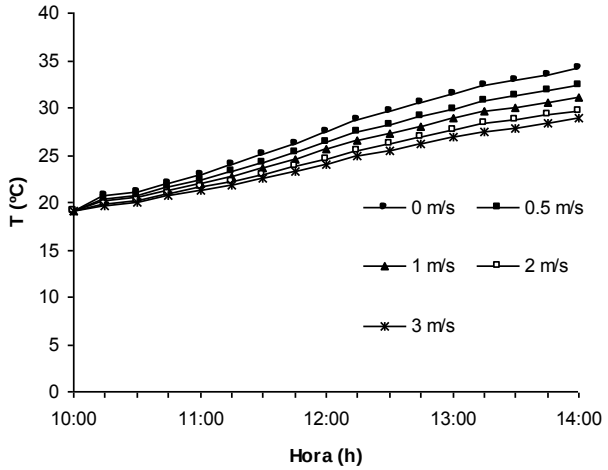


Fig. 3 Temperaturas del vidrio 1 para diferentes velocidades

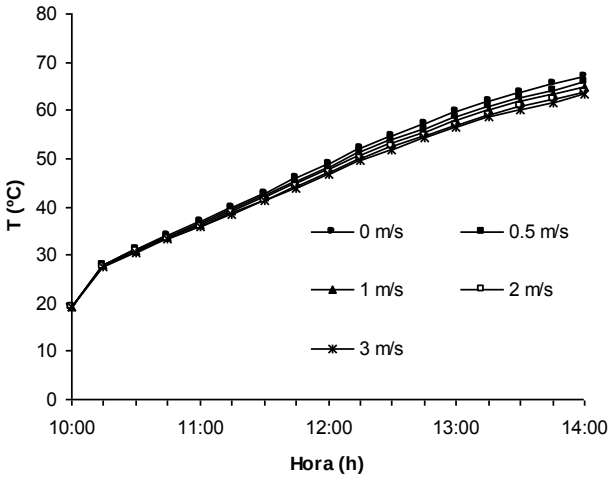


Fig. 4 Temperaturas del vidrio 2 para diferentes velocidades

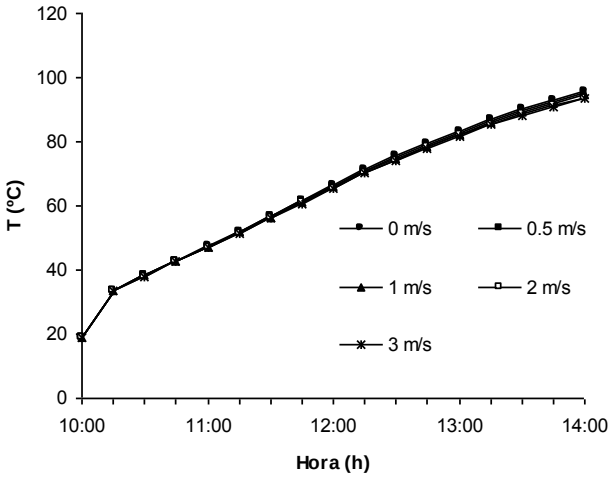


Fig. 5 Temperaturas de la tapa para diferentes velocidades

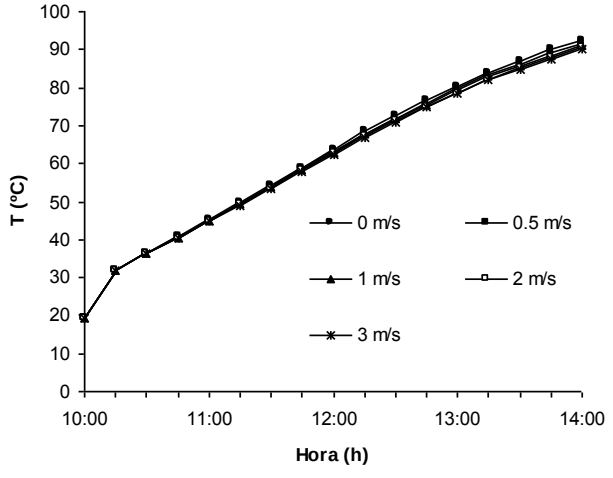


Fig. 6 Temperaturas del recipiente para diferentes velocidades

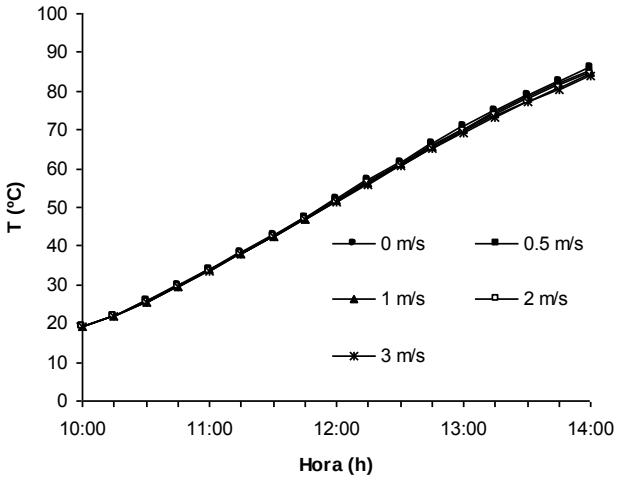


Fig. 7 Temperaturas del agua para diferentes velocidades

CONCLUSIONES

Las temperaturas máximas obtenidas para cada parte componente de la estufa, son 34.0, 67.0, 95.7, 92.5 y 86.0 ºC, que corresponden a las temperaturas del vidrio 1, vidrio 2, tapa, recipiente y agua respectivamente para las 14:00 hrs.

Cuando se comparan las diferentes temperaturas de manera agrupada, tal y como se muestran en las figuras 3 a 7, se aprecia que para el vidrio 1 que se encuentra en interacción directa con el ambiente, es el presenta los cambios mas significativos, ya que la diferencia de temperaturas para los valores de velocidad en el intervalo de 0 a 3 m/s es alrededor de 5 ºC para las 14:00 hrs.

Para este mismo tiempo, los demás componentes presentan una disminución gradual de 1 ºC para las diferencias de temperatura en el mismo intervalo de velocidad, de tal forma que se tienen 4, 3, 2 y 1 ºC para el vidrio 2, la tapa, el recipiente y el fluido.

Estos resultados permiten afirmar que la influencia del viento no afecta de manera relevante el proceso de calentamiento del agua.

En regiones donde la velocidad del viento tiene gran repercusión en los dispositivos solares, la estufa solar aquí tratada es una opción viable, restringiéndose su uso únicamente a las buenas condiciones de radiación solar del lugar en el que se use.

REFERENCIAS

Terrés Peña, H. (2002). "Diseño y evaluación numérica del funcionamiento de estufas solares tipo caja con reflectores interiores de varios pasos", SEPI-ESIME, IPN, México, D. F.

Thulasi Das T. C., Karmakar, S. y Rao D. P. (1994). "Solar Box Cooker: part I–modeling and part II–analysis and Simulation", 1994, Solar Energy, Vol. 52, No.3, pp. 274.

Habeebullah M. B., Califa, A. M. and Olwi I. (1995). The oven receiver: an approach toward the revival of concentrating solar cookers, Solar Energy, Vol. 54, No. 4, pp. 227-237.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1974). Solar energy thermal processes, Wiley intersciencie Publication, New York.

NOMENCLATURA

A: Area (m^2)
h: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/ m^2 K)
T: Temperatura (°C)
C: Calor especifico a presión constante (kJ/kg K)
G: Radiación incidente (W/m^2)
m: Masa (kg)

Subíndices

v: Vidrio
r: Recipiente
c: Convección o cielo
e: Espejo
f: Fluido
s: Superior
m: Mojada
t: Tapa

Letras griegas

σ: Constante de Steffan Boltzman (5.669 x 10-8W/m2 K4)
ε: Emitancia
α: Absortancia
τ : Transmitancia

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HfC USANDO ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

E. Manzanarez-Salazar, L.G. Ceballos-Mendivil
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuentes de Poseidón y Ángel Flores, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81233, México
Tel./FAX 01(668)8127641, **eric.manzanarez.fim@uas.edu.mx, laura.ceballos@uas.edu.mx.**

J.C. Tánori Córdova
Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México
Tel: (622)259 21 61 ext. 3000, **jtanori@polimeros.uson.mx**.

R.E. Cabanillas López
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas s/n, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000, México
Tel: (622)259 21 06, **rcabani@iq.uson.mx.**

H.I. Villafán Vidales, C.A. Arancibia Bulnes, C.A. Estrada Gasca
Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n Temixco, Morelos, C.P. 62580, México
Tel: (52)555 622 9744, **hivv@ier.unam.mx, caab@ier.unam.mx, cestrada@ier.unam.mx.**

RESUMEN

El Carburo de Hafnio (HfC) es un cerámico de ultra alta temperatura con punto de fusión de 3900°C, presenta buenas propiedades termomecánicas y termoquímicas y tiene varias aplicaciones tales como herramientas de corte, industria aeroespacial y emisores.
El HfC se sintetizó usando energía solar concentrada en el horno solar del IER-UNAM, por el método de reducción carbotérmica, lo cual conlleva al desarrollo de un proceso de producción de baja emisión de CO_2. Tetracloruro de hafnio y la pectina fueron usados como precursores de Hafnio y Carbono respectivamente, obteniendo HfC a una temperatura de 1500 °C por una hora, en atmosfera de argón. La estructura y morfología del HfC sintetizado se analizó con FT-IR, XRD y TGA/DSC. Los resultados muestran que es posible el uso de energía solar concentrada para la síntesis de HfC, así como la reducción de emisiones de CO_2.

Palabras claves: Energía solar concentrada, Horno solar, Carburo de Hafnio, Reducción carbotermica, UHTC.

ABSTRACT

Hafnium Carbide (HfC) is an ultra-high temperature ceramic with melting point of 3900°C, has good thermomechanical and thermochemical properties and has several applications such as cutting tools, aerospace industry and emitters.
HfC was synthesized using concentrated solar energy in the solar oven IER-UNAM, via carbothermal reduction, which leads to the development of a production process low CO_2 emissions. Hafnium tetrachloride and pectin were used as precursors of hafnium and carbon respectively, obtained at a temperature HfC 1500°C, 1 h, under argon. The structure and morphology of HfC obtained was analyzed with FTIR, XRD and TGA/DSC. The results show that it is possible to use concentrated solar energy for synthesis of HfC's and reduce CO_2 emissions.

Keywords: Concentrated solar energy, Solar furnace, Hafnium carbide, Carbothermal reduction, UHTC.

INTRODUCCIÓN

A medida que los recursos fósiles disminuyen y las emisiones de CO2 aumentan, se busca el desarrollo de nuevos programas de energías renovables, debido a que provienen de recursos fácilmente restituibles. Con la creciente demanda de energía a nivel mundial, la energía solar mitiga el uso de hidrocarburos. La energía solar se divide en dos tipos: energía fotovoltaica, la cual usa el fenómeno fotoeléctrico para generar electricidad, y energía fototérmica, que usa un proceso termodinámico para generar energía eléctrica. La energía fototérmica, además, se ha implementado en hornos solares para concentrar temperaturas hasta de 3000°C en corto tiempo, para sintetizar materiales verdes tales como: cerámicos, nanomateriales, tratamiento térmico de materiales y degradación de compuestos, entre otros. El HoSIER es un horno de alto flujo radiativo que forma parte del Laboratorio Nacional de Concentración Solar y Química Solar (LACyQS) localizado

en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Autónoma de México. Este horno solar tiene el poder de 25 kW con picos de concentración de hasta 18,000 soles (1 sol=1 kW/m^2) en una zona focal produciendo una imagen solar de 8 cm de diámetro (Riveros-Rosas et al., 2010). Los componentes principales del HoSIER son tres: un concentrador de 409 espejos concentradores hexagonales, un heliostato de 81 m^2 de superficie y una cortina de 42.2 m^2 localizada entre el heliostato y los concentradores (Estrada et al., 2011).

Los materiales cerámicos se pueden clasificar en espumas cerámicas, óxidos cerámicos y cerámicas de ultra alta temperatura (UHTCs). Las UHTCs son materiales refractarios que ofrecen una excelente estabilidad térmica a temperaturas mayores de 2000°C, con buenas propiedades físicas y químicas. Las UHTCs están conformadas por carburos, nitruros, boruros y metales de transición (Johnson, 2011).

El HfC ha sido estudiado debido a sus aplicaciones de ultra-alta temperatura, debido a su elevado punto de fusión (3900°C), así como buenas propiedades termomecánicas y termoquímicas. El HfC tiene varias aplicaciones tales como herramientas de corte, toberas de cohetes y emisores (Matović et al., 2014).

Hay varios métodos de síntesis de HfC, siendo el más utilizado el método de reducción carbotérmica, el cual se realiza a menores temperaturas comparado a otros métodos con diferentes tiempos de síntesis, usando diversos materiales como precursores: hidruro de hafnio, tetracloruro de hafnio, dióxido de hafnio como fuentes de hafnio; grafito, pectina y acido acrílico como fuente de carbono, entre otros (Sacks, Wang, Yang, & Jain, 2004; Patra, Nasiri, Jayaseelan, & Lee, 2016).

Para la síntesis de carburo de hafnio hay nula información usando hornos solares, existiendo reportes sólo de síntesis de HfC usando hornos convencionales (hornos tubulares principalmente).

En el presente trabajo se ha sintetizado HfC usando energía solar concentrada por medio del horno solar HoSIER, el cual se encuentra en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Autónoma Nacional de México, localizado en Temixco, Morelos, por medio del método de reducción carbotermica, usando tetracloruro de hafnio (HfCl4) y pectina (C6H10O7) como precursores de hafnio y carbono respectivamente.

METODOLOGIA

El tetracloruro de hafnio ($HfCl_4$) y la pectina se obtuvieron de la compañía Sigma-Aldrich, los cuales se usaron como precursores en la sintesis del HfC.

El complejo pectina/hafnio se preparó disolviendo la pectina en agua destilada con agitación magnética continua a 60°C. Se agregó una cantidad de $HfCl_4$ a la solución de pectina en relación 1:4 molar de tetracloruro de hafnio y pectina. La mezcla de la solución se agitó durante 3 horas a 60°C. Las muestras se pre-secaron a 110°C por 24 h en un horno de secado para remover el agua, obteniendo un polvo de color amarillo, para posteriormente moler el producto resultante en un mortero ágata. El polvo molido se llevó después a un calentamiento por 30 min a 200°C bajo vacío de 20 mmHg para promover el cruzamiento del precursor y obtener un polvo negro más fino. Este nuevo polvo precursor se coloca en un crisol de zirconia, el cual se introduce en un reactor dentro del HoSIER del IER-UNAM, localizado en la ciudad de Temixco, Morelos, México.

El crisol de grafito con el polvo precursor del complejo hafnio/pectina, obtenido a 200°C, colocado dentro del reactor, es calentado con radiación solar concentrada, a una temperatura de 1500°C por una hora, en atmósfera de Argón (99.99% puro, 5 mL min^{-1}) para evitar la oxidación.

El espectro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) del complejo pectina/hafnio se obtuvo en el rango de los 4000 a 500 cm^{-1}, usando un espectrofotómetro marca Bruker Alpha. El análisis térmico simultáneo se llevó a cabo en el analizador térmico-diferencial termogravimétrico (TGA-DSC, SDT Q600 V20.9 Build 20) bajo atmosfera de nitrógeno. Los patrones de difracción de rayos X se obtuvieron usando un difractómetro de rayos X controlado (RIGAKU DMAX220, IER-UNAM, México) usando Cu Kα1 de radiación λ=1.542 Å.

RESULTADOS Y DISCUSION

El espectro de FT-IR tal como se muestra en la Fig 1 muestra el complejo hibrido de pectina/hafnio a 110°C, los picos característicos asignados al O-H (3393cm^{-1}) indicando que este participa en la formación del complejo hibrido. Se observa en el espectro de infrarrojo los enlaces (C-O) y C-C en longitudes de onda de 952, 1018, 1049, 1102 y 1147 cm^{-1} correspondientes a los enlaces glucósidos de la pectina. Los picos en las longitudes de onda de 1744, 1636 y 1449 cm^{-1} correspondientes a la región del grupo carboxílico (C=O) asignados al estiramiento asimétrico de los grupos carboxilo metilados y simétrico de (COO^-), también una pequeña intensidad a los 2935 cm^{-1} correspondiente al enlace C-H. Cuando la pectina quela al hafnio se forma una estructura cíclica. En el complejo hibrido de Pectina/Hafnio a 200°C en vacío, el pico de absorción (C=O) de la pectina desaparece dejando un fuerte pico de (C=C). Estos resultados indican que el pico de absorción (C=O) muestra importantes desplazamientos hacia el rojo después de la quelación de iones de hafnio.

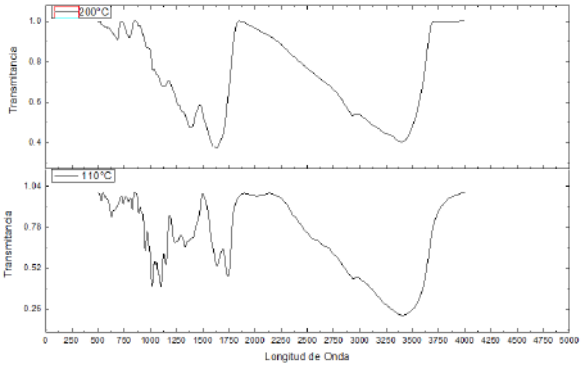


Fig 1. Espectros de FT-IR de los complejos híbridos de pectina/hafnio a 110°C en aire y 200°C en vacío.

El analisis termogravimétrico como se muestra en la Fig 2 se usó para investigar la descomposición, estabilidad, pureza y rendimiento. En la Fig 2 se muestran las curvas del complejo de pectina/hafnio obtenido en atmosfera de nitrógeno de 25 a 1400°C. El analisis por TGA del complejo muestra una considerable pérdida de peso de 10% que ocurre a ~200°C debido a la evaporación de agua fisisorbida. Una alta pérdida de masa de aproximadamente un 30% a los 600°C debido a la descomposición de los azucares de la pectina resultando la formación de carbono. Un decremento del 5% aproximadamente de los 800 a los 1300°C debido a la evaporación de impurezas orgánicas e inorgánicas. En el DSC se muestra un pico endotérmico aproximadamente a los 150°C debido a la evaporación del agua y la oxidación del hafnio a partir de los 300°C. la reducción carbotermica se comienza a dar a los ~1250°C.

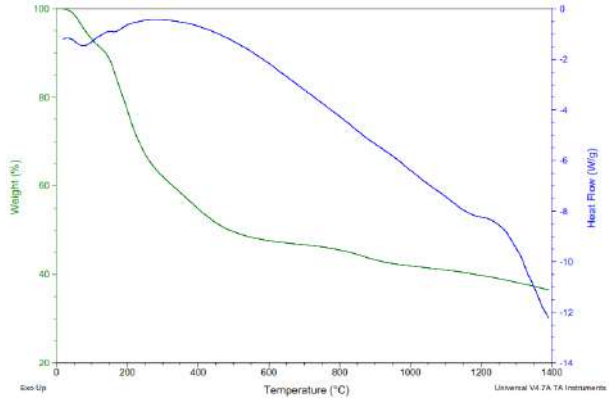


Fig 2. Curva de secado del complejo hibrido pectina/hafnio por media de TGA-DSC.

El XRD en polvos se hizo a una temperatura de 1500°C donde se observa primeramente la obtención de un material solido cristalino en la que predominan los picos de HfC con una fase secundaria de hafnia, así como su fase cristalina principal (BCC).

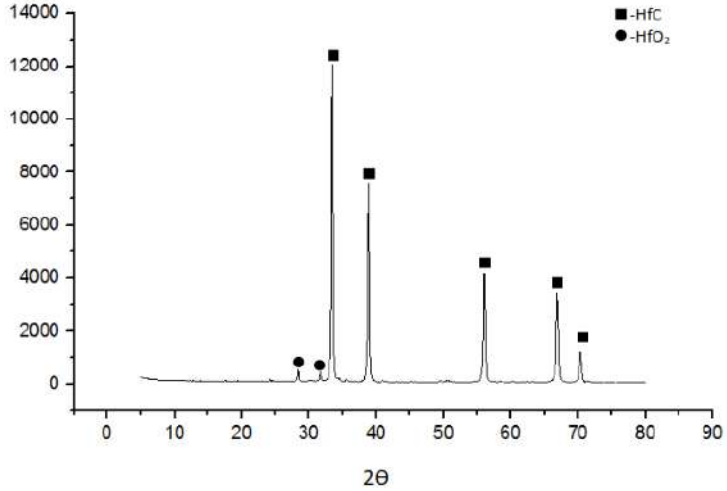


Fig 3. Patrón de XRD del HfC a 1500°C.

CONCLUSIONES

Se obtuvo HfC con la ayuda del método de sol-gel por medio del método de reducción carbotermica usando energía solar concentrada una temperatura de 1500°C, esto como una alternativa para la sintesis de materiales verdes, que ayuden a la disminución de emisiones que generan los métodos convencionales (hornos eléctricos).

AGRADECIMIENTOS

A CONACyT por la beca otorgada de manutención y mixta, a la Facultad de Ingeniería Mochis por brindarme las instalaciones y equipos necesarios para realizar parte del proyecto, al Instituto de Energías Renovables y su cuerpo académico, así como a los asesores que me auxiliaron en el proyecto.

REFERENCIAS

Estrada, C. A., Arancibia-bulnes, C. A., Vazquez, S., Pérez-rábago, C. A., Perez-enciso, R., Quiñones, J., … Granados, F. (2011). A New high-flux solar furnace at CIE-UNAM in Temixco , 3–7.

Johnson, S. M. (2011). Ultra High Temperature Ceramics: Application, Issues and Prospects.

Matović, B., Bučevac, D., Maksimović, V., Nenadović, S., Pantić, J., Gautam, D., & Yano, T. (2014). Synthesis and Characterization of Hafnium Carbide Based Ceramics. *Key Engineering Materials*, *616*, 1–7. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.616.1

Patra, N., Nasiri, N. Al, Jayaseelan, D. D., & Lee, W. E. (2016). Low-temperature solution synthesis of nanosized hafnium carbide using pectin. *Ceramics International*, *42*(1), 1959–1963. http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.166

Riveros-Rosas, D., Herrera-Vázquez, J., Pérez-Rábago, C. A., Arancibia-Bulnes, C. A., Vázquez-Montiel, S., Sánchez-González, M., … Estrada, C. A. (2010). Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico. *Solar Energy*, *84*(5), 792–800. http://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.002

Sacks, M. D., Wang, C. A., Yang, Z., & Jain, A. (2004). Carbothermal reduction synthesis of nanocrystalline zirconium carbide and hafnium carbide powders using solution-derived precursors. *Journal of Materials Science*, *39*(19), 6057–6066. http://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000041702.76858.a7

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SISTEMA DE CAPTACIÓN SOLAR

Itantii Cuevas Cuevas
Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas Blvd. Universitario #100 Tijuana Baja California, itantii.cuevas@uabc.edu.mx
Ixchel Astrid Camacho Ixta, Miguel Isaac Sahagun Valenzuela
Ciencias y Artes para el Diseño, Doctorante en Diseño, Arquitectura Bioclimática, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, C.P. 02200, Ciudad de México, Distrito Federal, Tel.(664) 33 12 29 3, ixchel_ixta@hotmail.com
Eric Efren Villanueva Vega
División en Energías renovables, Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas Blvd. Universitario #100 Tijuana Baja California

RESUMEN

En los últimos años, la radiación solar ha aumentado por lo que podemos aprovechar esta emisión del sol al realizar sistemas térmicos de captación solar. En México, existen condiciones geográficas y sociales que hacen factible el uso de sistemas térmicos, porque es un país que se localiza en una región con un alto índice radiación anual.

En el captador solar se utiliza la radiación solar para lograr calentar un fluido líquido o gaseoso. Por estas condiciones se puede aprovechar en los diferentes; estados por mencionar algunos, Baja California, Sonora, Chihuahua, Sinaloa que son lugares con una radiación más intensa, sin embargo cabe mencionar que con el cambio de clima esto se puede llevar a cabo en toda la república mexicana.

La propuesta es realizar un sistema de captación solar para mejorar las condiciones de vida y una forma viable para los habitantes que requieran de un sistema de captación económico. Está relacionado con la arquitectura bioclimática porque consiste en un diseño que toma en cuenta las condiciones y el aprovechamiento de la radiación solar.

El sistema se implementa como calentador de agua solar casero que consta de botellas de plástico; material reciclado, que se sitúan en forma tendida en un elemento rígido. El material reciclado está unido de manera vertical para que el fluido circule y mientras realice este proceso en cada botella la radiación del sol caliente los fluidos. Debido a que en el captador hay pérdidas de calor en su estructura habrá tubos de acero inoxidable; con recubrimiento de color negro para una mayor captación de radiación, con alas hechas de latas recicladas que tendrán la función de aislar elementos exteriores que pueden disminuir la temperatura de los fluidos líquidos o gaseosos.

Este sistema brindara beneficios, primeramente aprovechar la radiación solar del estado de Baja California y sonora y con esto un ahorro de gas. También la reutilización de material y un sistema más económico en comparación con el captador solar plano y el captador sin cubierta.

ABSTRACT

In recent years, solar radiation has increased so we can take this issue from the sun to make solar thermal systems capture. In Mexico, there are geographical and social conditions that make possible the use of thermal systems, because it is a country that is located in a region with a high rate annual radiation.

In the solar collector solar radiation is used to heat a liquid or gaseous fluid. For these conditions can be exploited in different; to name a few states, Baja California, Sonora, Chihuahua, Sinaloa are places with more intense radiation, however worth mentioning that with climate change this can be carried out throughout the Mexican republic.

The proposal is to make a solar collection system to improve living conditions and a viable way for people requiring a system of economic pickup. It is related to bioclimatic architecture because it consists of a design that takes into account the conditions and the use of solar radiation.

The system is implemented as solar water heater home consisting of plastic bottles; recycled material, which are placed lying in a shaped rigid element. The recycled material is attached vertically to fluid flow and while performing this process in each bottle hot sun radiation fluids. Because the sensor is no heat loss in its structure will be stainless steel tubes; coated black for further uptake of radiation, with wings made of recycled cans that have the function of isolating external elements that can decrease the temperature of liquid or gaseous fluids.

This system would provide benefits, primarily harnessing solar radiation Baja California and Sonora and thereby saving gas. Also the reuse of materials and a more economical system compared with the flat solar collector and the collector without cover.

Palabras claves: Bioclimática, Calentador solar, Material reciclado, Radiación solar, Temperatura, Transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar transporta energía esta conducción es la que calienta el planeta tierra. Como referencia de la radiación solar solo el 47/% llega al planeta tierra, de este porcentaje el 21% lo absorbe la superficie terrestre.

Es por ello que podemos utilizar esta energía para implementar un captador solar. Las características del captador solar son la utilización de material reciclado como las botellas de plástico y latas de aluminio, la utilización de acero por sus características de mayor conductividad térmica en comparación con el tubo de pvc, manguera de plástico para servir como conductor del agua entre el calentador y el termo tanque. Los beneficios es brindarle un sistema económico a la población que no cuenta con los recursos suficientes así como también reutilizar materiales.

Baja California al ser uno de los estados con mayor radiación solar, se consideró aprovechar esta para realizar un captador solar de agua. En México existen condiciones para aprovechar esta radiación solar ya que en el norte del país cuenta con una radiación promedio de 6.3 kWh/m2 por día. (Institito de investigaciones Eléctricas)

Además de ser utilizado en el estado de Baja california se puede utilizar en los estados de Sonora, Sinaloa y Chihuahua, Baja California Sur y Durango.

ZONA GEOGRÁFICA

La ubicación en donde se realizaron las mediciones es en la Escuela de las Ciencias y la Tecnología en Valle de las palmas, Tijuana, Baja California con coordenadas 32°43’ latitud norte, 117°79’ longitud oeste.

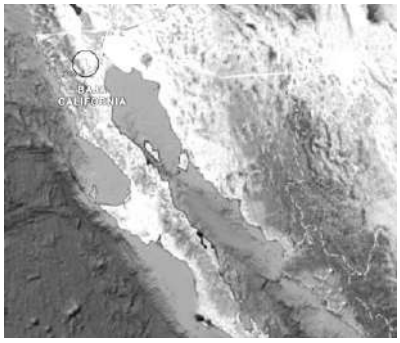


Figura 1 Localización

Clima

El clima del municipio es del tipo mediterráneo, templado, semiestepario con temperaturas que oscilan de 15°C la más baja y de 36°C más alta. (California, 2015)

TRANSFERENCIA DE CALOR

El sol es el principal elemento de energía con el que el planeta tierra cuenta, este emite radiación en forma electromagnética entre ellas está la que se conoce como visible y ultravioleta.

La luz que irradia el sol es transformada en calor, por medio de ondas electromagnéticas. Es una estrella formada en su mayoría por hidrogeno y en pequeña proporción de helio, que desarrolla una gran cantidad de energía debido a la reacción nuclear de fusión. Para indicar la posición del sol se puede realizar respecto a un punto situado sobre la superficie terrestre, esto mediante tres ángulos; La declinación, la latitud que es el ángulo comprendido entre el paralelo del lugar y el ecuador y por último el ángulo horario que indica en ángulo comprendido entre el plano meridiano que pasa por el punto considerado y el plano meridiano que pasa por el sol. (Jutglar, 2004)

El calentador solar absorbe la energía y la transforma en calor, esta transmisión de calor se realiza por medio de conducción, convección y radicación.

La conducción funciona cuando entra en contacto la luz con un objeto, esta energía la transfiere al agua debido al movimiento de átomos, moléculas, iones y electrones. La radiación no necesita ningún medio para hacer contacto en cambio la convección necesita ser de solido a liquido o de solido a gaseoso. A parte de conducir calor por estos tres medios también existen perdidas de calor por medio de la radiación y convección. (Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, 2012)

La energía solar traspasara la botella de plástico absorbiendo el calor y conduciéndolas a las placas en forma de alas, estas absorberán la energía conduciéndola en toda la superficie que toquen las alas para que con ello al final se obtenga el calentamiento de los fluidos.

Se utiliza tubo de acero para debido a que el coeficiente de conductividad térmica es de 47-58 W/(m·K), es una cifra más alta en comparación a utilizar tubos de PVC que cuentan con 0.012 W/(m·K) de conductividad térmica.

Efecto invernadero

A efecto invernadero se le conoce como el fenómeno por el que los gases atrapan cierta parte de la energía que el suelo emite por calentarse debido a la radiación solar.

La radiación solar pasa a través de la atmosfera libre de obstáculos, esta energía solar queda atrapada en la botella de plástico evitando que la energía vuelva al espacio, es decir, que la radiación se conduce por ondas electromagnéticas que se trasladan a través del vacío y son absorbidas a las alas negras y a su vez hacia el tubo de acero. La radiación infrarroja es absorbida y provoca en efecto invernadero en la botella de plástico, permitiendo que existan menos perdidas en comparación si estuviera al aire libre.

TÉCNICA

La construcción de este calentador solar de agua es para aprovechar la radiación solar que tenemos en el norte del país, así como también utilizar material reciclado como las botellas de plástico y las latas de aluminio y con esto beneficiar a familias con la finalidad de obtener un sistema accesible en el aspecto económico como constructivo y desarrollar una vida sustentable.

La técnica de poner el captador solar sobre la superficie con dirección al sur por la orientación del sol; de este a oeste.
En Valle de las palmas, Baja California; lugar donde se realizó la medición de temperaturas, se orientó al sur (alfa) a 32 grados de inclinación (beta), esta inclinación es para obtener una mejor radiación solar, ya que se inclina de acuerdo a la orientación del sol, está situado en un punto sobre la superficie terrestre al termo tanque para que conforme a las propiedades del agua cuando se caliente este se dirija por medio de la gravedad al termo tanque. Los rangos de inclinación que se pueden utilizar son a partir de 30 grados a 40 grados ya que estos son intervalos para que no se encuentre tan pegado al suelo o tan inclinado que impida una mayor absorción de radiación solar.

Figura 2 Calentador solar

Materiales

Tabla 1. Materiales a utilizar

Material	Conductividad térmica K[=] J/s.m.gC
Botellas de plástico	0.24
Latas de aluminio	220
Tubo de acero inoxidable ½''	46.50

Los materiales que se encuentran en la tabla cuentan con una conductividad térmica que permite calentar los fluidos. A parte de utilizar los materiales de la tabla también se utilizan mangueras que servirán de unión con el tubo de acero inoxidable y permita la conducción del agua; una cuenta con 100 centímetros de longitud esta será ubicada en la parte superior del calentador dirigido al termo tanque, la segunda tiene una longitud de 250 centímetros dirigida de la parte inferior del termo tanque hacia el calentador, llaves; para asegurar la unión del tubo de acero inoxidable y las mangueras.

La utilización de botellas de plástico es para realizar el efecto invernadero y así tener una absorción de energía y que esta permanezca en el envase y no rebote al espacio, también se usa con el fin de evitar el enfriamiento del agua por conducción del aire hacia el tubo de acero. Mantienen parte de su forma original ya que se corta la parte superior de las botellas con el fin de obtener un cilindro y de esta manera se pueda ensamblar uniformemente.

Para las latas de aluminio se corta la parte superior y la parte inferior, la forma cilíndrica obtenida se extiende para obtener una placa rectangular que mide 12 cm de ancho por 20 cm de largo, obteniendo de área 240cm2.

Se unen dos placas de aluminio para formar aletas, dejando en medio al tubo de acero, es decir como un sándwich, las placas se engrapan para tener mayor contacto con el acero; así la radiación solar llega a las alas y esta entra en contacto con el tubo con ello calentando toda la superficie en contacto, el hecho de utilizar las aletas es con el beneficio de tener más áreas cubiertas por elementos que cuentan con conductividad térmica y con la finalidad de mantener la radiación obtenida.

La forma de las aletas es de forma rectangular con una ligera inclinación al centro para la radiación entre en contacto con el material, las ondas electromagnéticas se concentre mayormente en donde existe contacto con el tubo de acero inoxidable, se agregan dos placas ya que si solo tuviera una placa esta solo calentaría la mitad de la superficie del tubo y la otra mitad tendría perdidas de calor debido a que no existe un contacto completo. La utilización del color negro pálido es por la cualidad de absorción la radiación solar, es el color que se utiliza debido a la conducción que tiene cuando la energía entra en contacto con un elemento.

Las aletas se colocan con una separación aproximada de 3 centímetros en el tubo de acero inoxidable de ½'' de 120 centímetros, dejando como mínimo 10 centímetros a las orillas. Ya realizada la colocación de 4 aletas se añade la serie de botellas de plástico que mide 100 centímetros, de esta manera queda concluida la instalación de materiales.

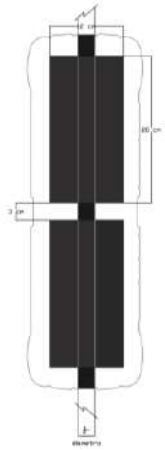


Figura 3 Esquema de medidas

Una vez obtenido el embotellamiento se instalan las mangueras, quedando dentro el tubo de acero inoxidable, se coloca una llave sobre ambas mangueras evitando pérdidas por el fluido del agua. La manguera dirigida de la parte inferior del termo tanque al calentador, es la conectora del agua fría hacia el calentador solar, es aquí donde empieza el fluido constante del agua. La manguera que está ubicada en la parte superior del calentador, sirve de conector del agua que ya fue calentada hacia el almacén del termo tanque, este almacén cuenta con propiedades para mantener a la misma temperatura que fue ingresada el agua.

Haciendo referencia a este termo tanque fue trabajo de Ingenieros Renovables de quinto semestre, este galón tiene capacidad de 20 lts.

Instalación y medición

Para el cálculo del calentamiento del agua se utilizó dos sensores tipo k; entre el tubo de acero y la manguera, multímetro; medidor de la temperatura de entrada y salida del agua y Solar power meter; medidor de la radiación solar.

El calentador se orientó al sur (alfa) a 32 grados de inclinación (beta) con respecto al suelo en Valle de las Palmas, Baja California. El primer cálculo se realizó fue el día Martes 14 de Junio del 2016, el agua entro a 29 ºC, se tomó en un intervalo de una hora, teniendo como temperatura final 34.5 ºC. Solo se realizó la prueba de una hora ya que aún no se contaba con el medidor de radiación solar; solar power meter.

Tabla 2. Medición martes 14 de junio

Hora	Ti	Tf
14:50	29	33.2
14:55	29.6	34.4
15:10	32.3	34.4
15:20	28.7	34.2
15:45	30.2	34.5

El segundo cálculo se orientó de igual manera, este se realizó el día Miércoles 15 de Junio del 2016, la entrada del agua fue de 24.2 con una radiación de 1315 w/m2, para este se tomó de intervalo 3 horas y la radiación solar de valle de las palmas. La diferencia final fue de 4.5 grados teniendo en cuenta que solo se realizó con una fila de una serie.

Tabla 3. Medición miércoles 15 de junio

Hora	Ti	Tf	Radiación
11:10	24.2	28.5	1315
11:35	25.5	30.8	1345
11:50	25.1	31.6	
12:05	25.2	32.6	1392
12:20	26	33.3	
12:35	25.7	33.0	1292
12:50	28.1	36.7	
13:05	28	26.8	1294
13:20	28.2	36.9	
13:35	27.5	36.4	1206
13:50	29.6	38.1	1192
14:05	30	38.3	1054
14:20	32.5	37	1032

Esta prueba fue más específica ya que se contempló la radiación solar de la mañana-tarde, debido a que en este intervalo de horas el sol se encuentra en su punto más alto y la radiación solar se puede utilizar a favor, para verificar los cambios de temperatura. La medición de la radiación solar se tomó la primera vez para ver cómo se encontraba al inicio de la prueba y compararlo con el final, esta medición se fue alternando de tal manera que después se midieron cada 30 minutos y al final se midieron cada 15 centímetros para ver si existía un rango máximo de cambio a los que habíamos observado.

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos los datos de la medición de temperaturas el mes de Junio se obtuvo una diferencia de temperaturas el primer día, 14 de Junio fue de 4.2 a 5.5 grados, al finalizar se obtuvo una diferencia de 4.3 alcanzando una temperatura de 34.5 ºC. El segundo día, 15 de junio, se obtuvo una diferencia de temperaturas de 4.3 a 8.9 grados, la última medición alcanzó una temperatura de 37 ºC.

Para esta última medición se consideró un rango de 3 horas debido a que podíamos observar si existía un cambio drástico de temperaturas con respecto a la disminución del calentamiento del agua o si existía una diferencia en la radiación solar.

Observamos que la temperatura del agua empezaba a subir muy lentamente, pero conforme fue pasando el tiempo hubo un incremento de temperatura, pese a que después fue bajando la radiación solar la temperatura del agua no descendio, esto nos dio como resultado que las aletas funcionaron de manera correcta permitiendo conservar la temperatura del agua.

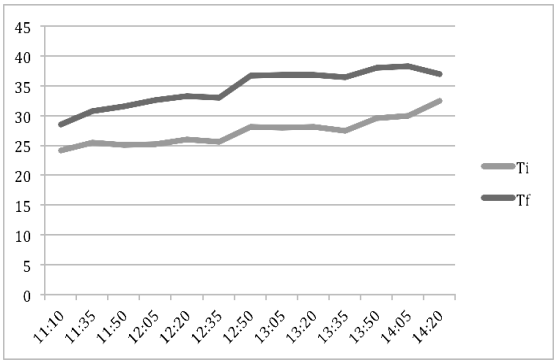


Figura 4 Temperatura de entrada y salida del agua

Obtuvimos un buen resultado, al alcanzar una diferencia notable de temperaturas entre la temperatura de entrada y salida del agua con referencia a la tabla 3, en esta se consideró la radiación solar para tener un mayor rango de mediciones y ver los factores que intervenían en el calentamiento de los fluidos. Observamos en la figura 4 que conforme transcurría el tiempo de medición el agua iba aumentando su

temperatura. De acuerdo a este incremento de la temperatura del agua, observamos que existieron 3 aumentos notables uno a las 12:50 el segundo una hora después; 13:50 y el tercero a las 14:05.

En cuanto a los materiales se consideró utilizar botellas de plástico y latas de aluminio; material reciclado, con el fin de realizar un sistema factible; en el que se pudieran utilizar materiales que tenemos a la mano, económico y practico.

Considerando que solo se realizó un prototipo de una serie de botellas y se obtuvo un buen resultado de diferencias de temperaturas, de tal manera se considera que realizando una serie de filas de botellas se puede obtener un mejor resultado ya que intervienen más elementos del calentador. Con más series de botellas el fluido prolongaría su recorrido y estaría aumentando y conservando aún más su temperatura esto con la finalidad de generar un mejor resultado al logrado en esta prueba.

REFERENCIAS

California, G. d. (2015). Gobierno del Estado Baja California. Obtenido de http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/tijuana/tijuana.jsp

Institito de investigaciones Eléctricas. (s.f.).

Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn. (2012). Principios de transferencia de calor (Vols. 9,17,21). Cengage Learning Editores.

Jutglar, L. (2004). Energía solar. Barcelona, España: Ceac.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONCENTRADORES SOLARES TIPO CPC BAJO ORIENTACIÓN NORTE-SUR Y ESTE-OESTE

J.A. Aguilar-Jiménez, N. Velázquez, R. López-Zavala, A. Acuña, F. Castellanos-Balderas, J. Álvarez
Centro de Estudios de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California,
Calle de la normal s/n Col. Insurgentes, Mexicali, B.C., 21280, México, Tel. +52-686-148-65-75, **armando.jaaj@gmail.com**

RESUMEN

Los concentradores parabólicos compuestos (CPC) presentan ventajas en comparación de otros tipos de tecnologías solares, ya que estos pueden operar sin la necesidad de un sistema de seguimiento, concentran radiación directa y difusa, son de bajo costo y pueden alcanzar temperaturas de hasta 150°C, suficiente para su uso en el sector industrial, comercial y doméstico como fuente de energía. Sin embargo, la orientación es parte fundamental de este tipo de tecnología, al limitarnos las horas de captación por no contar con un sistema de seguimiento. El objetivo principal de este trabajo es el estudio experimental de dos módulos CPC con distinta orientación del absorbedor (Norte-Sur vs Este-Oeste). Los módulos están compuestos por cuatro CPC cada uno, con una relación de concentración de 2.18 y un ángulo medio de aceptancia de 24.30°, resultado de haber truncado uno de 2.42 de relación de concentración. El absorbedor es un tubo de cobre con un tubo interior concéntricamente posicionado, para provocar más tiempo de residencia del fluido caloportador y reducir el área transversal. Los resultados indican que la eficiencia óptica es mayor en la orientación Este-Oeste y esta se mantiene solamente cuando se trabaja en rangos de temperatura bajos, además de que provee más horas de concentración al día, dando una captación de calor útil mayor. En el caso de la orientación Norte-Sur, el tiempo de captación se ve reducido por el ángulo de aceptancia del CPC, pero este opera más eficientemente durante ese periodo de concentración.

Palabras claves: concentrador solar, CPC, calentamiento de agua, eficiencia térmica

ABSTRACT

The compound parabolic concentrators (CPC) have advantages compared to other types of solar technologies, as these can operate without the need for a tracking system, concentrated direct and diffuse radiation, they are inexpensive and can reach temperatures up to 150°C, sufficient for use in industrial, commercial and domestic sectors as energy source. However, the orientation is a fundamental part of this technology, to limit the hours of energy captation for not having a tracking system. The main objective of this work is the experimental study of two modules of CPC with different absorber orientation (North-South vs East-West). The two modules are compounds of four CPC each, with a concentration ratio of 2.18 and half acceptance angle of 24.30°, truncated result of one with 2.42 of concentration ratio. The absorber is a copper tube positioned concentrically with an inner tube, to cause more residence time of the heat transfer fluid and reduce cross-sectional area of the tube. The results indicate that the optical efficiency is higher in the East-West direction and this is maintained only when work in low temperature ranges, plus it provides more hours of concentration a day, giving a greater captation of useful heat. In the case of North-South orientation, the captation time is reduced by the acceptance angle of the CPC, but it operates more efficiently during this period of concentration.

Keywords: solar concentrator, CPC, water heating, thermal efficiency

INTRODUCCIÓN

En los años recientes, el consumo de combustibles fósiles y el uso de clorofluorocarbonos se han acelerado y ha provocado efectos negativos en el medio ambiente como lo es el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono y la contaminación atmosférica. Se necesitan nuevas formas de conversión de la energía más eficientes, que no contaminen nuestro ambiente y que ayuden a lograr un desarrollo sustentable, es decir, tener un espacio propicio para la vida de los seres vivos. Las fuentes de energía renovables son parte fundamental para combatir los cambios que hemos estado presenciando, de una forma limpia y sustentable.

Las tecnologías de concentración solar son consideradas candidatas como nuevas fuentes de energía limpia, barata y eficiente. Los concentradores parabólicos compuestos son colectores que pueden funcionar según la temporada o anualmente con mínimos requerimientos de seguimiento, ya que tienen la capacidad de reflejar al receptor toda la radiación incidente en la apertura, si está dentro los rangos del ángulo medio de aceptancia, θ_c, del CPC [1]. Bajo esta premisa, la radiación difusa dentro de $\pm\theta_c$ también es redirigida y aprovechada por el receptor. Los CPC fueron desarrollados en el año de 1966 paralelamente en Estados Unidos por Hinterberger and Winston [2] y en la USSR por Baranov and Melnikov [3], posteriormente en el año 1974, Winston presentó las bondades de utilizar este tipo de óptica para colectar energía solar [4].

Diferentes autores [1, 5] mencionan que una orientación lógica para este tipo de colectores cilíndricos es a lo largo del eje horizontal Este-Oeste, inclinado hacia el ecuador y ajustable sobre el mismo eje, con el fin de obtener una mayor cantidad de energía anualmente sin la necesidad de un seguimiento solar continuo. Carvalho *et al* [6] presentaron los diseños óptimos para colectores CPC con absorbedores de tubos no evacuados, donde en la orientación Este-Oeste una concentración de 1.3-1.4 y un θ_c de 30º es la adecuada, y para el caso de la orientación Norte-Sur una concentración de 1.0 y un ángulo θ_c de 60º. Nkwetta and Smyth [7] realizaron la evaluación experimental de dos colectores heat pipe con tubo evacuado, encontrando que en la posición Norte-Sur se presentaba con un coeficiente global de pérdidas, U_L, menor que en la posición Este-Oeste, 1.39 y 3.52 W m^{-2} K^{-1} respectivamente, pero la eficiencia óptica era mayor en esta última posición cuando se trabajaba en rangos de temperatura menores.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La geometría básica de este tipo de concentradores con receptor tubular se muestra en la Fig. 1, donde las secciones *AC* y *BD* son parte de una parábola, y las secciones *CO* y *DO* son involuta. Un CPC ideal con altura *h* suele truncarse a una altura *h´* para ahorrar material en su construcción, sacrificando un poco de concentración [8].

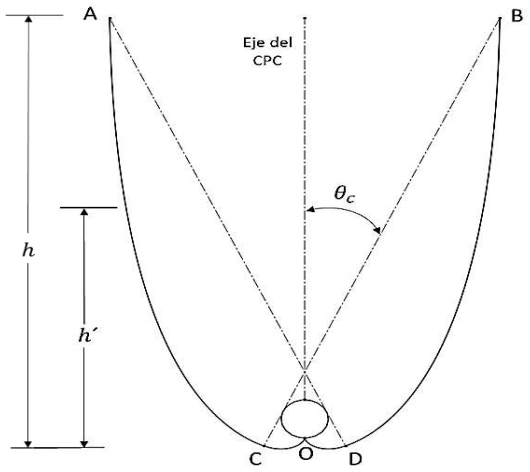


Figura 1. Geometría de un CPC con receptor tubular

Los dos módulos CPC que se utilizaron en la experimentación están formados por cuatro cavidades reflectivas cada uno, la cual presenta una geometría reflectiva de dos parábolas y dos involutas; tienen una relación de concentración de 2.18 y un θ_c de 24.30°, resultado de haber truncado uno de 2.42 de relación de concentración. Un concentrador se encuentra posicionado verticalmente (dirección del absorbedor Norte-Sur) y el otro horizontal a la superficie (dirección del absorbedor Este-Oeste); cada módulo cuenta con una área de apertura de 2.26 m^2, protegida con una cubierta transparente. Como mecanismo de absorción se tienen tuberías de cobre concéntricamente posicionadas, el tubo exterior e interior tienen un diámetro de 0.04 m y 0.02 m respectivamente, de modo de que el fluido ingresa al colector por el tubo interior y regresa por la sección anular del tubo exterior; este último cuenta con un recubrimiento de la marca SOLKOTE para mejorar las propiedades absorbentes del cobre. En la Tabla 1 se muestran las características de los colectores.

Tabla 1. Características de los colectores CPC

Cantidad de concentradores	4 por colector
Dimensiones	1.18 x 2.00 x 0.27 m
Ángulo de aceptancia	24.30°
Concentración	2.18
Diámetro tubo exterior	0.04 m
Diámetro tubo interior	0.02 m
Material tubos	Cobre
Espesor cubierta	0.003 m
Transmitancia cubierta	0.89
Reflectancia lámina	0.93
Absortancia recubrimiento	0.89

METODOLOGÍA

Se construyó un banco de pruebas de colectores solares, bajo el estándar "ANSI / ASHRAE 93-2010 Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors" [9] con el fin de analizar el comportamiento térmico de distintas tecnologías de calentamiento solar. El sistema cuenta con una bomba rotativa de paleta, tanque de almacenamiento, tanque de expansión, separador centrífugo y dos disipadores de calor. Se tienen instalados sensores de temperatura del tipo RTD PT100 (detector de temperatura resistivo) con una resistencia de 100 ohms a 0°C, colocados en la entrada y salida de cada colector, salidas de los disipadores y uno más para la temperatura ambiente; se tienen dos transmisores de presión a la entrada y salida, medidor de flujo del tipo turbina justo antes de la entrada a los concentradores y dos piranómetros en el plano de cada colector. Este banco de pruebas se encuentra ubicado en la ciudad de Mexicali, en la plataforma solar del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) de la Universidad Autónoma de Baja California. En la Fig. 2 se muestran los colectores CPC del estudio con una inclinación de 32° y las orientaciones empleadas.

Figura 2. Colectores solares CPC en la plataforma solar del CEENER

El sistema emplea agua destilada como fluido caloportador, de modo que la bomba provoca su circulación en dirección a los colectores, entrando al CPC vertical (orientación norte-sur), su salida se encuentra conectada a la entrada del CPC horizontal (orientación este-oeste), estando estos conectados en serie; también se cuenta con tuberías para trabajar en paralelo los colectores o para aislarlos si se desea realizar pruebas a uno solo. El fluido a la salida de los concentradores, dependiendo de las temperaturas presentadas, se puede encontrar en dos fases, las cuales son apartadas en un separador centrífugo para después ser enfriadas cada una en los disipadores de calor para llevarlos a condiciones ambientales; el fluido, ya como líquido, es llevado de vuelta al tanque de almacenamiento para iniciar el ciclo de nuevo. Dentro del tanque de almacenamiento se cuenta con resistencias eléctricas para incrementar la temperatura del fluido y realizar las pruebas pertinentes bajo distintas circunstancias, además de que se pueden aislar los disipadores del circuito para aprovechar la energía conseguida por los CPC. Como se comentó anteriormente, el θ_c es de 24.30°, teniendo así un periodo de aproximadamente 3.2 horas al día ($2\theta_c = 48.60°$) de concentración para el colector con el absorbedor en posición vertical (en adelante llamado CPC4-1) dada su

posición. En la Fig. 3 se muestra el trazado de rayos para la geometría de los colectores con diferentes ángulos de incidencia en el área de apertura.

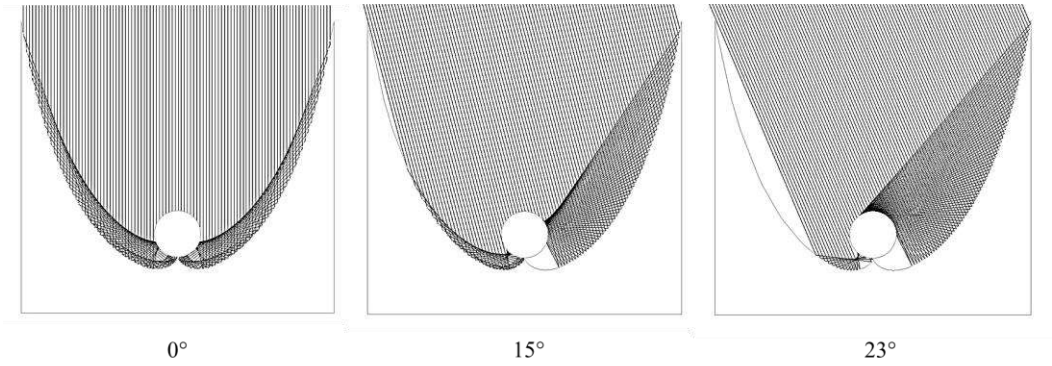


Figura 3. Distintos ángulos de incidencia sobre la geometría del CPC

El θ_c es muy importante para conocer en que horario va a estar concentrando el CPC4-1 y poder realizar las pruebas; en este caso como se encuentra orientado directamente hacia el sur, operará aproximadamente 1.6 horas antes y después del medio día solar. En el caso del colector con el absorbedor en posición horizontal (en adelante llamado CPC4-2), el θ_c nos dirá en qué fecha del año estaremos concentrando (dependiendo la altura solar). Para obtener una comparación de desempeño más exacta, de las dos posiciones de los CPC, se deben de obtener las curvas de eficiencia de ambos bajo las mismas condiciones de operación. Según el estándar ASHRAE [9], la eficiencia instantánea se calcula por la ecuación

$$\eta_{ins} = \frac{q_u}{A_C G} = \frac{\dot{m} C_P (T_{fo} - T_{fi})}{A_C G} \tag{1}$$

donde η_{ins} es la eficiencia instantánea, q_u el calor útil, $\dot{m}$ el flujo másico, C_P el calor específico del agua, T_{fo} la temperatura a la salida del colector, T_{fi} la temperatura a la entrada del colector, A_C el área de apertura del colector y G la radiación global en el plano del colector. Los valores de eficiencia calculados con la Ecuación (1) son graficados contra el parámetro $(T_{fi} - T_a)/G$ para obtener la curva de eficiencia que caracteriza a cada colector, donde T_a es la temperatura ambiente.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron una serie pruebas a los colectores CPC bajo días soleados y en ocasiones con nublados, con una inclinación de 32°, flujo másico de 0.033 kg/s y orientados al sur; la salida del CPC4-1 se encontró conectada a la entrada del CPC4-2, dando una conexión en serie entre los dos equipos. En las Fig. 4 y 5 se pueden apreciar las condiciones ambientales, temperaturas de operación y eficiencias instantáneas para dos días de pruebas, 13 de Abril y 14 de Abril del 2016. En la primera de ellas los disipadores de calor a la salida de los colectores se encontraban encendidos, por lo cual la temperatura de entrada al CPC4-1 se consideró la misma a la ambiente[1], además de que la temperatura de salida del CPC4-1 se consideró la misma a la entrada del CPC4-2[1]. En la segunda prueba los disipadores se encontraban aislados y apagados, con el fin de conseguir una diferencia de la temperatura de entrada con la del ambiente más alta, por lo cual solamente se consideró la temperatura de salida del CPC4-1 igual a la temperatura de entrada del CPC4-2. En las gráficas se presenta la hora civil de la región, si se quiere conocer la hora solar, el factor de corrección es de 39.5 minutos menos que la civil.

En la Fig. 4 se observa un nivel de radiación alto, normal para la ciudad de Mexicali, Baja California en esas fechas, sin nublados o bloqueos en el cielo; la prueba se inició poco antes de las 10:00 y se mantuvo monitoreando hasta las 14:00, la temperatura ambiente se mantuvo relativamente constante. Se aprecia un incremento en la eficiencia del CPC4-1 en las primeras horas de la prueba y llegando esta a su punto máximo durante el periodo de las 11:20 a las 14:20, luego comienza a descender al igual como fue su incremento, esto se debe al θ_c y su posición Norte-Sur, que durante ese periodo de tiempo la radiación solar lograba ser concentrada. El CPC4-2 desde el inicio de la prueba lograba una eficiencia alta en comparación a las primeras horas del CPC4-1, pero con el paso del tiempo y el incremento en su temperatura de entrada, que corresponde a la salida del CPC4-1, su eficiencia se ve disminuida justo cuando el primero presenta su máxima concentración; esta a su vez vuelve a incrementar con respecto la temperatura de entrada disminuye.

[1] Para efectos de cálculo de eficiencias sí se tomaron las temperaturas reales del ambiente y a la entrada del CPC4-2

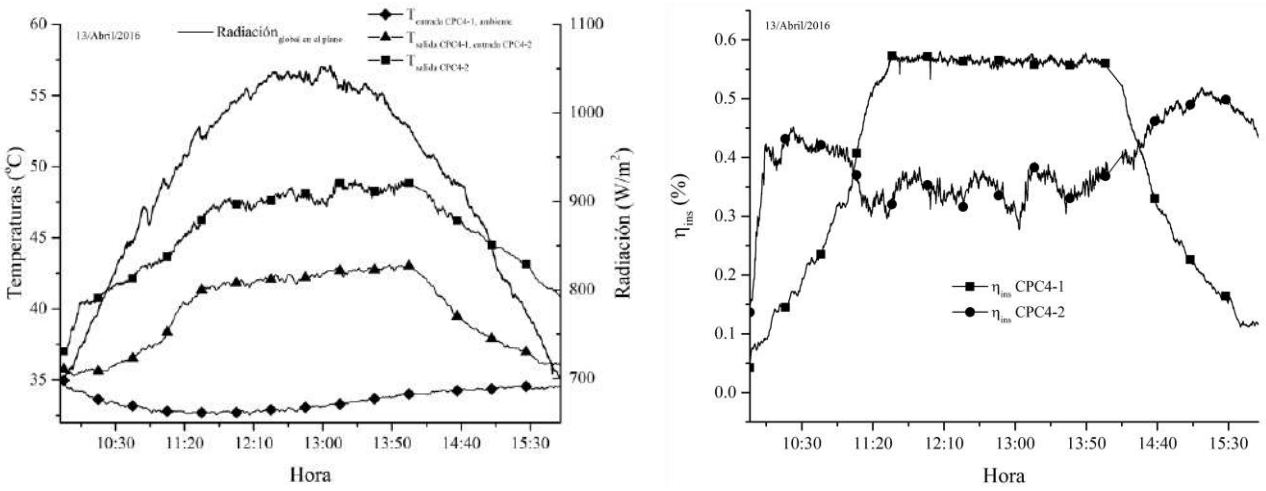


Figura 4. Temperaturas, radiación y eficiencias instantáneas de los CPC el 13 de Abril del 2016

La Fig. 5 muestra el comportamiento de los colectores bajo un día con nublados, pero en los intervalos sin obstrucciones presentaba un alto nivel de radiación; la temperatura ambiente no varió significativamente. La temperatura de entrada del CPC4-1 inició más alta que la ambiental debido a que se tenía almacenada la energía térmica de la prueba del día anterior. Durante el transcurso de la experimentación, 10:30 a 16:00, como los disipadores se aislaron del circuito, la temperatura de entrada fue incrementando conforme los colectores lograban concentrar la energía solar. El comportamiento de las eficiencias es muy similar a la prueba anterior, solo que por la intermitencia de la radiación, presenta muchas oscilaciones. Se aprecian niveles más bajos de eficiencias instantáneas para el CPC4-1, debido principalmente al incremento en su temperatura de entrada.

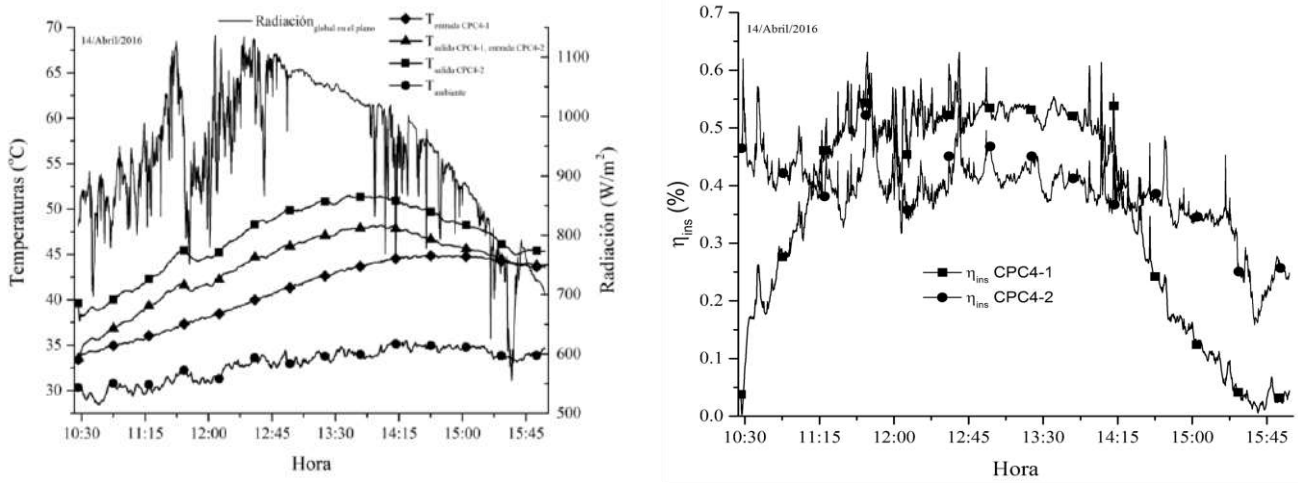


Figura 5. Temperaturas, radiación y eficiencias instantáneas de los CPC el 14 de Abril del 2016

En la Fig. 6 se presenta la curva característica de eficiencia para el CPC4-1 en posición Norte-Sur y el CPC4-2 en posición Este-Oeste; se realizó un ajuste lineal para obtener las correlaciones de las variables que intervienen en el proceso de calentamiento. Se puede observar como la curva del CPC4-1 tiende a permanecer en niveles altos de eficiencia a pesar de los incrementos en las diferencias de temperaturas involucradas, mientras que el rendimiento del CPC4-2 tiende a disminuir con respecto la diferencia de temperaturas se incrementa, esto debido a que su coeficiente de pérdida de calor es mayor. Cabe señalar que la información correspondiente al CPC4-1 solo se pudo tomar durante el intervalo de tiempo en el que este concentraba. La posición Norte-Sur puede ser utilizada cuando se trabaje en modo termosifón por la facilidad que tendría el fluido de subir al tanque de almacenamiento y poder trabajar en un rango de temperaturas más elevadas que en la posición Este-Oeste.

En la tabla 2 se presentan las ecuaciones características de los dos colectores, se puede apreciar que el coeficiente de pérdidas para el CPC-2 es casi del doble, perjudicando de manera sustancial su rendimiento térmico, obligando a trabajar en niveles bajos de temperaturas. Para el caso del CPC4-1 presenta menos pérdidas de energía y permite trabajar en un rango más alto de temperaturas eficientemente.

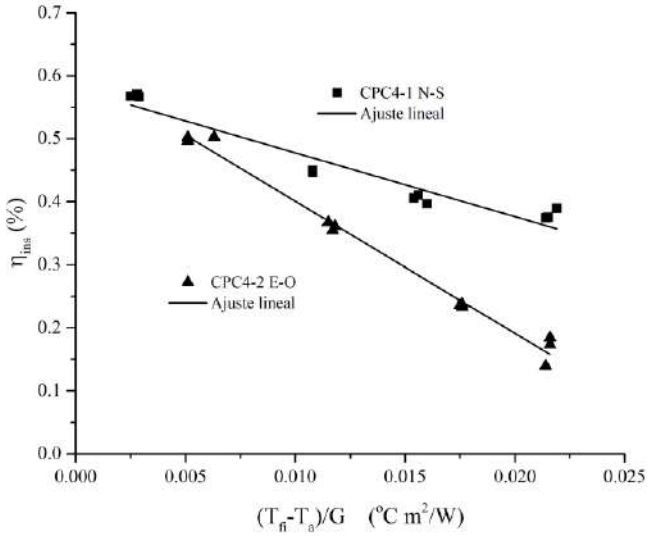


Figura 6. Curva característica de eficiencia de los colectores CPC

Tabla 2. Caracterización de los colectores CPC

Colector Solar	Ecuación característica de eficiencia	Eficiencia óptica (%)	Coeficiente de pérdida de calor ($W\ m^{-2}/^oC^{-1}$)
CPC4-1 N-S	$n = 0.578 - 10.13\ (T_{fi} - T_a) / G$	57.88	10.13
CPC4-2 E-O	$n = 0.610 - 20.93\ (T_{fi} - T_a) / G$	61.01	20.93

CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas experimentales a dos colectores CPC con distinta orientación del tubo absorbedor, Norte-Sur y Este-Oeste, bajo las mismas condiciones de operación, encontrándose que la eficiencia óptica en la orientación Este-Oeste es mayor y esta se mantiene solamente cuando se trabaja en rangos de temperatura bajos (cuando $(T_{fi} - T_a) / G$ es menor a 0.003). El uso del CPC4-1 para calentamiento de agua por el efecto termosifón puede ser una buena aplicación por la facilidad que tendría el fluido de ser almacenado en un tanque en la parte superior del colector y la circulación que tendría el fluido dentro del sistema, pero es necesario un incremento en el ángulo medio de aceptancia para tener más tiempo de concentración dentro del mismo. La posición del CPC4-2 provee una mayor captación de energía útil por su mayor tiempo de concentración, aunque trabaje de una manera menos eficiente. Como se comprobó, las pérdidas de energía en cada colector son muy elevadas, aún en el CPC4-1, esto no permite utilizarlos en procesos que necesiten temperaturas altas de operación. Como futuros trabajos se propone un análisis de exergía en los principales subsistemas de los concentradores, para identificar y disminuir las pérdidas de calor y operar más eficientemente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT- SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA por el apoyo recibido a través del proyecto P09 del CEMIE-Solar

REFERENCIAS

[1] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4 edition. Wiley, 2013.
[2] H. Hinterberger y R. Winston, "Efficient Light Coupler for Threshold Čerenkov Counters", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 37, núm. 8, pp. 1094–1095, ago. 1966.
[3] V. K. Baranov y G. K. Melnikov, *Sov. J. Opt. Technol.*, vol. 33, p. 408, 1966.
[4] R. Winston, "Principles of solar concentrators of a novel design", *Sol. Energy*, vol. 16, núm. 2, pp. 89–95, oct. 1974.
[5] S. P. Sukhatme, *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage*. Tata McGraw-Hill Education, 1996.
[6] M. J. Carvalho, M. Collares-Pereira, y J. M. Gordon, "Economic Optimization of Stationary Nonevacuated CPC Solar Collectors", *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 109, núm. 1, pp. 40–45, feb. 1987.
[7] D. N. Nkwetta y M. Smyth, "Comparative field performance study of concentrator augmented array with two system configurations", *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 800–808, abr. 2012.
[8] A. Rabl, "Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators", *Sol. Energy*, vol. 18, núm. 6, pp. 497–511, ene. 1976.
[9] ASHRAE, "Methods of testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors". ASHRAE 93, 2010.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

METODOLOGÍA EXÉRGICA COMO POTENCIALIZADOR EN LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN TERMOSOLAR

Ricardo L.Z., Nicolás V. L., Luis, G. U., Álvarez-Mancilla, Saúl I.P., Francisco, C.B. Armando, A.J.
Centro de Estudios de las energías Renovables, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B. C., C. Electrónico:
rlopez99@uabc.edu.mx, nicolas.velazquez@uabc.edu.mx, gonzalezl18@uabc.edu.mx, jeronimo.alvarez@uabc.edu.mx,
islass@uabc.edu.mx, francisco.castellanos.balderas@uabc.edu.mx, a1116072@uabc.edu.mx

RESUMEN

Los investigadores tecnólogos buscan el desarrollo de máquinas que aprovechen al máximo los recursos energéticos logrando que estas sean más eficientes, compactas, de bajo costo de inversión inicial, bajo costo de operación, amigables con el medio ambiente además de larga vida útil. Una manera de lograrlo es aplicando la Metodología de Análisis Exérgico la cual permite saber cómo son utilizados los recursos energéticos suministrados al sistema y tener un mayor entendimiento de la manera en que se maneja, transforma y conserva la energía; permitiendo detectar las irreversibilidades determinando su magnitud, tipo y localización. Lo anterior permite, en base a indicadores exergéticos, identificar si el sistema puede mejorar modificando las condiciones de operación o modificando el diseño del proceso, enfocando así, los esfuerzos en el desarrollo de la innovación tecnológica.

En este estudio teórico se realiza la MAE en un ciclo de enfriamiento por absorción BrLi/H_2O de simple efecto activado a 100°C bajo las condiciones de Mexicali, B.C. con una capacidad de enfriamiento de 23 kW, el calor suministrado al generador de 31.58 kW, el calor disipado en el condensador y absorbedor es de 24.28 kW y 30.35 kW respectivamente. La temperatura de evaporación y condensación es de 1.5°C y 40°C respectivamente con un COP de refrigeración de 0.7242 en 1ra. ley de la termodinámica. Los resultado muestran que las irreversibilidades totales del sistema son de 4.02 kW donde el generador representa el 24.5% del total de las irreversibilidades, el evaporador el 12.78% seguidos del absorbedor y condensador con 32.51% y 14.74% respectivamente. El COP_Ψ es de 0.1778. Se presenta una discusión sobre cómo los resultados obtenidos por la MAE, pueden llevar a los investigadores tecnólogos a la innovación tecnológica en máquinas y procesos termosolares.

Palabras claves: Metodología, Exergía, Enfriamiento, Innovación, Termosolar.

ABSTRACT

Researchers technologists seek to develop machines that maximize energy resources making these more efficient, compact, low initial investment cost, low operating cost, environmentally friendly addition to long life. One way to achieve this is by applying the methodology exergyc analysis which allows to know how to use energy resources are supplied to the system and have a greater understanding of how it is handled, transforms and conserves energy; allowing to detect the irreversibilities determining its magnitude, type and location. This allows, based on exergy indicators, identify whether the system can be improved by modifying the operating conditions or modifying the design process and focusing the efforts on the development of technological innovation.

In this theoretical study, the MAE is performed in a cooling cycle by absorption LiBr / H2O simple activated effect at 100 °C with a cooling capacity of 23 kW, the heat supplied to the generator 31.58 kW, the heat dissipated in the condenser and absorber is 24.28 kW and 30.35 kW respectively. The evaporation and condensation temperature is 1.5 °C and 40 °C respectively with COP in cooling the first law of thermodynamic is 0.7242. The results show that total irreversibilities of the system are 4.02 kW where the generator represents 24.5% of the total irreversibilities, the evaporator is 12.78%, the absorber and condenser followed with 32.51% and 14.74% respectively. The COP in second law is 0.1778. In this paper showing a discussion of how the results obtained by the MAE, the results can lead a technologists and researchers to technological innovation in machines and thermal processes.

Palabras claves: Metodology, Exergy, Cooling, Innovation, Termosolar.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso eficiente de los recursos energéticos con la implementación de las energías renovables está tomando gran importancia en el desarrollo de tecnologías y procesos industriales; esto debido al incremento del precio de los combustibles fósiles y a la disminución de la disponibilidad de estos en mediano plazo Bejan (1978). Las condiciones económicas y ambientales también potencializan la necesidad de optimizar los procesos térmicos con la finalidad de consumir el mínimo de energía o en términos de la metodología de análisis exérgico (MAE), los equipos y procesos se deben diseñar para que trabajen con el mínimo de generación de entropía o con el mínimo de destrucción de la exergía (Velázquez, N. V. y Best, R. W. (2001)). La MAE parte de la aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica en equipos y procesos térmicos, como los de enfriamiento por absorción o cualquier otro, indicando la forma en que los sistemas hacen uso de los recursos energéticos e indica la magnitud, localización y como se están presentando las irreversibilidades indicándole a los investigadores tecnólogos, cuáles son los equipos en que se deben enfocar los esfuerzos de investigación y desarrollo para conseguir unidades de enfriamiento compactas, de baja inversión inicial, con la máxima integración energética interna, de bajo costo de operación y mantenimiento, además de hacerla más eficiente y amigable con el medio ambiente.

El lograr desarrollar nuevas unidades de enfriamiento por absorción siendo estas novedosas y eficientes, generalmente lleva a sistemas complejos de cogeneración o trigeneración basados en la integración energética interna de sus corrientes convirtiéndose, en ocasiones, en sistemas con más elementos lo que implica que aun siendo más eficientes pueden llegar a no ser viables pues es mayor la inversión inicial, costo de operación y mantenimiento. Llegar a diseñar sistemas eficientes y viables tecnológicamente no se logra simultáneamente ni sólo con la eureka del investigador, realmente para que el investigador logre esa chispa debe tener un conocimiento pleno de las tecnologías además de ubicar en estas cuáles son los elementos del sistema con mayor potencial de mejoramiento. Por esta razón en el presente artículo se realiza un estudio teórico, por medio de la MAE, un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto utilizando como fluido de trabajo BrLi/H_2O, buscando minimizar la destrucción de la exergía, logrando con esto, potencializar el desarrollo de nuevas tecnologías de enfriamiento por absorción; además de proponer a la MAE, mediante su interpretación, como una herramienta de análisis que potencialice la generación de la eureka que necesita el investigador para desarrollar tecnologías novedosas y eficientes que mejoren la calidad de vida de las personas.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ABSORCIÓN

La máquina de enfriamiento por absorción BrLi/H_2O de baja capacidad marca SHANDONG LUCY modelo TX-23 tiene una capacidad de 23kW de enfriamiento, la cual es activada aprovechando la energía termosolar por medio de un fluido caloportador proveniente de concentradores solares. La máquina se encuentra ubicada en la ciudad de Mexicali, B.C. en el Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) del Instituto de Ingeniaría de la UABC. La unidad de enfriamiento se encuentra constituida principalmente por los siguientes componentes: generador (GEN), evaporador (EVA), absorbedor (ABS), recuperador de calor (HX), bomba de recirculación (B), una válvula de expansión de solución (VS) y otra de refrigerante (VR); en la siguiente Figura 1 se muestra un esquema de la máquina.

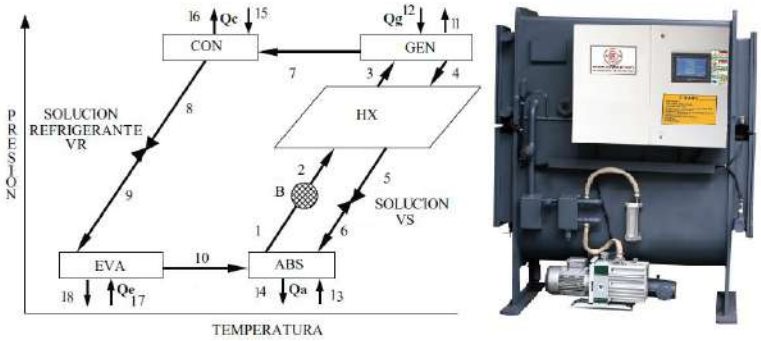


Figura 1.- Diagrama de Diuring de la máquina LUCY TX-23 de simple efecto BrLi/H2O y una fotografía de esta.

En el caso de una máquina de absorción que funciona con LiBr/H_2O como fluido de trabajo el absorbente es el bromuro de litio y el agua es el refrigerante. La disolución contenida en el absorbedor y que contiene mayor concentración de refrigerante (corriente 1) es bombeada hasta el generador que trabaja a alta presión, antes de llegar al generador, la disolución (corriente 2) entra a un recuperador de calor e intercambia calor sensible con una disolución rica en absorbente que viene del generador (corriente 4) aproximando a ambos caudales a las condiciones de saturación necesarias para la absorción y la generación respectivamente, reduciendo la carga térmica del absorbedor y del generador, y mejorando sustancialmente la eficiencia. Una vez que el fluido de trabajo se encuentra en el generador se le aplica calor proveniente de los concentradores solares (corriente 11) por medio de un fluido caloportador alcanzando la temperatura de ebullición y logrando separar vapor de refrigerante de la disolución, quedando esta, rica en absorbente (bromuro) para después ser llevada al absorvedor. El vapor de refrigerante que sale del generador (corriente 7) es llevado hasta el condensador donde se transforma a fase líquida (corriente 8) a la temperatura de condensación cediendo calor al fluido de enfriamiento que viene de enfriar al absorvedor (corriente 15) y que posteriormente es dirigido hacia la torre de enfriamiento (corriente 16), posteriormente pasa a través de una válvula de expansión en un proceso isoentálpico en el cual reduce su presión evaporándose parcialmente (corriente 9) y reduciendo su temperatura hasta la de evaporación; en estas condiciones el refrigerante es llevado al evaporador y se completa su evaporación quedando completamente saturado (corriente 10) y en estas condiciones accede al absorbedor donde se pone en contacto con la disolución concentrada procedente del generador, que absorbe el vapor y lo transforma en estado líquido (calor de condensación), al mismo tiempo que diluye la disolución en bromuro de litio (calor de dilución).

El uso de la energía en sistemas de enfriamiento se evalúa a través del Coeficiente de Operación (COP) mostrado en la ecuación (1). A través de este parámetro se compara el efecto útil del ciclo con la energía consumida para producirlo. En el caso de máquinas frigoríficas, como la descrita, el COP se define como el cociente entre la potencia frigorífica obtenida en el evaporador Q_{ev} y la potencia suministrada al generador Q_{gen}, en palabras simples es el cociente del efecto deseado entre lo que cuesta energéticamente conseguirlo.

$$COP_t = \frac{Q_{ev}}{Q_{gen}} \tag{1}$$

PUNTO MUERTO O ESTADO DE REFERENCIA

Por definición la exergía destruida es el producto de la entropía generada ΔS_g en un sistema por la temperatura del punto muerto o de referencia T_0 (Herold, et al., 1996). Se entiende por temperatura del punto muerto como la condición natural a la que todas las sustancias tienden a equilibrarse y que es una restricción que pone el ambiente cuando se quiere aprovechar las condiciones en las que se encuentra una sustancia o corriente (Nicolás,2002); considerando lo anterior, la exergía se define como el potencial máximo de trabajo que tiene una sustancia, corriente de flujo, sistema o una forma determinada de energía con respecto al estado muerto (Nicolás,2002). La sustancia al ser

llevada al punto muerto está en equilibrio térmico, mecánico y químico por lo cual no es posible que realice cualquier trabajo. Aunque el estado muerto está definido como se mencionó anteriormente, este ha generado diversas interpretaciones lo que ha hecho que para el análisis exérgico el punto muerto pueda considerarse en base a 5 modelos (Ibrahim D. and Marc A.R.,2007): El primer modelo es el *subsistema natural ambiental* en el que principalmente se toma aire o agua a 25°C y 1 atm., el segundo modelo es en *referencia a la substancia* en el cual se toma como punto de exergía cero a los elementos con menor exergía de los más abundantes en el medio ambiente según Szargut (1967) también dentro de estos modelos se puede considerar de manera arbitraria la substancia de referencia según Sussman (1980, 1981); el tercero es el modelo de *equilibrio* en el cual se toman todos los materiales presentes en la atmósfera, océanos y capa de la corteza de la tierra y se agrupan como una composición de equilibrio a 25 °C está modelo es propuesto por Ahrendts (1980), dicho modelo es poco aplicado y no recomendando. El cuarto modelo es el de *equilibrio restringido* también propuesto por Ahrendts (1980) y es una modificación del tercer modelo en este no se considera la formación de ácidos nítricos; el quinto modelo es el *dependiente del proceso* en el cual sólo se consideran los componentes que intervienen en el proceso cuando es evaluado en estado estable y a temperatura y presión ambiente, este modelo es propuesto por Bosnjakovic (1963).

En el presente estudio se considera el primer modelo el cual es el más común y permite, al utilizar una sustancia como el agua o el aire, poderse comparar contra otro sistema que utilice el mismo criterio de punto muerto. Es importante una buena elección del modelo de estado muerto pues se quiere mejorar un proceso y se toma un punto de referencia ilógico o no adecuado, los resultados de la MAE podrían indicar que un proceso tiene mucho o poco potencial de mejoramiento cuando realmente no sería así para las condiciones naturales del proceso.

ESTUDIO POR SEGUNDA LEY APLICANDO LA MAE

La metodología MAE considera que se tiene un proceso de flujo estacionario y aplica el principio de la primera ley de la termodinámica, es decir, se asume que la cantidad de energía que entra en un volumen de control en todas sus formas como lo son calor, masa y trabajo debe ser igual a la cantidad de energía que sale del volumen de control como se aprecia en la ecuación (4), el estudio en primera ley muestra como fluye la energía en el sistema; posteriormente se aplica un análisis por segunda ley de la termodinámica; aquí se asume que se tiene un sistema abierto en estado estable donde existen varios flujos de materia entrando y saliendo del sistema, intercambiando calor con manantiales caloríficos a diversas temperaturas y produciendo trabajo útil, despreciando la energía cinética y potencial de las corrientes (Nicolás,2002). Despreciando la exergía química la expresión general para el análisis exérgico se muestra en la ecuación (5) con lo que se puede determinar la exergía destruida en un sistema durante un proceso según lo planteado por (Nicolás, 2002). Donde Q es el calor transferido, W es el trabajo que entra o sale del sistema, h es la entalpía de las corrientes del proceso y m es el flujo másico de las corrientes de entrada y salida del sistema.

$$\sum_{entra} Q + \sum_{entra} W + \sum_{entra} mh = \sum_{sale} Q + \sum_{sale} W + \sum_{sale} mh \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_{e,i}\psi_{e,i} + \sum_{i=1}^{n} Ex_{Q,i} - T_0\Delta S_g = \sum_{i=1}^{n} m_{S,i}\psi_{S,i} + W_U \tag{3}$$

El estado muerto impacta directamente en la exergía de trabajo, es sabido que el potencial de trabajo de la energía transferida de una fuente térmica a temperatura T es el máximo trabajo que puede obtenerse de esa energía al llevarla al estado muerto a una temperatura T_0, siendo equivalente al trabajo producido por una maquina térmica de Carnot operando entre la fuente y el ambiente. El calor es una forma de energía desorganizada y solo una porción de él puede convertirse en trabajo, que es una forma de energía organizada (segunda ley) (Cengel, Y.,2012). La transferencia de calor Q en una ubicación que se encuentra a temperatura termodinámica T siempre está acompañada por la transferencia de exergía X_Q en la cantidad de:

$$\chi_Q = (1 - T_0 / T)Q \tag{4}$$

El flujo másico es un mecanismo para transportar exergía, entropía y energía dentro o fuera de un sistema. Cuando una cantidad de masa m entra o sale de un sistema, la acompaña una cantidad de exergía $m\Psi$, donde $\Psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$. Sustituyendo la ecuación (7) y la la exergía de flujo en (6) y reacomodando términos tenemos una expresión simplificada y general para determinar la exergía destruida en un proceso.

$$\Delta Ex = T_0\Delta S_g = \sum_{i=1}^{n} m_{e,i}\psi_{e,i} - \sum_{i=1}^{n} m_{S,i}\psi_{S,i} + \sum_{i=1}^{n}\left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right)\overset{0}{Q}_i - W_U \tag{5}$$

Donde $T_0\Delta S_g$ es la exergía destruida, $Ex_{Q,i}$ es definida como la exergía de calor, W_U es el trabajo útil, $\Psi_{e,i}$ y $\Psi_{s,i}$ es la exergía de flujo de entrada y salida del sistema respectivamente. Aplicando la ecuación (6) en cada dispositivo del sistema se realizan los balances exérgicos en los equipos y en el sistema de manera global. En el estudio por segunda ley de los sistemas de enfriamiento por absorción, se utilizan indicadores para poder representar que tan bueno es el funcionamiento de la máquina, el indicador más utilizado es el COPψ (Coeficiente de Operación Exérgico) que representa el cociente de la exergía del calor de enfriamiento entre la exergía que se aporta al sistema como se muestra en la siguiente ecuación (8). Aplicando la ecuación general de la MAE en cada dispositivo del diagrama mostrado en la Figura 1 es posible calcular la exergía destruida en todo el sistema y en cada dispositivo. Los respectivos balances exérgicos se detallan en la Tabla 1.

$$COP_{\psi} = -\frac{\chi_{Q_{ev}}}{\chi_{Q_{gen}} + W_b} \tag{6}$$

Tabla 1.- Fórmulas utilizada en el cálculo de los cambios y pérdidas de exergía de los módulos del sistema de absorción.

	$\Delta EX_{dest}[kW]$	$X_{dest}[kW]$	$X_{dest}[kW]$	$X_{dest}[kW]$ TOTAL
COMPONENTES MODULOS	**AC. TÉRMICO AGUA DE ENF.**	**IRREVERSIBILIDADES EXTERNAS**	**IRREVERSIBILIDADES REFRIGERANTE**	**POR COMPONENTE IRREVERSIBILIDADES**
CONDENSADOR	$m_{15}(\psi_{15}-\psi_{16})$	$m_{15}(\psi_{15}-\psi_{16})+Q_{con}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pc}}\right)$	$m_7(\psi_7-\psi_8)-Q_{con}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pc}}\right)$	$m_7(\psi_7-\psi_8)+m_{15}(\psi_{15}-\psi_{16})$
GENERADOR	$m_{11}(\psi_{11}-\psi_{12})$	$m_{11}(\psi_{11}-\psi_{12})-Q_{gen}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pg}}\right)$	$m_3\psi_3-m_7\psi_7-m_4\psi_4)-Q_{gen}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pg}}\right)$	$m_3\psi_3-m_7\psi_7-m_4\psi_4+m_{11}(\psi_{11}-\psi_{12})$
ABSORBEDOR	$m_{13}(\psi_{13}-\psi_{14})$	$m_{13}(\psi_{13}-\psi_{14})+Q_{abs}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pa}}\right)$	$m_6\psi_6+m_{10}\psi_{10}-m_1\psi_1)-Q_{abs}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pa}}\right)$	$m_{10}\psi_{10}+m_6\psi_6-m_1\psi_1+m_{13}(\psi_{13}-\psi_{14})$
EVAPORADOR	$m_{17}(\psi_{17}-\psi_{18})$	$m_{17}(\psi_{17}-\psi_{18})+Q_{ev}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pe}}\right)$	$m_9(\psi_9-\psi_{10})-Q_{ev}\left(1-\frac{T_{ref}}{\Delta T_{pe}}\right)$	$m_9(\psi_9-\psi_{10})+{}_{17}(\psi_{17}-\psi_{18})$
BOMBA	$m_1(\psi_1-\psi_2)$		$m_1(\psi_1-\psi_2)+W_b$	$m_1(\psi_1-\psi_2)+W_b$
V. EXPANSION REF.			$m_8(\psi_8-\psi_9)$	$m_8(\psi_8-\psi_9)$
V. EXPANSION SOL.			$m_5(\psi_5-\psi_6)$	$m_5(\psi_5-\psi_6)$
PRE CALENTADOR			$m2\psi2+m4\psi4-m3\psi3-m5\psi5$	$m2\psi2+m4\psi4-m3\psi3-m5\psi5$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tomando como referencia el esquema de la máquina mostrado en la Figura 1, se aplica el primer principio de la termodinámica y el principio de conservación de masa en todos los componentes del sistema. Considerando que la máquina de simple efecto opera en la ciudad de Mexicali se consideran los parámetros mostrados en la Tabla 2 mientras que en la Tabla 3 se muestran los balances de energía, las ganancias y pérdidas energéticas en cada dispositivo, la integración energética que tiene el sistema de absorción de simple efecto; también se pueden apreciar los COP de enfriamiento, eléctrico y de calefacción. Para resolver los modelos matemáticos se utiliza el software EES (Engineering Equation Solver) y para calcular las propiedades termodinámicas se emplean las correlaciones de Patek and Komflar las cuales están contenidas en el software EES.

Las propiedades termodinámicas de todo el ciclo de enfriamiento se muestran en la Tabla 4, es importante señalar que la corriente del punto (14) y (15) son la misma ya que la corriente que sale de enfriar al absorbedor es llevada para enfriar al condensador. La exergía es calculada a partir de las propiedades termodinámicas obtenidas por el estudio en primera ley por medio de $\Psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$; como se puede ver en la exergía de flujo se desprecia la energía cinética y potencial.

Tabla 2.- Parámetros de entrada para las condiciones de Mexicali del sistema de absorción LUCY.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
$\mathbf{Q_{ev}}$	23	kW	$\mathbf{T_{16}}$	34.23	C
$\mathbf{Eff_{hx}}$	0.632	%	$\mathbf{T_{17}}$	14	C
$\mathbf{Eff_b}$	0.5	%	$\mathbf{T_{18}}$	7	C
$\mathbf{T_{con}}$	40	C	$\mathbf{x_{10}}$	Vap. Sat.	
$\mathbf{T_{11}}$	100	C	$\mathbf{m_{11}}$	1.611	kg/s
$\mathbf{T_{12}}$	95.4	C	$\mathbf{m_{13}}$	1.8	kg/s
$\mathbf{T_{13}}$	27	C	$\mathbf{m_{15}}$	1.8	kg/s
$\mathbf{T_{14}}$	31	C	$\mathbf{m_{17}}$	1.111	kg/s
$\mathbf{T_{15}}$	T_{14}	C	$\mathbf{m_1}$	0.0909	kg/s

Tabla 3.- Resumen de resultados del análisis energético por primera ley caso Mexicali.

COMPONENTES (MÓDULOS)	FÓRMULAS UTILIZADAS	GANANCIAS (kW)	PÉRDIDAS (kW)	INTEGRACIÓN ENERGÉTICA (kW)
GENERADOR	$Q_{gen} = m_7h_7 + (m_3 - m_7)h_4 - m_3h_3$	**31.58**		
CONDENSADOR	$Q_{con} = m_{15}(h_{16} - h_{15}) = m_7(h_7 - h_8)$		24.28	
ABSORVEDOR	$Q_{abs} = m_{10}h_{10} + m_6h_6 - m_1h_1 = m_{13}(h_{14} - h_{13})$		30.35	
EVAPORADOR	$Q_{ev} = m_{17}(h_{17} - h_{18}) = m_9(h_{10} - h_9)$	**23.04**		
PRE CALENTADOR	$Q_{hx} = m_2(h_3 - h_2) = m_4(h_4 - h_5)$			**7.268**
BOMBA	$W_b = \frac{m_1(1/\rho_1)\cdot(P_2 - P_1)}{Eff_{B1}}$	**0.0008634**		
TOTAL	**CICLO**	**54.62**	**54.63**	**7.268**
INDICADORES DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO	$COP_E = Q_{ev}/Q_{gen}$	0.7298	**ENFRIAMIENTO**	
	$COP_{E,T} = Q_{ev}/(Q_{gen} + W_b)$	0.7295	**ENFRIAMIENTO CON BOMBA**	
	$COP_C = (Q_{con} + Q_{abs})/Q_{gen}$	1.7298	**COMO CALENTADOR**	

Como se mencionó antes, el estado muerto tiene un gran impacto en la dinámica de los cambios de exergía que sufren las corrientes de un sistema y el sistema mismo. Cuando $T > T_0$, la transferencia de calor hacia un sistema aumenta la exergía de éste y la transferencia de calor desde un sistema lo disminuye. Pero lo opuesto se cumple cuando $T < T_0$. La exergía transferida debido al calor es cero cuando $T = T_0$ en el punto de transferencia. Cuando presenta un medio con una temperatura más baja que el estado muerto es posible hacer funcionar una máquina térmica entre el estado muerto y el medio frío, por lo tanto un medio frío ofrece una oportunidad de producir trabajo; sin embargo, esta vez el ambiente o estado muerto sirve como la fuente de calor y el medio frío como el sumidero de calor. En este caso la relación anterior proporciona el negativo X_Q. Cuando $T > T_0$, la exergía y la transferencia de energía están en la misma dirección, pues cuando aumenta el contenido de energía también incrementa la exergía, el caso contrario sucede cuando $T < T0$.

Tabla 4.- Propiedades termodinámicas de las corrientes del sistema de absorción *BrLi/H_2O* LUCY.

PUNTOS	P_i [kPa]	Calidad [-]	T_i [C]	H_i [kJ/kg]	m_i [kg/s]	X_i [LiBr]	S_i [kJ/kg- K]	Ψ_i [kJ/kg]
1	0.7581	-100	33	81.85	0.0909	0.5543	0.1974	27.65
2	7.381		33	81.86	0.0909	0.5543	0.1974	27.65
3	7.381		62.51	141.8	0.0909	0.5543	0.3846	31.77
4	7.381		90	224.4	0.08108	0.6215	0.4917	82.44
5	7.381		53.98	157.2	0.08108	0.6215	0.2968	73.4
6	0.7581	0.00441	47.1	157.2	0.08108	0.6215	0.3037	71.34
7	7.381	100	75.37	2641	0.00982	0	8.458	123.3
8	7.381		39.02	163.4	0.00982	0	0.5592	1.341
9	0.7581	0.06047	3	163.4	0.00982	0	0.5922	**-8.508**
10	0.7581	1	3	2506	0.00982	0	9.075	**-195**
11	200	-100	100	419.1	1.611		1.307	34.09
12	200	-100	95.4	399.7	1.611		1.255	30.37
13	200		27	113.3	1.8		0.3949	0.2253
14	200		31	130	1.8		0.4505	0.252
15	200		31	130	1.8		0.4502	0.4466
16	200		34.23	143.6	1.8		0.4945	0.7832
17	200		14	58.92	1.111		0.2103	0.8615
18	200		9.052	38.21	1.111		0.1369	2.049

Tabla 5.- Dinámica de cambios de exergía y energía para sistemas que cruzan el punto muerto.

CASOS	CONSIDERACIONES	CAMBIOS DE EXERGÍA Y ENERGÍA
T>T₀	Si T se aleja del punto muerto	$\Delta\psi \uparrow \Rightarrow \Delta E \uparrow$
	Si T se aproxima al punto muerto	$\Delta\psi \downarrow \Rightarrow \Delta E \downarrow$
T <T₀	Si T se aleja del punto muerto	$\Delta\psi \uparrow \Rightarrow \Delta E \downarrow$
	Si T se aproxima al punto muerto	$\Delta\psi \downarrow \Rightarrow \Delta E \uparrow$
Condición inicial *T>T₀* y condición final *T <T₀*	Si T se aleja del punto muerto	$\Delta\psi \uparrow \Rightarrow \Delta E \downarrow$
	Si T se aproxima al punto muerto	$\Delta\psi \downarrow \Rightarrow \Delta E \downarrow$
Condición inicial *T<T₀* y condición final *T>T₀*	Si T se aleja del punto muerto	$\Delta\psi \uparrow \Rightarrow \Delta E \uparrow$
	Si T se aproxima al punto muerto	$\Delta\psi \downarrow \Rightarrow \Delta E \uparrow$

Tabla 6.- Resultado del análisis por segunda ley para el ciclo de absorción.

COMPONENTES MÓDULOS	$\Delta EX_{dest}[kW]$ AC. TÉRMICO AGUA DE ENF. AGUA FRÍA	$\chi_{dest}[kW]$ IRR. EXTERNAS	$\chi_{dest}[kW]$ IRR. REFRIGERANTE SOLUCIÓN	$\chi_{dest}[kW]$ IRREVERSIBILIDADES TOTALES	PÉRDIDAS TOTALES (%)
CONDENSADOR	**-0.6059**	1.766	**-1.173**	0.5926	14.74
GENERADOR	5.992	-0.1328	1.118	0.9848	24.5
ABSORBEDOR	**-0.0479**	0.3483	0.9587	1.307	32.51
EVAPORADOR	**-1.319**	-0.2297	0.7434	0.5137	12.78
BOMBA	**-0.00001898**		0.0007234	0.0007234	0.018
V. EXPANSIÓN REF.			0.09676	0.09676	2.4
V. EXPANSIÓN SOL.			0.1665	0.1665	4.14
PRE CALENTADOR			0.3582	0.3582	8.91
TOTAL		**1.751**	**2.269**	**4.02**	**100**

EXERGÍA DE ENTRADA		EXERGÍA DE SALIDA+PÉRDIDAS POR IRREVERSIBILIDADES	
$\Delta\psi$ FLUIDO CALIENTE	5.992	IRREVERSIBILIDADES EXTERNAS AL CICLO	1.751
$\Delta\psi$ AGUA ENFRIADA	**-1.319**	IRREVERSIBILIDADES INTERNAS AL CICLO	2.269
$\Delta\psi$ BOMBA SOLUCIÓN	**-0.00001898**	TOTAL DE ψ SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO	0.6538
TOTAL	**4.67**	**TOTAL**	**4.67**

Una dinámica similar sucede para la exergía de flujo de las corrientes al pasar de un estado inicial a un estado final, sin embargo, en los sistemas de enfriamiento pueden suceder dinámicas en las que el contenido energético de una corriente puede cruzar el punto de referencia y esto puede manifestar diferentes movimientos en el cambio de la exergía y energía de las corrientes como se describe en la siguiente Tabla

5. Lo anterior también indica que la exergía de flujo podría presentar un valor negativo cuando la corriente del sistema se encuentre a una presión y temperatura menor que las del punto de referencia o estado muerto. Esto sucede en este estudio, como se puede apreciar en la Tabla 4 para las corrientes 9 y 10. En el caso del punto 9 la exergía de la corriente es Ψ**=-8.508** kJ/kg significa que esta exergía puede recuperarse y que la combinación entre el medio frío y el ambiente tiene el potencial para producir 8.508 kJ/kg de trabajo al ser llevada al estado muerto.

En la Tabla 6 se presenta de manera resumida el comportamiento exérgico de la máquina de absorción de simple efecto. Las irreversibilidades en cada dispositivo del sistema son calculadas utilizando las ecuaciones de la Tabla 1. En primera instancia se observa claramente la distribución de las pérdidas de exergía así como su magnitud, tipo y localización permitiendo con esto analizar las alternativas para reducir las irreversibilidades diciendo si estas se pueden reducir por medio de cambios en las condiciones de operación o por modificaciones en el diseño del proceso y de esta manera eficientar la máquina. También se puede ver claramente que el balance exérgico mostrado es correcto ya que la suma de las exergías de las corrientes externas e internas más la irreversibilidades son iguales a la suma de las exergías que entran al sistema tal y como se planteó en la ecuación (3).

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados por medio del análisis exérgico, se tienen datos rigurosos que permiten detectar los equipos que tienen una mayor posibilidad de mejora y al mostrar la manera en que se destruye la exergía se pueden tomar las mejores decisiones para mejorar un proceso como los de enfriamiento por absorción. El sistema de absorción de simple efecto tiene grandes oportunidades de mejora pues el COP_{Ψ} es de 17.78 % lo que indica que el 82.22 % de la exergía que entra al sistema no se está aprovechando debido a las irreversibilidades del proceso. El equipo del sistema donde se presentan las mayores pérdidas de exergía es el absorbedor, seguido del generador, condensador y evaporador. En las corrientes internas del absobedor se presentan las principales irreversibilidades, siendo estas a las que se deben someter los esfuerzos para mejorar el sistema en primera instancia, para reducir estas irreversibilidades se puede aprovechar la exergía del proceso de absorción procurando que la corriente que viene de la válvula de solución presente menos flasheo pues esto permitirá que se pueda dar una absorción más fuerte siempre y cuando la corriente que viene del evaporador sea vapor saturado; esto implica modificar las condiciones de operación del sistema al mover los flujos y condiciones de vació del sistema, otra manera de aprovechar la exergía es modificando el diseño del absorbedor buscando mejorar los coeficientes convectivos y conductivos de transferencia de calor.

Se puede observar que en la mayoría de los equipos las irreversibilidades presentes son debido a los procesos de transferencia de calor; una manera de aprovechar la exergía en este tipo de procesos es aproximar al máximo los ΔT de aproximación de los equipos intercambiadores de calor, lo cual puede lograrse haciendo modificaciones de diseño en los intercambiadores, aumentando el área de transferencia de calor o modificando los flujos de las corrientes. Otra manera de hacer equipos más compactos y eficientes es hacer integración energética interna entre las corrientes del proceso o con corrientes provenientes de otros procesos lo que permite aprovechar el calor que trae una corriente que debe ser enfriada con una corriente que necesita ser calentada; una metodología que permite hacer esto es la metodología PINCH y de esta manera se utiliza el mínimo de intercambiadores de calor con el máximo aprovechamiento de la energía de las corrientes.

La metodología exérgica permite visualizar de manera clara y objetiva cuales son los equipos más susceptibles a mejoras, cuanto son capaces de mejorar y como se debe de mejorar el sistema; sin embargo las modificaciones siempre deben considerar la factibilidad económica, ambiental e inclusive el impacto social que conllevan los cambios en el sistema. En base a lo anterior, la MAE indica el potencial de mejoramiento de una máquina, sin embargo no dice directamente que acción tomar, pero sí simplifica de gran manera los esfuerzos de desarrollo e investigación que tienen los investigadores tecnólogos en la búsqueda de la optimización de procesos y desarrollo de tecnología.

AGRADECIMIENTOS

Fue posible la finalización de este artículo por el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las becas de doctorado, gracias igualmente al CeMIE-SOL por su apoyo a través del proyecto P09 y al Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER).

REFERENCIAS

Ahrendts J. 1980. Reference states. Energy-The International Journal 5:667–678

Bosnjakovic F. 1963. Bezugszustand der exergie eines reagiernden systems (Reference states of the exergy in a reacting system). Forschung Im Ingenieurwesen Engineering Research 20:151–152.

Bejan, A. 1978, “General criterion for rating heat exchanger performance”, Int. J. Heat mass Trans., 21, pp.655-658.

Cengel, Y. & Boles, M. 2012. Termodinámica, Mc Graw-Hill, séptima edición.

Herold, K. E., Radermacher, R. and Klein, S. A. (1996), “Absorption Chillers and Heat Pumps”, CRC Press, Inc. pp. 14.

Ibrahim D. and Marc A.R., Exergy, Energy, environment and sustainable development, ELSEVIER, First edition, (2007), pp 29-31.

Sussman MV. 1980. Steady-flow availability and the standard chemical availability. Energy-The International Journal 5:793–804.

Sussman MV. 1981. Second law efficiencies and reference states for exergy analysis. Proceeding of the 2nd World Congress Chemical Engineering, Canadian Society of Chemical Engineers, Montreal: 420–421.

Szargut J. 1967. Grezen fuer die anwendungsmoeglichkeiten des exergiebegriffs (Limits of the applicability of the exergy concept). Brennst.-Waerme-Kraft 19:309–313.

Velázquez, N. V. y Best, R. W. (2001), “Diagnostico energético en un sistema de refrigeración por absorción aplicando la metodología de análisis exérgico”, memorias de la XLI Convención Nacional del IMIQ, Puebla, México, Octubre del 2001.

Velázquez, N. V. (2002), “Tesis doctoral: Estudio de sistemas de absorción avanzados para operar con gas natural asistidos por energía solar”, Centro de Investigación en Energía, Facultad de Química, UNAM.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DESIGN OF A HIGH TEMPERATURE THERMAL ENERGY UNIT WITH A PHASE CHANGE MATERIAL INTERFACE

Ramón A. Gutiérrez Razo, Bruno Cárdenas Castañeda, Noel Leon Rovira, Héctor García Lara
Centro de Innovación en Diseño y Tecnología, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México, 64849.
(+52) 81 8358-2000, Ext. 5101, **r.gutierrez@invitados.itesm.mx**

ABSTRACT

The design for a high temperature Thermal Energy Storage (TES) unit is presented. The thermal energy is supposed to be obtained by means of solar heat concentration and stored for later use at times when there is a shortage or no solar radiation available to generate either heat or electricity or a combination of both. The TES unit will use soda lime glass as the main heat reservoir due to its reasonable energy density and availability as a recyclable material.

The soda lime glass has the disadvantage of having low thermal conductivity values at the first stages of performance of the TES unit and its capacity of store and release energy as sensible heat will cause the working temperature of the TES unit to fluctuate. To solve the aforementioned shortcomings a secondary heat reservoir made of a phase change material will be used as an interface, between the main heat reservoir made of glass and the heat exchanger. The phase change material proposed will be aluminum. Finite element analysis of two TES units, one without the aluminum interface and the other with it will be shown.

Keywords: Solar energy; latent heat; glass; aluminum; phase change material; thermal energy; energy storage, TES; thermal energy storage.

NOMENCLATURE

Acronyms

TES	Thermal Energy Storage.
PCM	Phase Change Material.
FEM	Finite Element Method.

Symbology

ε	Emissivity.
σ	Stefan–Boltzmann constant.
A	Area of radiation surface.
T_s	Temperature at radiation area.
T_{Amb}	Ambient temperature.
C_p	Specific heat.
K	Thermal conductivity.
T	Temperature.

INTRODUCTION

The worldwide energy consumption and the use of fossil fuels has been growing through the years [1]. The depletion of fossil fuels and the pollution produced by their use has led to seek alternative energy sources. Solar energy has the characteristic of being abundant and clean, however under development of technologies that exploit this resource have high investments and are still under development. Some of the shortcomings of solar energy are its intermittent nature due to weather conditions and its unavailability at night. TES units are being developed so that solar energy can be used during periods when solar radiation is not favorable or not present and to make solar energy viable at a reasonable cost to promote its use. The presented TES unit stores heat obtained from a solar radiation concentration system inside a heat reservoir, such heat is converted later either to mechanical or electrical energy. The concentrated radiation will reach a graphite spot and the heat will be conducted inside the TES unit and removed thereafter by a set of plates made of the same material. The TES system presented in this paper will use soda lime glass as the main heat reservoir and is expected to reach temperatures around 1200°C. The heat reservoir and the set of thermal conductor plates are enclosed by a refractory container. This is enveloped by either a glass or ceramic fiber that serves as thermal insulation that minimizes heat losses to the surroundings in order to improve the amount of heat the TES unit can store, allowing also to have a safe surface temperature that doesn't represent a risk for the user in the outermost metal cover made of common A-36 steel coated with an electrostatic painting to resist the corrosion of weather conditions. All of the aforementioned materials share the characteristic of being abundant, being of common use in a wide range of industries and some of them can be obtained from waste or recycled materials. This has a positive impact on reducing manufacturing costs of such TES units. The soda lime glass has the disadvantage of having low thermal conductivity values at the first stages of performance of the system [6], working as a barrier for the re-charge and discharge stages of the TES unit. The soda lime glass by itself store and release energy as sensible heat and cause the working temperature of the TES unit to fluctuate. In order to solve the shortcomings of using glass as the heat reservoir of a TES system a PCM interface is proposed. A PCM with higher thermal conductivity values than the thermal conductivity of the glass would enhance the amount of heat that would be either stored or extracted from the TES unit, would extend the operation time of the whole system and would provide an almost constant working temperature at all times as long the TES unit has available heat stored. A secondary heat reservoir made of aluminum that serves as an interface between the main glass heat reservoir and the heat exchanger is expected to provide a TES unit with the previous requirements, besides the aluminum is an abundant material and can be obtained from recycling.

MATERIAL AND METHODS

In order to prove the improvement of a PCM interface on the overall TES system, FEM simulations of a TES unit without and with the aluminum cistern will be made. The aforementioned TES units are shown in Figure 1.

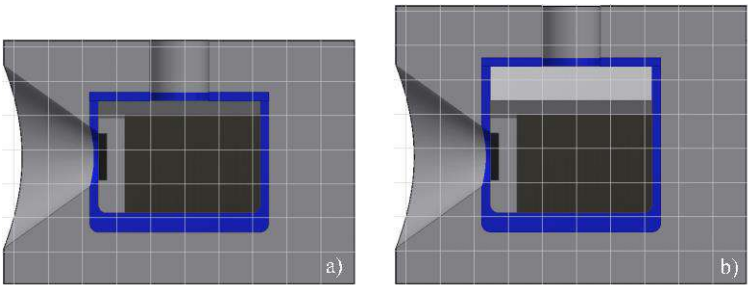


Figure 1. Transversal view. a) TES Unit A, b) TES Unit B. Each square grid divisions represent a length of 4 inches (Approximately 10 cm).

Because unit A and unit B only differ in the aluminum cistern only the components of the unit B will be shown.

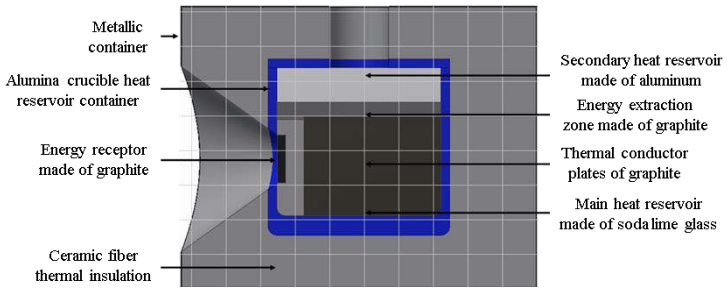


Figure 2. TES unit's components.

Unit A and unit B share the same amount of glass with a total of 96.0 kg with a volume of 38.0 lt. Both units share the same graphite parts for the heat reception and extraction system, the same ceramic fiber insulation, the same type of cylindrical crucible (same inner radius, same wall thickness). The main difference between unit A and unit B is the aluminum cistern only present in unit B. The aluminum cistern adds 4.0 inches of height to the alumina crucible, the thermal insulation and the metallic container in their axial direction with respect of the same parts in unit A. The aluminum cistern can be modeled as a 4.0 inch thick disc with a diameter of 19.0 inches, weights a total of 50.0 kg and takes up almost 19.0 lt. The aluminum has a heat of fusion of 386.9 kJ/kg (0.11 kWh/kg) [18], this yields a cistern with a capacity of almost 5.4 kWh of latent heat. Soda lime glass selection as a heat reservoir was based on having a good heat capacity per unit of mass and volume, this means that a reasonable amount of heat can be stored in fair quantities of mass and volume. Graphite was chosen as a heat receiver - transmitter based on its maximum working temperature which is around 2500°C and 3000°C whenever it is protected from an oxidizing atmosphere [4], and its good thermal conductivity values. More information about the specific heat and thermal conductivity values used in the simulation for the soda lime glass, graphite, alumina, ceramic fiber and A-36 steel can be found in [1], [6], [8] and [13]. The aluminum specific heat and thermal conductivity values where obtained from [19] and [20] respectively. The thermal conductivity and the specific heat values with their temperature dependence and the densities for all the materials used in the FEM simulations are shown in the Figures 3, 4 and in the Table 1. All the materials densities are constant at all temperatures.

Table 1. Material density values.

Material	Density [Kg/m³]	Reference
Graphite	1700	[1]
Soda Lime Glass	2500	[1]
Refractory	2630	[10,11]
Ceramic Fiber	96	[12]
Steel A - 36	7850	[13]
Aluminum	2700	[18]

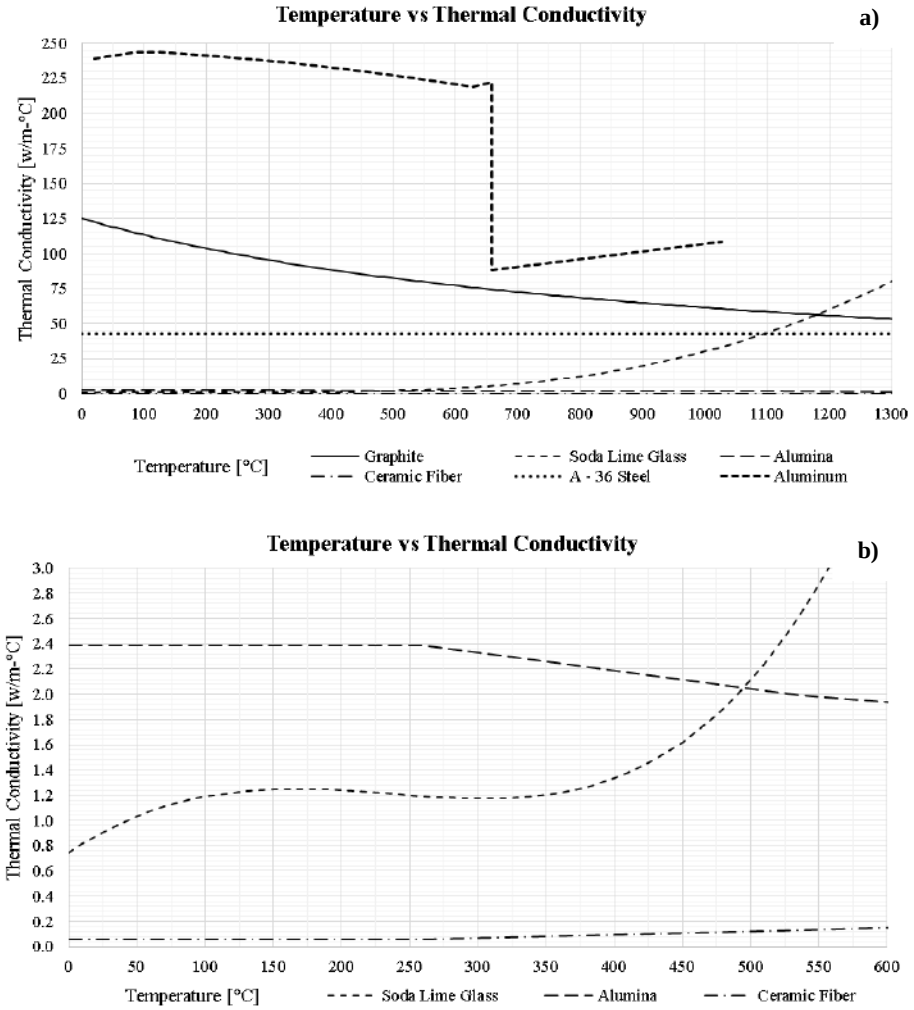


Figure 3. a) Temperature vs Thermal Conductivity. b) Zoomed view of Temperature vs Thermal Conductivity graph.

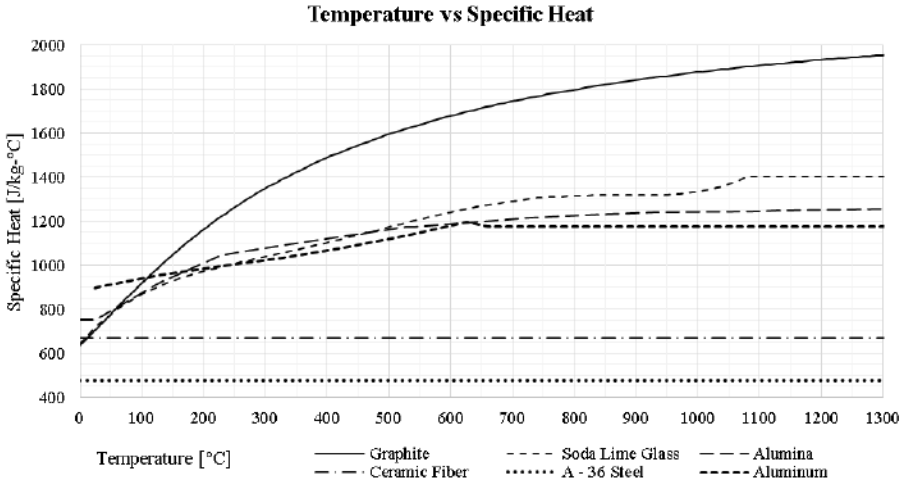


Figure 4. Temperature vs Specific Heat.

The unit A has a total mass of 360 Kg meanwhile the unit B has a total mass of 430 Kg. The FEM analysis for the units A and B will be over a period of 10 days. Times steps of approximately 14.4 minutes will be used for the most part of the simulation time, meanwhile time steps of approximately 1.0 minute will be used over the time period in which the aluminum either start or finish its melting stage. A total of 3349 time steps were used in the FEM analysis of the units A and B sharing the same coarse and fine time steps during the same time periods to keep consistency between both simulations. The aluminum melts around at 660.4 °C. Each TES unit will receive daily at the heat receptor zone 5.625 kW of heat for periods of 8 hours receiving each day a total of 45.0 kWh (Charge cycle) followed by 16 hours of neither

entry nor extraction of heat (Rest cycle) for the first 4 days. The energy receptor spot had a value of emissivity of 0.50 in order to simulate an equivalent radiation cavity to decrease the radiation heat losses at the radiation receptor zone. The emissivity have a value of zero during the 16 hours of night assuming the radiation receptor will be well insulated. A convection coefficient of 3.22 w/°C-m² was used over the outermost surface of the metallic container in both TES units. At the beginning of the day 5 until the day 10 an extraction of 1.0 kW of heat over the extraction zone is applied simulating the use of a thermal engine (Heat extraction cycle). The average temperature of the energy receptor area was taken in the FEM simulations of the TES unit A and B. Using the Stephan Boltzmann Black Body Radiation model [14] is possible to calculate an estimate for the radiation heat losses at the energy receptor zone. All the nodes of the FEM models started with a temperature of 20°C. The room temperature is 20°C at all times. For the FEM and energy analysis the Autodesk Simulation Mechanical 2014 software, a custom Visual Basic 2015 routine and a custom MATLAB 2009a program was used.

RESULTS

The FEM analysis provides the temperature of every node that forms the models of each TES unit along each time step during the simulation. With the aforementioned results the amount of energy stored at any time by each part that forms the TES unit A and B can be obtained, then it is possible to derive an estimation of the heat losses by radiation and by convection. Taking advantage that the same material parts are adjacent among them, the analysis will be made by material instead of every single part that form the TES units. To keep not only and idea of the amount of the energy that is stored or lost to the surroundings by the TES units but also and economic sense, the energy units of kWh will be used. Because the supposed thermal engine has a working temperature of 500°C or more to work, all the energy below that temperature will not be available. The Figure 5 shows the total energy and useful energy that is stored in each of the TES units.

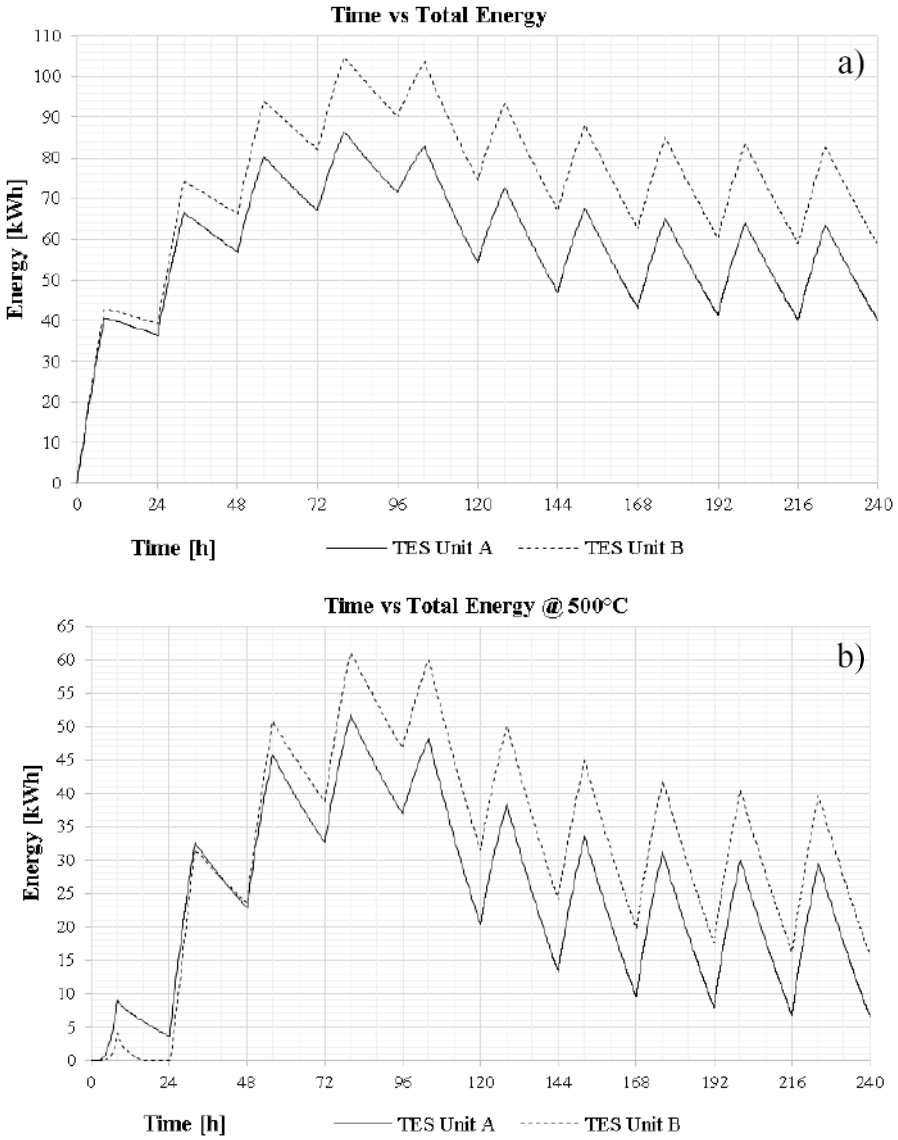


Figure 5. a) Time vs Total Energy (Energy stored from room temperature). b) Time vs Total Energy @ 500°C.

In the Figure 6 is shown the amount of total energy stored by each type of material. In the unit B the soda lime glass and the alumina store almost the same amount of thermal energy once the thermal engine is on, this might be explained because their specific heat and thermal conductivity are similar at the first stages of heating (Figures 3b and 4) also the mass of glass and aluminum are similar. The presence of the aluminum cistern could act like a heat buffer giving the glass and the alumina the opportunity to match their temperatures and achieve a similar quantity of heat. It's worth to mention that the glass, which is the main heat reservoir in both TES units, has less total energy oscillations in the unit B compared with the unit A (Figure 6). The Figure 7a shows the daily total heat losses by radiation between the units A and B and the Figure 7b shows the daily total heat losses by convection between the units A and B.

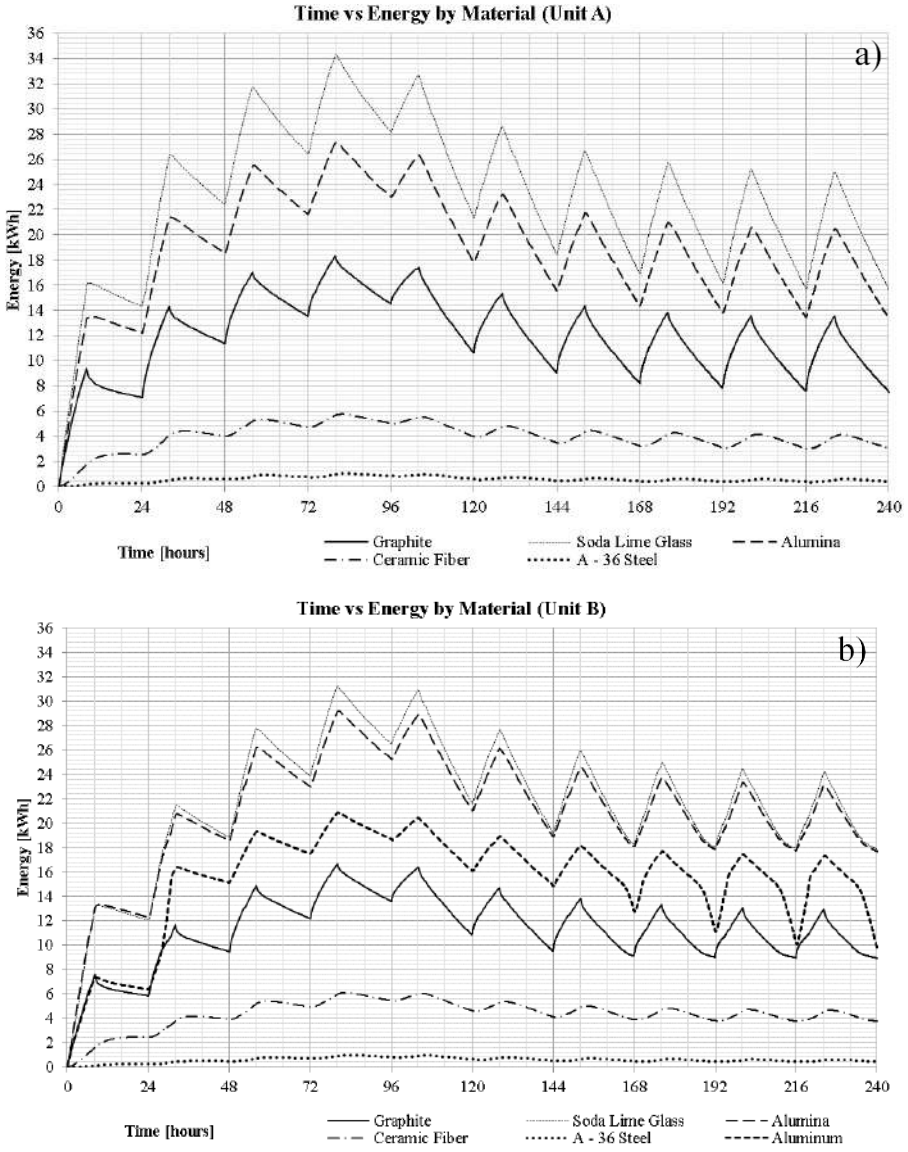


Figure 6. Time vs Energy by Material. a) TES Unit A. b) TES Unit B.

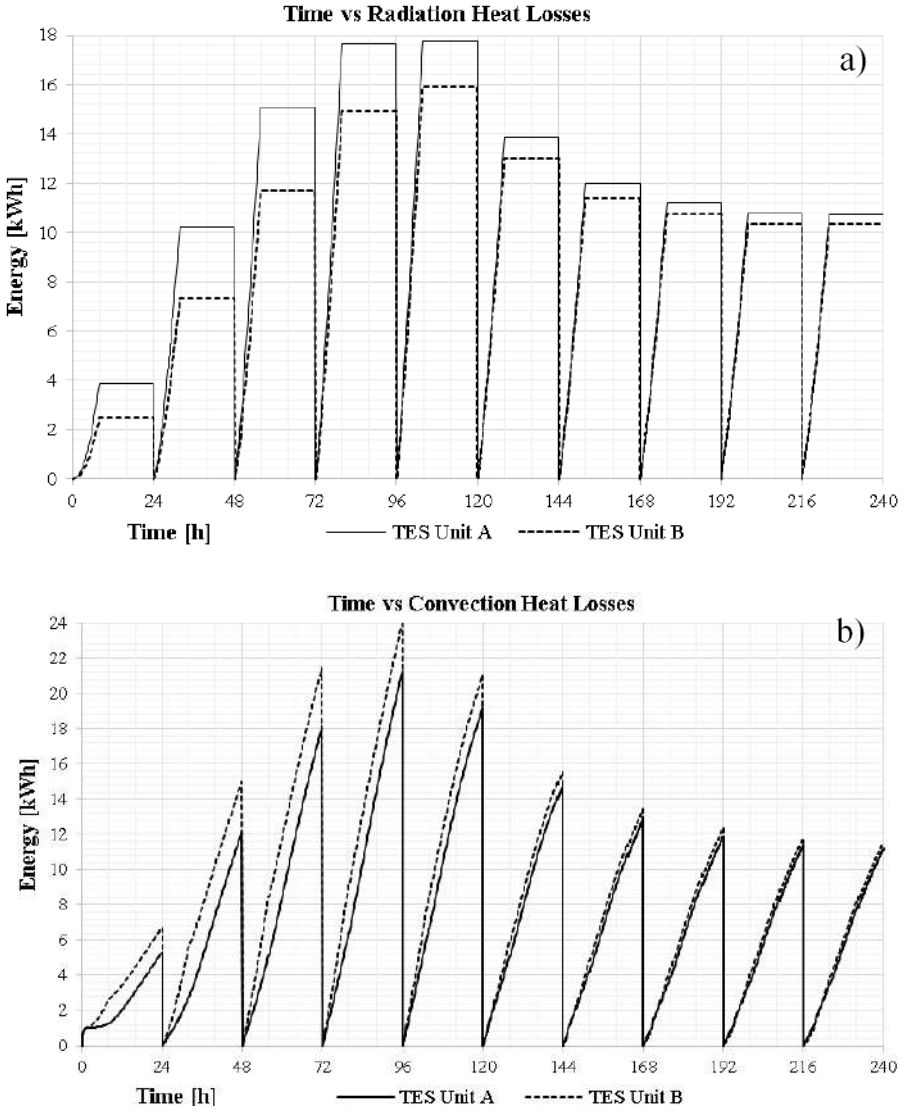


Figure 7. Heat Losses. a) Time vs Radiation Heat Losses. b) Time vs Convection Heat Losses.

The Figure 8 shows the quantities of heat stored in the aluminum cistern by sensible and latent heat available and the percentage of liquid aluminum through the FEM analysis time. The aluminum cistern start to melt at the hour 27 and at the hour 31 all the aluminum is in liquid state. The aluminum cistern keeps storing energy as sensible heat at the liquid stage thereafter. The thermal engine start to work at the beginning of the day 5, however is until day 6 that the thermal engine has depleted the aluminum sensible heat in liquid state and start to consume the latent heat, each day thereafter the thermal engine consume more latent heat with respect to the previous day. In the case of the unit B simulation once the system has reached a cyclical performance the aluminum cistern reaches total heat peak values of 17 kWh. As the aluminum cistern depletes its latent heat reserves the temperature variations during this stages seems to hit a temperature floor value at the heat extraction zone between the hours of night and day (Figure 9).

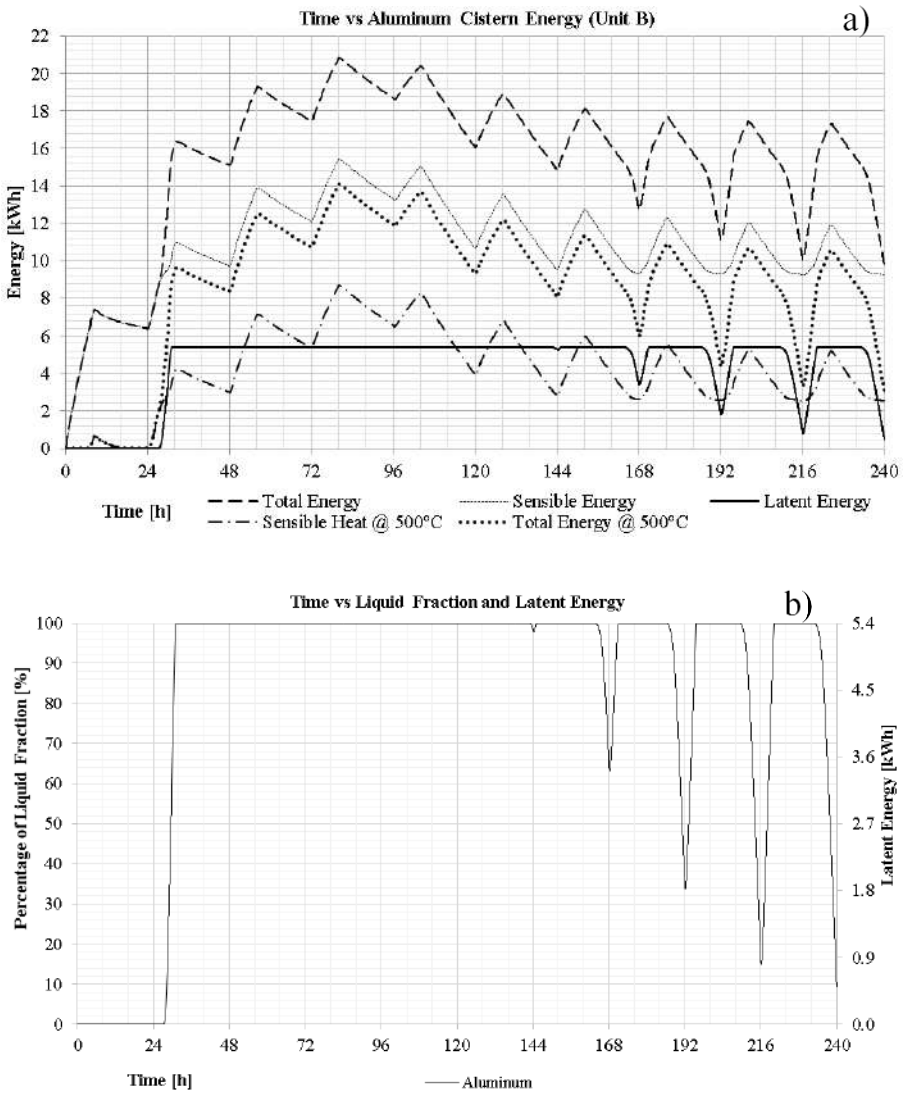


Figure 8. Aluminum cistern behavior. a) Time vs Aluminum Cistern Energy (Unit B). b) Time vs Liquid Fraction.

CONCLUSIONS

The TES unit B store more total and useful energy than the TES unit A at all times except during the first 40 hours in the case of the amount of useful heat above 500°C (Figure 5). The difference in the total stored energy between the unit B and A once the system stabilize is between 18 kWh and 21 kWh and in the case of the useful energy above 500°C the difference is between 9 kWh and 12 kWh. When the thermal engine is on, with each passing day the TES units store less energy with respect to the previous day, this shows that there is no point in using more than 4, or even less, of only charge stage days. The thermal insulation needs to be improved in order the store more heat as only charge days passes. After many days of the thermal engine extracting heat in a continuous manner will be the necessity of recharge the TES units for a few only charge days before resuming the heat extracting stages, however the unit B energy oscillations are more stable with a shorter temperature range variations compared with the unit A (Figure 9), and could be operating over an extended period of time in comparison with the unit A. As long the temperature at the heat extraction zone is above 500°C the hypothetical thermal engine will be working. The TES unit must have the least temperature variation as possible at the heat extraction zone to provide the thermal engine with constant working conditions in order to improve its performance. The Figure 9 shows the temperature at the center of the radiation receptor and the extraction area in both TES simulated units. The center points where taken as representative of the whole area in each case. The radiation spot area has higher temperatures in the case of the unit A compared with the unit B, once the thermal engine is on the maximum peak temperature values tends to be similar in both cases, however is worth to mention that the presence of the aluminum cistern have some effect on the radiation spot temperature when the TES unit is in the last hours of the discharge stage of each day in the case of the unit B (Figure 9). Once both TES unit achieve a cyclical behavior the extraction zone has less temperature variation in the case of the unit B compared with the unit A. The extraction area in the unit A achieve temperatures between 560°C and 850°C, giving a temperature variation of 290°C, meanwhile the temperature variation in the unit B is between 640°C and 790°C with a temperature difference of 150°C, however between the day 9 and 10 the heat extraction zone achieve a period of almost 9.6 hours in which the temperature variation is

between 645°C and 660°C with a temperature difference of 16°C. In the unit A during the heat extraction stages the heat extraction temperature area increase and decrease in a monotonous manner (Figure 9a).

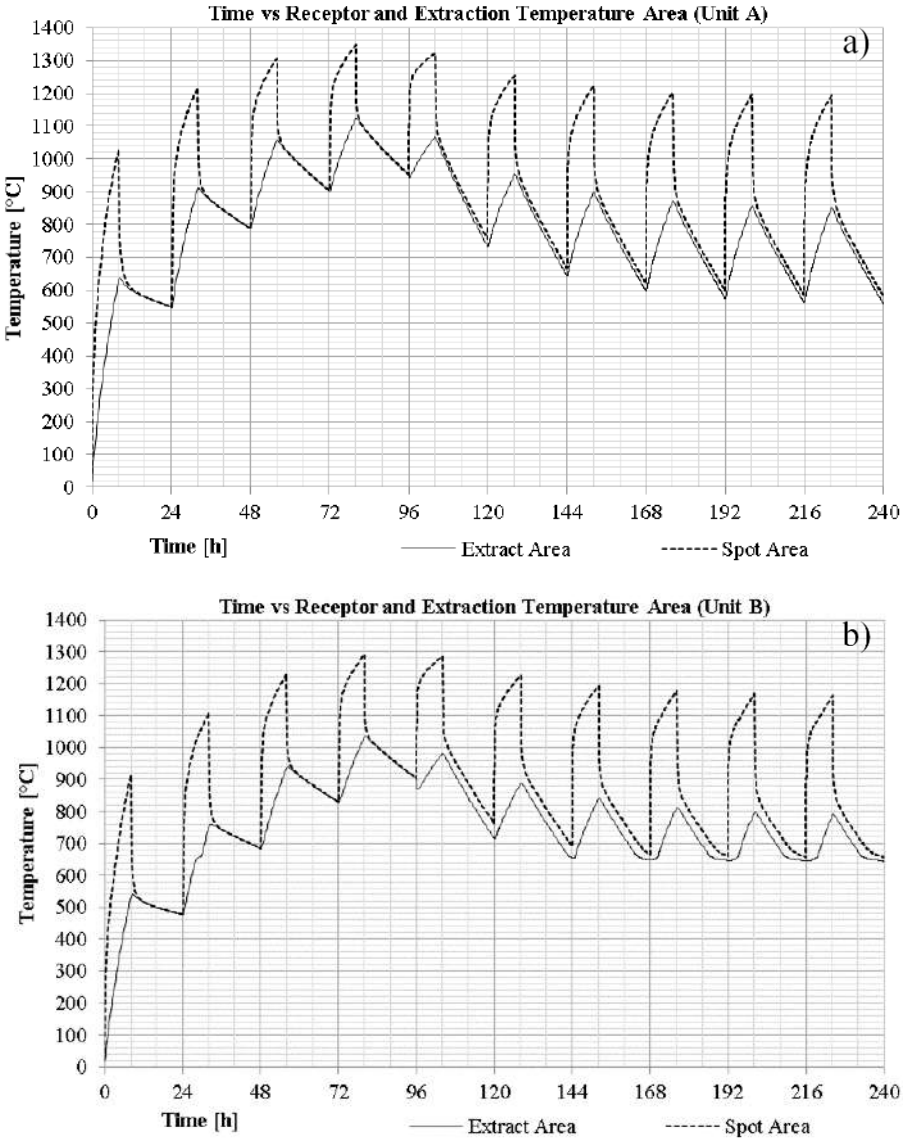


Figure 9. Time vs Receptor and Extraction Temperature Area. a) TES Unit A. b) TES Unit B.

The TES unit B has less radiation heat losses compared with the unit A (Figure 7a). The unit A has peak radiation heat losses that represent the 40 % of the daily concentrated solar radiation input and this value decrease to 24% once the system has reached a cyclical performance, meanwhile the unit B has peak radiation heat losses that represent 36% of the daily heat input and decrease to 22% when the TES unit has reached a cyclical performance. The TES unit B has slightly more heat convection losses than the unit A (Figure 7b). This might be explained because the glass heat reservoir and the whole unit B core could reach a higher mean temperature values between the night and day periods once the thermal engine is on compared with the unit A. The higher the heat reservoir and the TES core are, the higher the convection heat losses will be. The aluminum cistern provided thermal energy and temperature stability to certain degree to the unit B compared with the performance of the unit A (Figures 5 and 9). As the aluminum has the highest thermal conductivity values of all the TES materials (Figure 3a) over the complete temperature range achieved at any moment in both simulations, more heat might be absorbed inside the TES unit, heating homogenously the TES core materials and diminishing to some degree the radiation spot temperature, hence why the unit B has less radiation heat losses. The higher the radiation spot temperature, the higher the radiation heat losses will be. The aluminum having a defined phase change temperature provide the extraction heat zone (Figure 9) with an almost static temperature period around the aluminum melting temperature. In order to achieve a TES heat reservoir with an improved temperature stability a bigger aluminum cistern would be required. The ideal would be to achieve at the extraction heat zone an almost constant temperature at all times. From room temperature to 500°C the thermal conductivity values of the soda lime glass are practically below the thermal conductivity values of the alumina whose values can be considered low but the glass thermal conductivity values increase as the temperature does (Figure 3). Because the aluminum cistern could provide the unit B glass heat reservoir with a higher and more stable mean temperature the glass thermal conductivity values would be higher and more stable compared with the ones found in the TES unit A improving the TES heat store performance and the heat output rates extraction.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge Institute of Renewable Energy (IER-UNAM) through the Mexican Center of Innovation in Solar Energy (CeMIE-Sol) (Strategic Project 05 "Development of solar thermal storage tanks"), through which it was possible to develop research and support the training of human resources at postgraduate level. And John Holtz, PE, Autodesk Expert Elite who provide the Visual Basic 2015 custom routine used to read the Autodesk Simulation Mechanical 2014 data files.

REFERENCES

[1] Cárdenas, B. (2014). Tanque de Almacenamiento de Energía Térmica. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

[2] Trombe, F., & Le, A. (1973). Thousand kW solar furnace, built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France). Solar Energy, 15(1), 57-61.

[3] Kronhardt, V. Alexopoulos, S. Reissel, M. Sattler, J. Hooschmidt, B. Hänel, M. Doerbeck T (2014). High-temperature Thermal Storage System for Solar Tower Power Plants with Open-volumetric Air Receiver Simulation and Energy Balancing of a Discretized Model. Energy Procedia. Vol 49, p. 870 – 877.

[4] Amador, B. (2012). Materiales de cambio de fase para almacenamiento de energía solar. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

[5] Garcia, L. (2010). Tanque Solar de Alta Temperatura. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

[6] Gutiérrez R. (2014). Diseño y Simulación de Tanque de Almacenamiento Térmico Solar. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

[7] Shelby, J (2005). Introduction to glass science and technology. (2nd Ed). Cambridge: Royal Society of Chemistry.

[8] Rasor N.S, McClelland J.D. Properties of graphite, molybdenum tantalum to their destruction temperatures. Journal of Physics and Chemistry of Solids 1960; 15: 17-26.

[9] Kovacec M, Polipovic A, Stefanic N. Impact of glass cullet on the consumption of energy and environment in the production of glass packaging material. Recent Researches in Chemistry, Biology, Environment and Culture. Monteux, Switzerland, 2011.

[10] Comprit 180H M. http://www.energiaencontrol.com/ Accessed 16- September -2014

[11] Thermal Ceramics Kao-Tab 95 High Alumina Castables. http://www.matweb.com/ Accessed 16- September -2014

[12] SuperMag 1200 Spun Soluble Blanket. http://www.nutec.com/supermag1200 Accessed 9- September -2014

[13] ASTM A36 (SS400, S275) Structural Carbon Steel. http://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-A36-SS400-S275-Structural-Carbon-Steel/ Accessed 28-September-2015

[14] Cengel, Y. (2011). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (3rd ed.). Singapur: McGraw-Hill.

[15] Trinuruk, P., & Obara, T. (2013). Concept of prismatic high temperature gas-cooled reactor with SiC coating on graphite structures. Annals of Nuclear Energy. Vol 63, p. 437 – 445.

[16] Zhi-qiang, F., Cheng-biao, W., Chun-he, T., Hong-sheng, Z., & Jean-Charles, R. (2013). Oxidation behaviors of SiO2/SiC coated matrix graphite of high temperature gas-cooled reactor fuel element. Nuclear Engineering and Design. Vol 265, p. 867 – 871.

[17] Guo, W., & Xiao, H. 2007. Modeling of TG curves of isothermal oxidation of graphite. Material Science & Engineering A, 197 – 200.

[18] Aluminum, Al. http://www.matweb.com/ Accessed 27- June -2016.

[19] Aluminum. http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7429905&Units=SI Accessed 27- June -2016

[20] W, Powell R., Ho C. Y, and Liley P. E. Thermal Conductivity of Selected Materials. D.C: National Standard Reference Data Series - National Bureau of Standars, 1966. Print.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO Y USO DE COLECTORES SOLARES COMO FOTOBIORREACTORES: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Beatriz Eugenia Stephens Camacho, Daniel Sauceda Carvajal, M. del Pilar Sánchez Saavedra y Marcela Ovalle Marroquín.
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE),
Carretera Ensenada-Tijuana, Ensenada, Baja California, C.P. 22860, México,
01 (646) 175-05-00, stephens@cicese.edu.mx, dsauceda@cicese.mx, psanchez@cicese.mx y marcelaovalle@gmail.com.

RESUMEN

Durante las últimas décadas, se ha presentado un gran interés en el estudio de las microalgas para el desarrollo de biocombustibles, debido esencialmente, a su gran capacidad de consumir CO_2, su rápida velocidad de crecimiento y habilidad de vivir en condiciones severas. Sin embargo, actualmente la producción de biocombustible por este método no es competitiva, principalmente por las tecnologías usadas y los costos del proceso de obtención del biocombustible. Debido a esto, uno de los principales tópicos de investigación dentro de esta área, es el diseño de fotobioreactores eficientes, los cuales buscan mejorar las características específicas que limitan la eficiencia de la producción de biocombustibles como son: baja producción de biomasa, inocuidad, estrés hidrodinámico, altos costos de construcción, cambios de concentración de pH, O_2 y CO_2 a lo largo de la tubería, áreas con iluminación deficiente, foto inhibición, dificultades en el control de crecimiento de las microalgas, evaporación y perdidas de agua significantes, entre otras.

En este trabajo se analiza el diseño y funcionamiento de fotobioreactores usados para el crecimiento de microalgas para producción de biocombustibles. Se muestran las ventajas y desventajas de los distintos diseños de los fotobioreactores y finalmente, con base en la revisión del estado del arte de los distintos tipos de fotobioreactores, se enlistan las características que deberían ser consideradas para el diseño y construcción de fotobioreactores eficientes.

ABSTRACT

During the last decades, there has been great interest in the study of microalgae for the production of biofuel, essentially due to its great capacity to consume CO_2, its rapid growth rate and ability to live in harsh conditions. However, current biofuel production by this method it is not competitive, mainly because of the technologies used and the cost of biofuel production processes. In this context, one of the main topics of research in this area is the design of efficient photobioreactors which expect to improve specific characteristics that limit the efficiency of biofuel production such as: low biomass production, innocuousness, hydrodynamic stress, high construction costs, changes in concentration of pH, O_2, and CO_2 along the pipe, areas with poor lighting, photo inhibition, difficulties in controlling growth of microalgae, evaporation, and significant loss of water, among others.

This review presents the design and operation analysis of photobioreactors used for the growth of microalgae for biofuel production. The advantages and disadvantages of different designs of studied photobioreactors are shown and finally, based on the review of the state of the art of various types of photobioreactors, characteristics that should be considered for the design and construction of efficient photobioreactors are listed.

Fotobiorreactor, microalgas, biocombustibles, colectores solares, energía solar.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la demanda de energía mundial incrementa con rapidez, debido principalmente al incremento de la industrialización y de la población del planeta. Asimismo, el uso de los combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural, que proveen el 80 % del suministro de dicha energía contribuye a la acumulación del dióxido de carbono (CO_2) en el medio ambiente y las emisiones de contaminantes que resultan de su uso son perjudiciales para la salud del ser humano. Además, el uso de combustibles fósiles es actualmente reconocido como insostenible debido al agotamiento de los recursos. Es por ello, que durante las últimas décadas el desarrollo de biocombustibles ha estado recibiendo mucha atención debido a las necesidades de energía y la conciencia ambiental. Los biocombustibles derivados de fuentes biológicas son: biohidrógeno, bioetanol, biometano, biobutanol y el biodiesel.

Los biocombustibles obtenidos por medio de la sintetización de microbios, pueden ser implementados gradualmente utilizando procesos de mezclado, hasta suplir el uso de los combustibles fósiles (Antoni, et al., 2007). Principalmente, el biodiesel representa una alternativa prometedora para cubrir parte de la demanda energética de los combustibles derivados de petróleo destinados al transporte (Linares, et al., 2012).

Para llevar a cabo el cultivo de dichos microorganismos no se requiere de tierras cultivables, por lo que su desarrollo no compite con espacios para el cultivo de plantas de consumo humano. Otra de las ventajas que presentan estos microorganismos, es que demandan menor consumo de agua potable y que incluso pueden cultivarse en agua salobre. Uno de los microorganismos más utilizado para la elaboración de biocombustibles son las microalgas. El cultivo de las microalgas se lleva a cabo en equipos que contienen las condiciones necesarias para su crecimiento y desarrollo, denotados como: Fotobiorreactores. Actualmente, no se cuenta con un diseño que asegure una alta eficiencia en cuanto al crecimiento óptimo de dichos microorganismos, debido a problemas principalmente, con la distribución de la luz a lo largo de la superficie del cultivo. Existen numerosas investigaciones en las cuales los autores concuerdan en que el diseño de un fotobiorreactor debe poseer ciertas características esenciales como: una distribución uniforme de la luz a lo largo y dentro del cultivo,

mantener a los microorganismos en movimiento para aumentar la frecuencia de exposición a la luz y evitar el asentamiento, poseer sistemas de control de temperatura y niveles de oxigeno, entre otros factores que asegurarían el crecimiento óptimo de los microorganismos y así obtener resultados significativos (Vasumathi, et al., 2012), (Kumar, et al., 2011), (Posten, 2009). Para el diseño de los fotobiorreactores no sólo es necesario tomar en cuenta los aspectos que los microorganismos requieren para poder desarrollarse, sino que también es necesario incluir en el desarrollo tópicos de carácter técnico tales como el uso de la energía solar para evitar el uso de luz artificial, la superficie del fotobiorreactor, el mejoramiento de la transferencia de masa y energía, entre otros. Esta es una de las principales razones por la cual es necesario realizar un estudio profundo acerca del uso y diseño de fotobiorreactores capaces de asegurar una alta eficiencia, cuyos diseños aseguren mejoras en las problemáticas actuales.

Un campo de oportunidad se presenta en el estudio de colectores solares para su aplicación como fotobiorreactores. Debido a que estos son diseñados para captar directamente la luz solar, una de las ventajas que podrían ofrecer, es que se aseguraría que toda la superficie donde se encuentre el cultivo sea iluminada por la luz solar.

FOTOSÍNTESIS Y ALGAS FOTOSINTÉTICAS

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual se captura la energía de la luz y se utiliza para impulsar la síntesis de hidratos de carbono a partir de CO_2 y H_2O, durante este proceso se convierte energía luminosa en energía química. La fotosíntesis oxigénica, es el tipo de fotosíntesis donde el agua es el donador primario de electrones y es propia de plantas, algas y cianobacterias, este proceso se describe en la siguiente ecuación

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{Energía luminosa}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (1)$$

El proceso global que describe la ecuación 1 está dividido en dos subprocesos para todos los organismos fotosintéticos. En el primer subproceso denominado como reacción luminosa, se utiliza la energía de la luz solar para llevar a cabo la oxidación fotoquímica del H_2O, es durante este subproceso cuando se lleva a cabo la liberación de O_2. El segundo subproceso, denominado como reacción oscura es donde se lleva a cabo la síntesis reductora de los hidratos de carbono a partir del CO_2 y agua. El proceso de la fotosíntesis depende principalmente de la luz de las regiones visible e infrarroja próximas del espectro, la mayoría de la energía del sol que llega a la superficie de la tierra se encuentra dentro de esta región del espectro (Mathews, et al., 2002).

Existen tres principales tipos de microorganismos que utilizan la energía de la luz: las cianobacterias, que frecuentemente se denominan como un tipo de microalgas, en cuyo proceso de fotosíntesis se produce O_2, las eubacterias fotosintéticas, cuyo proceso de fotosíntesis es anaerobio y no producen O_2 y las halobacterias, que no presentan clorofila ni transporte fotosintético (Linares, et al., 2012). La capacidad de absorción de la luz se encuentra íntimamente relacionada a los pigmentos que los microorganismos poseen, los carotenoides absorben luz con una intensidad de 440 nm, las clorofilas que se encuentran en la región azul en 400 a 500 nm, y clorofilas en la región roja 600 a 700 nm (Janssen, et al., 2002). Los requerimientos esenciales para el crecimiento de las microalgas son: el dióxido de carbono CO_2, el cual la microalga fija durante el proceso de fotosíntesis y para cuya fijación en $1 gr$ de biomasa de microalga seca es requerido de 1.65 a $1.83 gr$ de CO_2, la exposición a la luz, de la cual solo utilizan la energía disponible en el rango de longitud de onda de 440 a $700 nm$ la cual representada como radiación fotosintéticamente activa (PAR) que representa el 45% de la energía en la superficie de la tierra. También son necesarios otros tipos de nutrientes y la misma concentración de microalgas en el cultivo (Vasumathi, et al., 2012).

CULTIVO DE MICROALGAS

El cultivo de microalgas puede ser realizado en diferentes tipos de sistemas ya sea en reactores abiertos conocidos como lagunas abiertas o *raceways*, o en reactores cerrados generalmente llamados fotobiorreactores. Usualmente los sistemas abiertos se encuentran localizados en los exteriores y reciben directamente la luz solar, mientras que los fotobiorreactores pueden ser localizados en interiores usando luz artificial o exteriores aprovechando la luz solar (Gudín & Chaumont, 1991). La mayoría de las especies de microalgas puede desarrollarse apropiadamente en los fotobiorreactores, mientras que los sistemas abiertos están más limitados a los tipos de especies que pueden cultivar.

Geometría

Sistemas abiertos o *raceways.* Los sistemas abiertos de cultivo de microalgas son esencialmente dos tipos, tanques abiertos u *open ponds* y los llamados *raceways* o laguna abierta, cuya distinción entre sí es que estos últimos poseen un sistema de agitación y de mezclado del cultivo, como se muestra en la figura 1.

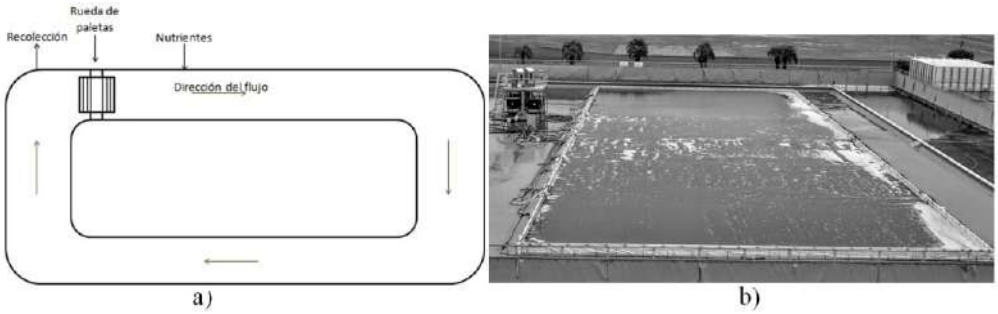


Figura 1. a) Esquema de un reactor tipo *laguna abierta*. b) Reactor *tanque abierto* de $1500 m^2$, *http://www.chitose-bio.com/news/252/.*

Fotobiorreactores. En este tipo de sistemas el cultivo se mantiene aislado del medio que le rodea y generalmente están equipados con sistemas de agitación, monitoreo de parámetros como pH, O_2, CO_2, temperatura, entre otras. La temperatura óptima para los cultivos de microalgas es reportada entre 20 y 24℃, sin embargo esta temperatura puede variar debido a la composición del medio de cultivo y al tipo de cepa cultivada (Mehlitz, 2009) (Bitog, et al., 2011). Actualmente existen algunos tipos de fotobiorreactores con características que los convierten en diseños especiales, no obstante existen distintos tipos de fotobiorreactores estándar los cuales se describen en la tabla 1. De acuerdo con la literatura revisada, queda claro que la distribución de la luz y el control de la temperatura son factores clave en el diseño de un fotobiorreactor. Una de las soluciones propuestas en la literatura para asegurar que el cultivo se mantenga iluminado uniformemente es añadir al diseño del fotobiorreactor un sistema de iluminación artificial, sin embargo, dicha acción incrementa los costos del diseño del sistema. Debido a estos factores y a algunas otras ventajas, una alternativa interesante es la utilización de colectores solares como fotobiorreactores.

Tabla 1. Diferentes tipos de fotobiorreactores: ventajas y desventajas.

Tipo de fotobiorreactor	Ventajas	Desventajas	Referencia
Placa plana	Excelente uso de luz y control de temperatura, alto coeficiente de transferencia de gas, baja acumulación de O_2, fácil limpieza, económico.	Dificultad para escalamiento, posee un cierto grado de crecimiento en las paredes del fotobiorreactor.	(Tredici & Zitelli, 1998) (Zhang, et al., 2002)
Columna de burbujas	Uso efectivo de la luz, escalamiento razonable, buena eficiencia de mezcla de cultivo, bajos requerimientos para enfriamiento.	Baja razón de superficie-volumen S/V, alto estrés hidrodinámico.	(Janssen, et al., 2002)
Tubulares	Uso de luz excelente, buen control de temperatura, alta productividad, escalamiento razonable, adecuado para cultivos al aire libre.	Crecimiento a lo largo de las paredes, disolución de O_2 a lo largo de la tubería.	(Mérida, et al., 2013) (Kumar, et al., 2011)
Sistema *airlift*	Buen uso de la luz, alto control de temperatura, alto coeficiente de transferencia de masa, alta productividad de biomasa.	Las microalgas presentan estrés hidrodinámico, dificultad para escalamiento, su construcción requiere de materiales sofisticados y costosos.	(Janssen, et al., 2002)
Tanque agitado	Excelente control de temperatura, mezclado uniforme del cultivo, bajo consumo de energía, uso de luz aceptable.	Dificultad para escalamiento, pequeña superficie de iluminación, se presenta estrés hidrodinámico en las microalgas.	(Kumar, et al., 2011) (Mérida, et al., 2013)
Tubular helicoidal	Gran área de superficie.	Presenta altas temperaturas, altos costos de iluminación.	(Bahadar & Khan, 2013) (Morita, et al., 2001)

Requerimientos de luz

La productividad de biomasa en un fotobiorreactor depende del medio del cultivo, la cepa cultivada y otros factores relativamente más sencillos de controlar como la temperatura y el suministro de nutrientes. En el caso del uso de luz solar, el suministro y control de la radiación solar que llega a la superficie del fotobiorreactor es de los parámetros más difíciles de controlar (Rabe & Benoit, 1962). En un fotobiorreactor cualquiera, la razón de crecimiento del cultivo μ depende directamente de la irradiancia promedio I_{av}, la cual es la cantidad de luz que recibe una sola célula que se mueve aleatoriamente dentro del cultivo y que a su vez depende de la irrandiancia externa I_o que llega a la superficie del fotobiorreactor, y de la geometría del mismo (Grima, et al., 1999). En cultivos de microalgas muy densos la penetración y la absorción de la luz es impedida por el crecimiento del cultivo en las paredes del fotobiorreactor, y como las células se encuentran en constante movimiento solo se ven expuestas a la luz durante un breve instante de tiempo dando lugar a los ciclos luz/oscuridad, como se muestra en la figura 2. El incremento en la velocidad de movimiento del cultivo es un factor que también afecta la duración de dichos ciclos de luz/oscuridad.

Otro factor importante que se toma en cuenta durante el diseño de fotobiorreactores es la trayectoria que sigue la luz después de incidir en la superficie del mismo. A medida que la trayectoria de la luz se incrementa, la intensidad de la luz disminuye y se alcanza un estado de equilibrio entre la entrada de luz y la absorción de las células en ese punto. El aumento en la trayectoria de la luz disminuye la intensidad de la misma lo que ocasiona que el crecimiento de las células se detenga (Wang, et al., 2014). Las longitudes de trayectorias luminosas reportadas en la literatura, que han presentado mejores resultados en distintos fotobiorreactores se encuentran entre 2.6 y $3 cm$, y debido a los resultados obtenidos con estas longitudes de trayectorias, no se recomienda utilizar trayectorias luminosas de más de $10 cm$ en cualquier tipo de fotobiorreactor (Flores, et al., 2003).

Existen múltiples trabajos donde se estudia la intensidad de la luz dentro del cultivo, y uno de los parámetros de control que generalmente se utiliza para llevar a cabo este tipo de modelado es la variación de la concentración de biomasa en el cultivo transcurrido un tiempo determinado.

En el trabajo desarrollado por Tebbani y otros, se define la trayectoria óptima de la luz maximizando la eficiencia de la utilización de la misma, utilizando como variables de control principales la intensidad de la luz incidente ajustando el voltaje del panel LED que utilizan como fuente de luz artificial, y la concentración de biomasa la cual es monitoreada cada 2 minutos mediante la realización de pruebas de turbidez. De la medición de la concentración de biomasa y la intensidad de la luz incidente, se calcula la razón de crecimiento que es un parámetro utilizado por el controlador para determinar las futuras entradas óptimas de control. Esta estrategia de control evita la foto inhibición en bajas concentraciones de biomasa y maximiza el crecimiento del cultivo usando altos niveles de intensidad de la luz en altas concentraciones de biomasa (Tebbani, et al., 2014).

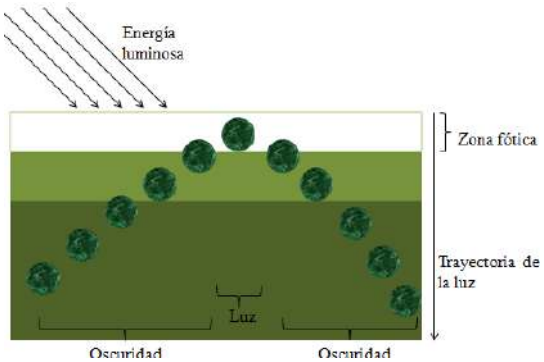


Figura 2. Trayectoria de la luz y ciclos luz/oscuridad.

Otro trabajo que coincide con el uso de trayectorias de luz cortas, es el realizado por Richmond y Zou, donde se utilizó un fotobiorreactor de placa plana con una agitación constante y una fuerte incidencia de luz, concluyendo que las trayectorias cortas de luz (trayectorias de luz de hasta 1 cm) provocan mejoras en la productividad fotosintética del cultivo (Richmond & Zou, 1999).

Un método utilizado para incrementar la razón de superficie/volumen iluminada es el empleo de fibra óptica, la cual se emplea en los fotobiorreactores utilizando cables para transmitir la luz colectada externamente en colectores solares (Carvalho, et al., 2011) . Según el trabajo desarrollado por Chen y otros, es posible diseñar un fotobiorreactor que sea capaz de utilizar una combinación de luz transmitida por medio de fibras ópticas y lámparas de halógeno y filamento de tungsteno para la producción de H_2. El fotobioreactor consiste en fibras ópticas modificadas dispuestas dentro del mismo como fuente interna de luz, la fuente de iluminación externa consiste en las lámparas de filamento de tungsteno y halógeno. La combinación de dos distintos tipos de luz aparentó mejorar la producción de H_2, sobre todo cuando las fibras ópticas y las lámparas externas se combinaron (Chen, et al., 2006). Otro trabajo relacionado con el uso de fibras ópticas para transmitir la luz al cultivo es el desarrollado por (Fleck-Schneider, et al., 2007) en cuyo fotobiorreactor diseñado, la luz es generada por una fuente externa de luz y distribuida mediante fibras ópticas dentro de un tubo de aspiración, que funciona como un elemento confinante para el medio de cultivo y como un elemento de transmisión de la luz requerida por las microalgas. El modelo matemático presentado incluye la influencia de los distintos cambios de luz y los ciclos de luz/oscuridad con duración de milisegundos.

Otra alternativa para transportar la luz dentro del medio de cultivo de las microalgas es utilizando guías de luz que pueden transmitir la luz profundamente en el sistema con pérdidas de intensidad despreciables y sin incrementar las fuerzas de cizallamiento. Dichas guías de luz son generalmente varillas de acrílico de 9.5 mm de diámetro con forma de cono o de extremo plano. La luz transmitida a través de las guías de acrílico incrementa significantemente con la calidad del acabado de su superficie, es decir que mientras más transparente el acabado al final de la guía de luz habrá una mejor transmisión de la luz (Carvalho, et al., 2011).

En el trabajo realizado por San Pedro y otros, se utilizan dos conjuntos de tres fotobiorreactores de placa plana los cuales utilizan la luz del sol como fuente principal de luz. El conjunto de fotobiorreactores cuenta con una capacidad de 400ℓ, y durante los experimentos se utilizaron dos orientaciones una de norte-sur y la otra este-oeste, esto con la intención de investigar la influencia de la orientación del fotobiorreactor en la producción de lípidos de la microalga utilizada. Para disminuir la radiación solar que llegaba a la superficie del fotobiorreactor se dispuso de malla de sombra en una de las caras del mismo, la cual atenuaba un 90% de la radiación solar incidente que fue medida mediante un piranometro dispuesto en la superficie del fotobiorreactor. Un resultado interesante en este trabajo, es que se hubiera esperado que la orientación del fotobiorreactor influyera en el desarrollo del cultivo, debido a que los patrones de radiación diaria cambian con la orientación. Sin embargo, debido a que los reactores utilizados no son tan largos y a la contribución del albedo, la media de radiación que recibió el cultivo fue aproximadamente lo mismo en ambas orientaciones. Los parámetros de análisis en este trabajo fueron la entrada específica de nitrato, la irradiancia promedio, temperatura y la razón de dilución (San Pedro, et al., 2016).

Uso de los colectores solares como fotobiorreactores

El diseño propio de los colectores solares asegura que la totalidad de la superficie absorbedora sea alcanzada por la radiación incidente dentro de los límites de apertura del colector. El cálculo de la radiación incidente en la superficie del colector solar puede ser estimado mediante la metodología propuesta por (Liu & Jordan, 1960), dicho cálculo depende de las condiciones geográficas del colector como la latitud$\emptyset$, el día del año n, la hora solar h, entre otras. Estas variables permiten calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa θ (Grima, et al., 1999) (Duffie & Beckman, 2013) .

De acuerdo al modelo matemático desarrollado por Fernández y otros, es posible estimar la longitud del camino que recorre un rayo de luz a un punto específico dentro del cultivo tomando en cuenta la atenuación de la luz solar cuando las concentraciones de biomasa de microalgas en el medio son altas. Dicho modelo es capaz de estimar el perfil de la irradiancia solar y la luz promedio dentro del cultivo en un fotobiorreactor tubular, el cual consta de un lazo externo que actúa como colector solar y que se encuentra sumergido en un tanque con liquido termostático cuyas paredes fueron pintadas de blanco con la intención de aumentar el reflejo de la radiación solar. Para llevar a cabo el desarrollo del modelo (Fernández, et al., 1997). Otro trabajo en donde se utilizan fotobiorreactores tubulares que aprovechan la luz solar como fuente principal de luz, es el presentado por Fernández y otros, donde se desarrolla un macromodelo que permite estimar la producción de biomasa a lo largo de un año en un fotobiorreactor tubular. El modelo evalúa la irradiancia solar en la superficie del fotobiorreactor como una función del día del año y la localización geográfica del mismo. De igual manera la geometría del fotobiorreactor es tomada en cuenta para el cálculo de la irradiancia promedio a la cual están expuestas las células dentro del cultivo. La última etapa del macromodelo es la estimación de la razón de crecimiento del cultivo como una función de la irradiancia. Este macromodelo fue probado en dos fotobiorreactores tubulares que poseen bucles externos los cuales funcionan como colectores solares, que a su vez fueron sumergidos en un tanque con líquido termostático. Una de las limitantes que se presentaron en este trabajo fue la foto inhibición debida a la alta irradiancia durante las horas del mediodía (Fernández, et al., 1998). En la investigación realizada por Camacho y otros, se llevó a

cabo la comparación de dos fotobiorreactores con geometrías distintas situados en la misma locación geográfica y utilizando el mismo tipo de cepa. Los fotobiorreactores utilizados fueron un fotobiorreactor vertical de tubos concéntricos y un fotobiorreactor tubular horizontal respectivamente. Los bucles de ambos fotobiorreactores recibían directamente la luz solar como fuente de luz principal. Los resultados obtenidos muestran que el arreglo del fotobiorreactor vertical es una alternativa para el uso en lugares con una latitud cercana a 45° debido a que el diseño evita los daños al cultivo causados por la foto inhibición causados por los altos valores de irradiancia solar alcanzados en verano (Camacho, et al., 1999).

El efecto de la concentración de biomasa en la productividad y la eficiencia fotosintética fue estudiado en el trabajo desarrollado por Vree y otros, dicho efecto se estudió en tres fotobiorreactores distintos: laguna abierta, tubular horizontal y tubular horizontal. Los tres fotobiorreactores fueron operados continuamente como turbidostato a diferentes concentraciones de biomasa. Cuando un fotobiorreactor se encuentra operando como turbidostato, la cosecha de microalgas se activa automáticamente cuando la concentración de biomasa alcanza el valor establecido. La supervisión de los tres fotobiorreactores fue realizada diariamente entre las 9:00 a.m. y las 10:00 a.m. cuando la densidad óptica medida se encontaba entre $680nm$ y $750nm$. En los tres sistemas distintos la mayor productividad de biomasa fue alcanzada en los días con mayor intensidad de luz, mientras que la mayor eficiencia fotosintética se logró en los días con una menor intensidad de luz. La productividad por área del fotobiorreactor tubular horizontal fue más baja cuando operó como turbidostato, por un periodo de 211 días, comparada con la productividad por área cuando operó como quimiostato, sin embargo los valores obtenidos como quimiostato se alcanzaron en un periodo de 8 días, durante el cual se observó una tendencia a disminuir la concentración de biomasa, esto indica que las altas productividades no pueden ser obtenidas por largos periodos de tiempo. Lo mismo sucedió con los fotobiorreactores tubular vertical y laguna abierta. En general, la productividad de biomasa bajo modo turbidostato resultó más estable comparada con el modo quimiostato, esto se observó más en los fotobiorreactores tubulares, en el fotobiorreactor de laguna abierta dicho modo permitió una evaluación más precisa y un control de la concentración de biomasa que resulta en un incremento del rendimiento (Vree, et al., 2016).

CONCLUSIONES

La tecnología para la producción de biocombustibles a partir de microalgas presenta diversas limitaciones que afectan directamente el rendimiento en la producción de biomasa y en la dificultad del escalamiento de los sistemas de producción. Con base en la discusión presentada en este trabajo de investigación, se enlistan a continuación las características que deberían ser consideradas en el diseño y construcción de fotobiorreactores eficientes:

1. La disponibilidad de la luz y la geometría del fotobiorreactor son factores que juegan un papel de suma importancia para el desarrollo del cultivo. Es por ello que la distribución e intensidad de la luz, debe ser uniforme a lo largo de todo el cultivo, dentro de esta característica se debe de tomar en cuenta que la trayectoria de la luz dentro del cultivo no sea mayor a $10cm$, aunado a esto se debe asegurar que el cultivo sea mezclado de manera sistemática para aumentar la frecuencia de los ciclos de luz/oscuridad, es decir que las células sean expuestas a la luz durante una mayor cantidad de tiempo.
2. El sistema de desarrollo debe de contar con la instrumentación adecuada para la supervisión constante de las concentraciones de CO_2, pH, temperatura, O_2 y los nutrientes necesarios para el tipo de cepa cultivada.
3. El fotobiorreactor debe poseer un diseño sencillo que permita realizar la limpieza de la superficie del mismo, para evitar efectos negativos que disminuyen la producción de biomasa, como el sombreado sobre las células más alejadas de la superficie.

El aprovechamiento de luz solar en fotobiorreactores es una alternativa para reducir los costos de producción, y las desventajas que se presentan al utilizarla como las condiciones climáticas y los cambios de estación pueden afrontarse implementando otro tipo de sistemas como los colectores solares concentradores para la producción de biocombustibles. Utilizar colectores solares concentradores con sistemas de seguimiento basados en la geografía y condiciones climáticas específicas del lugar puede hacer más eficiente la captura de radiación solar e incluso adaptar la intensidad de radiación captada de acuerdo a las necesidades específicas de las microalgas durante su crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por el apoyo para realizar este trabajo a través del proyecto no. 623801 de la convocatoria interna.

REFERENCIAS

Antoni, D., Zverlov, V. V. & Schwarz, W. H., 2007. Biofuels from microbes. *Applied Microbiology and Biotechnology,* Volumen 77, pp. 23-35.

Bahadar, A. & Khan, M. B., 2013. Progress in energy from microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Volumen 27, pp. 128-148.

Bitog, J. y otros, 2011. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture,* Volumen 76, pp. 131-147.

Camacho, F. G., Gómez, A. C., Fernández, F. G. A. & Grima, J. F. S. y. E. M., 1999. Use of concentric-tube airlift photobioreactors for microalgal outdoor mass cultures. *Enzyme and Microbial Technology,* Volumen 24, pp. 164-172.

Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M. & Malcata, F. X., 2011. Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology,* Volumen 89, pp. 1275-1288.

Chen, C.-Y., Lee, C.-M. & Chang, J.-S., 2006. Hydrogen production by indigenous photosynthetic bacterium Rhodopseudomonas palustris WP3-5 using optical fiber-illuminating photobioreactors. *Biochemical Engineering Journal,* 32(1), pp. 33-42.

Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances,* Volumen 25, pp. 294-306.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes.* New Jersey: Wiley.

Fan, X. & Burton, R., 2009. Recent development of biodiesel feedstocks and the applications of glycerol: A Review. *The Open Fuels and Energy Science Journal,* Volumen 2, pp. 100-109.

Fernández, F. A., Camacho, F. G., Pérez, J. S. & Grima, J. F. S. y. E. M., 1998. Modeling of Biomass Productivity in Tubular Photobioreactors for Microalgal Cultures: Effects of Dilution Rate, Tube Diameter, and Solar Irradiance. *Biotechnology and Bioengineering*, Octubre, 58(6), pp. 605-616.

Fernández, F. A. y otros, 2003. Outdoor production of Phaeodactylum tricornutum biomass in a helical reactor. *Journal of Biotechnology*, Volumen 103, pp. 137-152.

Fernández, F. g. A., Camacho, F. G., Pérez, J. S. & Grima, J. F. S. y. E. M., 1997. A Model for Light Distribution and Average Solar Irradiance Inside Outdoor Tubular Photobioreactors for the Microalgal Mass Culture. *Biotechnology and Bioengineering*, 55(5), pp. 701-714.

Fleck-Schneider, P., Lehr, F. & Posten, C., 2007. Modelling of growth and product formation of Porphyridium purpureum. *Journal of Biotechnology*, 132(2), pp. 134-141.

Flores, C. C., Castro, J., Cotera, L. F. F. & Villanueva, R. C., 2003. Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28(8), pp. 450-456.

Grima, E. M., Fernández, F. A., Camacho, F. G. & Chisti, Y., 1999. Photobioreactors: light regime, mass transfer and scaleup. *Journal of Biotechnology*, Volumen 70, pp. 231-247.

Gudín, C. & Chaumont, D., 1991. Cell fragility — The key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors. *Bioresource Technology*, 38(2-3), pp. 145-151.

Janssen, M., Tramper, J., Mur, L. & Wijffels, R., 2002. Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. *Biotechnology and Bioengineering*, Volumen 81, pp. 193-210.

Janssen, M., Tramper, J., Mur, L. & Wijffels, R., 2003. Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. *Biotechnology and Bioengineering*, Volumen 81, pp. 193-210.

Kalogirou, S., 2003. The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, Volumen 76, pp. 337-361.

Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volumen 30, pp. 231-295.

Kumar, C. y otros, 2011. Development of suitable photobioreactors for CO2 sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, Volumen 102, pp. 4945-4953.

Kumar, K. y otros, 2011. Development of suitable photobioreactors for CO2 sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, Volumen 102, pp. 4945-4953.

Linares, L. C. F., Montoya, J. M., Oropeza, A. M. & Corona, J. A. B., 2012. Producción de biocombustiblesd a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, Septiembre.pp. 101-115.

Liu, B. Y. H. & Jordan, R. C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), pp. 1-19.

Márquez, J. C., Vásquez, A. L. & Martínez, F. M., 2010. Modeling of direct solar radiation in a compound parabolic collector (CPC) with tha ray tracing technique. *Dyna*, pp. 132-140.

Mathews, C. K., Holde, K. v. & Ahern, K. G., 2002. *Bioquímica.* Madrid: Addison Wesley.

Mehlitz, T. H., 2009. *Temperature influence and heat management requeriments of microalgae cultivation.* California Polytechnic State University, USA: Master Thesis.

Mérida, L. G. R., Zepka, L. Q. & Lopes, E. J., 2013. Fotobiorreactor: Herramienta para el cultivo de cianobacterias. *Ciencia y Tecnología*, 6(2), pp. 9-19.

Morita, M., Watanabe, Y., Okawa, T. & Saiki, H., 2001. Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactors incorporating Chlorella sp. under various culture medium flow conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, Volumen 74, pp. 136-144.

Morita, M., Watanabe, Y. & Saiki, H., 2000. Investigation of photobioreactor design for enhancing the photosynthetic productivity of microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, Volumen 69, pp. 693-698.

Posten, C., 2009. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in life science*, Volumen 3, pp. 165-177.

Rabe, A. & Benoit, A., 1962. Mean light intensity- a useful concept in correlating growth rates of dense cultures of microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 4(4), pp. 377-390.

Richmond, A., 2004. Principles for attaining maximal microalgae productivity in photobioreactors: an overview. *Hydrobiologia*, Volumen 512, pp. 33-37.

Richmond, A. & Zou, N., 1999. Efficient utilisation of high photon irrandiance for mass production of photoautotrophic micro-organism. *Journal of Applied Phycology*, Volumen 11, pp. 123-127.

San Pedro, A., González López, C., Molina Grima, E. & Acién, F., 2016. Outdoor pilot production of Nannochloropsis gaditana: Influence of culture parameters and lipid production rates in flat-panel photobioreactors. *Algal Research*, Volumen 18, pp. 156-165.

Tebbani, S., Titica, M., Ifrim, G. & Caraman, S., 2014. Control of the light-to-microalgae ratio in a photobioreactor. *Proceedings of the 18th International Conference on System Theory, Control and Computing*, pp. 393-398.

Tredici, M. R. & Zitelli, G., 1998. Effiency of sunlight utilization: tubular versus flat photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 57(2), pp. 187-197.

Ugwu, C., Aoyagi, H. & Uchiyama, H., 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, Volumen 99, pp. 4021-4128.

Vasumathi, K., Premalatha, M. & Subramanian, P., 2012. Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), pp. 5443-5450.

Vree, J. H. d. y otros, 2016. Turbidostat operation of outdoor pilot-scale photobioreactors. *Algal Research*, Volumen 18, pp. 198-208.

Wang, S. K., Stiles, A. R., Guo, C. & Liu, C. Z., 2014. Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Engineering in Life Sciences*, Volumen 14, pp. 550-559.

Zhang, K., Kurano, N. & Miyachi, S., 2002. Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat plate photobioreactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Volumen 25, pp. 97-101.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN REACTOR SOLAR VOLUMÉTRICO

H.I. Villafán Vidales, C.E. Arreola-Ramos, C.A. Arancibia-Bulnes
Concentración Solar, Instituto de Energías Renovables, Privada de Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, México, 7773620090 ext. 29831, **hivv@ier.unam.mx.**
M. Montiel-González, C.E. De Mendoza Rivero
Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Cuernavaca, Morelos, 62210, México.

RESUMEN
Históricamente la energía solar concentrada se ha utilizado para la producción de energía eléctrica, sin embargo una de las futuras aplicaciones de ésta incluye la producción de "combustibles solares" para el sector transporte. En este sentido, los procesos termoquímicos que utilizan energía solar concentrada como fuente de calor del proceso constituyen una opción prometedora para la producción de estos combustibles, ya que utilizan la mayoría del espectro solar y presentan altas eficiencias de conversión solar. Un elemento clave para llevar a cabo de una manera eficiente los procesos solares termoquímicos son los reactores solares, por lo tanto, el diseño de prototipos que alcancen temperaturas de reacción en todo el volumen es fundamental. Dicha tarea se logra implementando modelos que nos permitan predecir el comportamiento térmico de éstos en condiciones diversas de operación.
En este trabajo se desarrolló un modelo CFD de un reactor solar volumétrico que permitió analizar a detalle la interacción entre parámetros del medio, como tamaño de poro, porosidad, con diferentes condiciones de operación, como caudal de gas y temperatura del medio poroso. Este modelo permitió obtener información valiosa sobre la interacción de estos parámetros en el diseño del reactor.

ABSTRACT
Concentrated solar Energy has been historically used for the production of electricity, however one of the future applications consists in the production of "solar fuels" for the transport sector. Thermochemical processes that use concentrated solar energy as a heat source of the process constitute a promising option for the production of fuels due to high efficiencies of solar conversions. An essential element to efficiently perform thermochemical processes is the "solar reactor", thus the design of prototypes that reach reaction temperatures in all the reactor's volume is fundamental. The modeling is an important tool in the design of reactors that permits predicting the thermal behavior of solar reactors under different operational conditions. This study presents a CFD model of a volumetric solar reactor that allow analyze in detail the interaction of different parameters of the medium as pore size, porosity, with different operational conditions as mass flow and temperature or the porous media. The model provided valuable information on the interaction of these parameters with the design of the reactor.

Palabras claves: Energía solar concentrada, CFD, medio poroso, combustibles solares

INTRODUCCIÓN
El hidrógeno (H_2) presenta una alta densidad energética específica, está libre de carbono y su combustión produce sólo agua, por lo es un combustible alternativo atractivo para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Este elemento, a diferencia de los hidrocarburos, no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que se encuentra combinado en otros compuestos, como los hidrocarburos o el agua. Este hecho obliga a tener que obtenerlo por distintos procedimientos, siendo esto uno de los problemas a resolver para su uso masivo en el futuro, y uno de los campos en los que más recursos se están invirtiendo, pues muchas de las ventajas de su uso pueden disminuir en función del proceso de obtención [1]. Hoy en día, la mayoría del hidrogeno (95%) que se consume actualmente se obtiene por el reformado de metano con vapor de agua [2]. Sin embargo, pese a que el reformado sea una opción barata y tecnológicamente madura, resulta evidente que para que el hidrógeno sustituya a los combustibles fósiles y sea sustentable, es necesario que la energía primaria sea renovable [2]. En particular, el uso de la energía solar para obtener H_2 resulta muy conveniente, ya que es una de las fuentes más abundantes de la Tierra.
Para obtener hidrógeno con energía solar existen básicamente tres diferentes rutas o métodos: método electroquímico, el fotoquímico y el termoquímico [3]. Este último proceso tiene un gran potencial, ya que evaluaciones económicas han demostrado que la producción termoquímica de H_2 puede ser competitiva con procesos electroquímicos, fotoquímicos, y en ciertas condiciones, podría competir con procesos convencionales basados en combustibles fósiles [4].
De los diversos procesos termoquímicos existentes [5] son de particular interés los ciclos termoquímicos, ya que se confía que a mediano y largo plazo solucionen el problema de la producción masiva de H_2 limpio.

Los ciclos termoquímicos funcionan con el principio de transición que se da entre la forma oxidada (M_xO_y) o reducida de un óxido metálico (M_xO_{y-1}). En un primer paso el óxido metálico se reduce y se obtiene oxígeno, esto es:

Reducción térmica (RT): $M_xO_y \rightarrow M_xO_{y-1} + ½\ O_2$ (1)

En un segundo paso el óxido metálico reducido se oxida con la presencia de H_2O para producir H_2:

Generación de H_2 (G): $M_xO_{y-1} + H_2O/CO_2 \rightarrow M_xO_y + H_2$ (2)

Un elemento clave para llevar a cabo estos procesos con energía solar concentrada es el *reactor solar*, el cual es un tipo de receptor solar en donde la energía solar concentrada se usa para llevar a cabo las diferentes reacciones químicas [6]. Un tipo innovador de reactores solares son los que utilizan estructuras monolíticas porosas, en el cual se coloca una matriz cerámica porosa impregnada con el catalizador o el reactivo. Este medio poroso se irradiada directamente con energía solar concentrada con el fin de alcanzar temperaturas de reacción [7]. Las ventajas de usar este tipo de dispositivos son varias, y algunas de ellas son las siguientes [8]: (a) Se evita el transporte de sólidos, ya que no hay que alimentar los reactivos al reactor, y tampoco recolectar los productos, porque el reactivo y el producto permanecen fijos a la matriz cerámica, (b) ambas reacciones, reducción y oxidación, se pueden llevar a cabo con el mismo reactor, (c) hay una alta área superficial grande por unidad de volumen y por lo tanto, una mejor interfaz de contacto entre el gas y el sólido y una más efectiva transferencia de masa. A la fecha se han propuesto sólo unos pocos de reactores solares de este tipo. El primer concepto de este tipo de reactores se desarrolló con los proyectos HYDROSOL e HYDROSOL-II [9-11] y la idea surgió por la experiencia que tuvo el grupo de investigadores con convertidores catalíticos para automóviles y receptores volumétricos para radiación solar concentrada. Posteriormente surgieron otros prototipos que utilizan estructuras cerámicas en forma de espuma. Con este tipo de cerámicos es más difícil controlar el tamaño de poro y conocer la porosidad del medio, sin embargo el costo de estas estructuras es mucho más bajo que las estructuras en forma de panal. Con el objeto de implementar este tipo de procesos en el horno solar del IER se propone que el reactor solar sea un reactor monolítico basado en estructuras cerámicas en forma de espuma. En el reactor se diseñará de tal manera que nos permita irradiar directamente con energía solar concentrada la estructura porosa con el objeto de alcanzar temperaturas de reacción (~1500 ºC).

Con el objeto de diseñar un receptor solar con una distribución de temperaturas adecuadas en todo el medio donde se coloca el reactivo es necesario desarrollar modelos que no permitan predecir el comportamiento térmico de éste en diversas condiciones operacionales. En los reactores monolíticos las propiedades geométricas del medio poroso, como tamaño de poro, porosidad, así como las propiedades temofísicas del material y del fluido determinan la eficiencia del receptor volumétrico, por lo tanto, en este trabajo se desarrolla un modelo en 3D que nos permite conocer la distribución de temperaturas y distribución de flujo al interior del reactor y en el medio poroso, tanto en la fase sólida como en el fluido, para diferentes condiciones operacionales en las que se evaluará el reactor, como porosidad, flujo másico, flujo radiativo, entre otras.

En este trabajo se presenta un estudio de la Dinámica de Fluidos Computacional y transferencia de calor para determinar la distribución de temperaturas y el comportamiento del fluido al interior del reactor.

METODOLOGÍA

Descripción del problema

El reactor que se modelo en este trabajo se representa en la figura 1a. Este reactor tiene como objetivo obtener hidrógeno o gas de síntesis a través de ciclos solares termoquímicos. El reactor consiste en una cavidad cilíndrica de alúmina no porosa (95% alúmina) con una abertura de 15 cm de diámetro que permite el paso de la radiación solar concentrada. Las paredes laterales de la cavidad se aíslan con una capa de 12.5 cm de fibras de Al_2O_3-SiO_2 con el objeto de disminuir las pérdidas laterales por conducción. Tanto la cavidad como el aislante se introducen a una carcasa cilíndrica de acero inoxidable. El sistema se cierra con una ventana frontal de vidrio borosilicato de 40 cm de diámetro que permite: mantener una atmósfera controlada y facilitar el paso de la radiación solar concentrada a la zona de reacción. Al interior del reactor se coloca un cilindro cerámico poroso reticulado de 15 cm de diámetro hecho de Al_2O_3 con pureza del 99%. Este cerámico poroso se impregna del óxido mixto y se irradia directamente con energía solar concentrada proveniente del Horno solar del IER-UNAM. La irradiación directa del reactivo permite proveer eficientemente la energía necesaria para llevar a cabo la reacción química. El gas inerte se inyecta radialmente por 6 entradas ubicadas cerca de la ventana, también se colocan otras 4 entradas radiales alrededor del cono cerca del cerámico poroso. Los gases producto de la reacción y de arrastre salen del reactor a través de una salida ubicada en la parte posterior del reactor.

Descripción del modelo físico.

La figura 1b muestra una representación esquemática del modelo físico del reactor con los diferentes dominios computacionales simulados (fluido, sólido y medio poroso). La cavidad, la parte frontal del reactor, las entradas de gases y la salida son modeladas como un fluido, mientras que al aislante es modelado como aislante. El cilindro cerámico es modelado como un dominio poroso de dos fases (sólido y fluido).

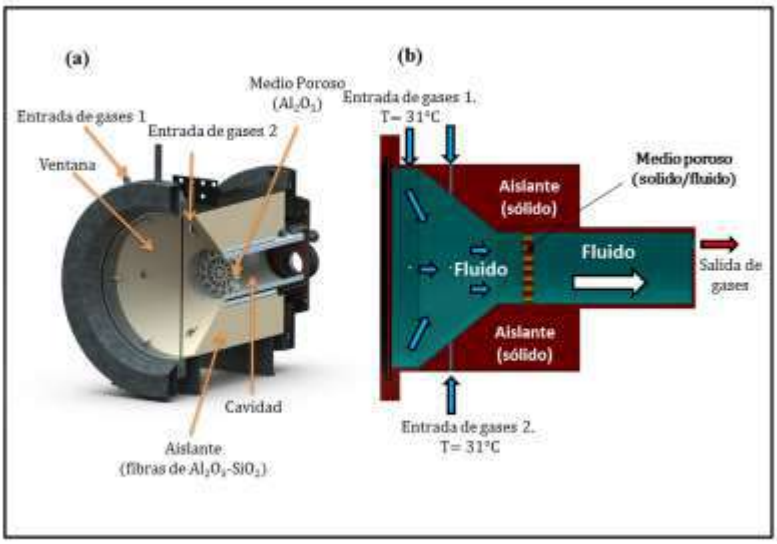


Figura 1. (a) Esquema del reactor solar, (b) Esquema del sistema modelado con sus diferentes dominios (sólido, fluido y medio poroso (sólido y fluido)).

Para la simulación numérica se considera lo siguiente: (a) la porosidad es uniforme en la matriz cerámica, (b) el sistema está en estado estacionario, (c) se simula dos caudales uno para flujo laminar y otro para flujo turbulento, (d) las propiedades termofísicas del fluido y del sólido dependen de la temperatura, (e) los efectos de flotación, disipación viscosa y expansión térmica son despreciables. De acuerdo a lo anterior las ecuaciones gobernantes son las siguientes:

(1) *Conservación de masa*:

$$\nabla \cdot \rho_f u = 0 \tag{3}$$

donde u es la velocidad promedio, y ρ_f es la densidad del fluido.

(2) *Ecuación de cantidad de movimiento*.

$$\nabla \cdot \left(\rho_f u u\right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \nabla\left[-\rho_f \overline{u'u'}\right] + F \tag{4}$$

donde $\rho_f \overline{u'u'}$ es el esfuerzos de Reynolds, F es la caída de presión resultante del medio poroso.

Para un medio homogéneo este último término se determina de la siguiente manera:

$$F = -\left(\frac{\mu}{K_1} u + \frac{\rho}{K_2} |u| u\right) \tag{5}$$

donde K_1 es el coeficiente de permeabilidad y K_2 es coeficiente inercial. Estos dos coeficientes dependen de las características del medio poroso, por esta razón diversos grupos de investigación se han enfocado a calcular y correlacionar estos parámetros con la porosidad y la longitud característica del medio poroso [12-13]. En este trabajo se utiliza la correlación de Wu et al. [14] donde:

$$K_1 = \frac{d_s^2}{1039 - 1002\phi} \text{ y } K_2 = \frac{0.5138\phi^{-5.739}}{d_s} \tag{6}$$

en donde ϕ es la porosidad y d_s es el diámetro del poro.

(3) Además se requiere de la ecuación de la energía cinética turbulenta ε y la ecuación para la disipación de energía cinética turbulenta κ:

$$\nabla \cdot (\rho k u) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \nabla k\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{7}$$

(4) *Ecuación para la disipación de energía cinética turbulenta*:

$$\nabla \cdot (\rho \varepsilon u) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(G_k + C_{3\varepsilon} G_b\right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{8}$$

Con la finalidad de obtener más información de la temperatura tanto del fluido como del sólido se usa un modelo de no equilibrio local térmico (LTNE, por sus siglas en inglés) en la ecuación gobernante de energía. El modelo LNTE resuelve dos ecuaciones de energía, una para el fluido y otra para el sólido:

(5) *Ecuación de conservación de energía para la fase sólida*.

$$\nabla\cdot(\lambda_{ef}\cdot\nabla T_s)+h(T_s-T_f)=0 \qquad (9)$$

(6) *Ecuación de conservación de energía para el fluido*

$$\nabla(\rho_f c_{pf} u T_f)=\nabla(\lambda_f \nabla T_f)+h(T_s-T_f) \qquad (10)$$

El acoplamiento de la ecuación de energía para ambas fases se da a través del término de convención volumétrica *h*. Este término se calcula usando la siguiente correlación de Wu et al. [15] en donde se relaciona la porosidad y la velocidad del fluido:

$$h=\frac{2.096\phi^{0.38}\lambda_f \mathrm{Re}^{0.438}P(\phi)}{d_s^2} \qquad (11)$$

donde $P(\phi)=-8.278\phi^{0.38}+57,384\phi^{1.38}-106.63\phi^{2.38}+95.756\phi^{3.38}-37.24\phi^{4.38}$ (12)

Condiciones de frontera

Para resolver las ecuaciones gobernantes anteriormente descritas se aplican las siguientes condiciones de frontera:
En las paredes exteriores del reactor se considera convección natural, en donde se utilizó una correlación para el número de Nusselt de una placa vertical [16] y un cilindro horizontal [17]. Por simplicidad se considera que la cara frontal del sólido tiene una temperatura constante de 1500 ºC y que la ventana tiene una temperatura constante de 70 ºC. Por las entradas radiales se considera que entra Argón a una temperatura de 300 K y un flujo volumétrico de 2 y 6 L/min. A la salida se considera que el gradiente de presión es cero.

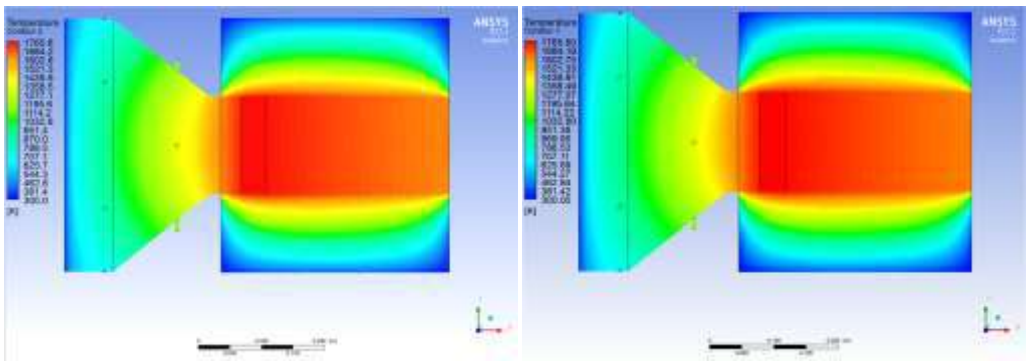
Solución numérica

Las ecuaciones gobernantes fueron discretizadas en 355,170 elementos que se resolvieron con el programa ANSYS FLUENT 17.1. El reactor fue simulado con dos modelos de turbulencia (κ-ε y esfuerzos de Reynolds), dos métodos de acople presión-velocidad (SIMPLE Y SIMPLEC), dos esquemas de diferenciación de la ecuación de energía cinética turbulenta κ (primer y Segundo orden). La ecuación de energía fue resuelta aplicando un esquema de discretización de primer, segundo y tercer orden: Power law, Upwind y QUICK, respectivamente.

RESULTADOS

Para analizar el comportamiento térmico y la dinámica del fluido en el interior del reactor, se simularon dos casos: 1. Considerando las entradas del gas de arrastre, paralelas a la ventana de cuarzo. 2. Considerando las entradas del gas de arrastre en la zona cónica del reactor.

En la figura 2 se muestra el contorno de temperaturas en el interior del reactor para un caudal de 2 L/min y 6 L/min, respectivamente.

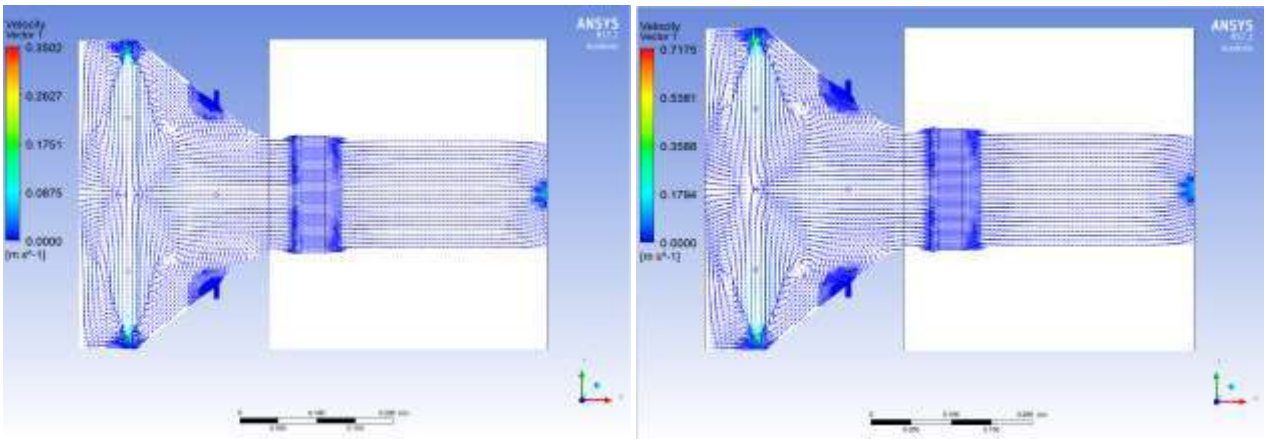


a) b)

Figura 2. Contorno de temperaturas en el reactor para un caudal de a) 2 L/min y b) 6 L/min.

En general, el campo de temperaturas es similar en los dos casos simulados. En la figura 2 se observa que el comportamiento de las isotermas es muy parecido para los dos caudales simulados. Las mayores temperaturas se observan en la región del medio poroso y con un régimen totalmente conductivo, cuya distribución disminuye uniformemente hacia el interior del aislante. Al exterior del aislante se alcanzan temperaturas de ~150 ºC, por lo tanto se concluye que la carcasa de acero inoxidable no necesita refrigeración. En el medio poroso se aprecia que las temperaturas son casi homogéneas, y debido a que no existe diferencia significativa entre los contornos de temperatura para los diferentes casos es recomendable utilizar caudales bajos con el fin de disminuir costos.

En la figura 3 se muestran los vectores de velocidad en el interior del reactor para un caudal de 2 L/min y 6 L/min, respectivamente, para el caso 1.

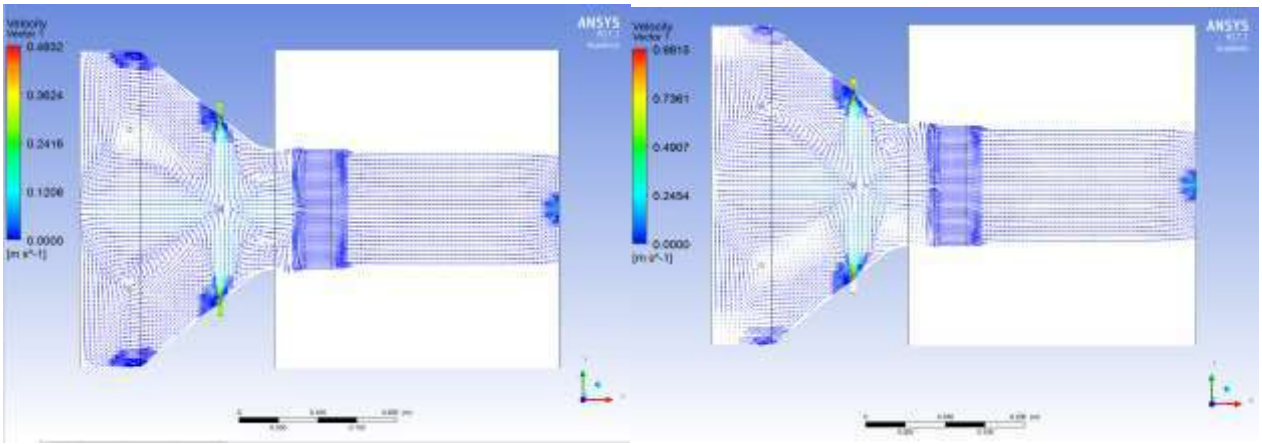


a) b)

Figura 3. Perfil de velocidades en el reactor para un caudal de a) 2 L/min y b) 6 L/min.

Para un caudal de 2 L/min, se observa un comportamiento en régimen laminar, debido a que las moléculas del gas de arrastre mantienen un movimiento casi despreciable. Sin embargo, conforme se incrementa el caudal de entrada hasta 6 L/min, las moléculas del gas de arrastre tienen mayor movimiento, provocando que el régimen laminar desaparezca y el flujo turbulento se haga presente, esto se observa porque en la región del cono aparecen vórtices de recirculación del fluido. Dicha recirculación cerca de la ventana ayuda a su enfriamiento, y previene que gases producto de la reacción se depositen en ella. Sin embargo, se aprecia que por ser simétricas las entradas hay un choque del fluido que lo empuja hacia el centro de la ventana, lo cual puede provocar posibles choques térmicos en esa zona debido a que llega más flujo a esa zona.

En la figura 4 se muestra el perfil de velocidades en el interior del reactor para un caudal de 2 L/min y 6 L/min para el caso 2, cuando las entradas del gas de arrastre se colocan en la zona cónica del reactor. En ambos casos se observa que por ser entradas simétricas hay un chocque del fluido y una parte se va al frente (cerca de la ventana), mientras que otra parte se va al medio poroso provocando recirculación del fluido cerca de éste. Dichas recirculaciones son perjudiciales para la eficiencia del reactor debido a que el O_2 liberado de la reacción de reducción no se sale del reactor adecuadamente provocando posibles recombinaciones en el medio poroso.



a) b)

Figura 4. Vectores de velocidad en el reactor para un caudal de a) 2 L/min y b) 6 L/min.

Al comprar ambos casos se encuentra que cuando las entradas se colocan en la zona cónica del reactor, el fluido se estanca cerca de la ventana debido a que hay una zona plana. Por otro lado, cuando las entradas están en el cono, parte del fluido se va al centro de la ventana, y en la parte inferior y superior del cono provoca recirculación del fluido.

CONCLUSIONES

Se realizó una simulación númerica de un reactor solar volúmetrico con el fin de estudiar el comportamiento térmico y la dinámica del fluido en el interior del reactor, para ello se simularon dos posibles casos de operación para dos flujos másicos: (a) Considerando las entradas del gas de arrastre, paralelas a la ventana de cuarzo, y (b) Considerando las entradas del gas de arrastre en la zona cónica del reactor.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que para el reactor es recomenbable usar caudal bajo (2 L/min), ya que ayuda a mantener una temperatura homogénea en todo el medio reduciendo costos de operación. Así mismo se concluye que la carcaza de acero inoxidable no necesita refrigeración, ya que se alcanzan temperaturas máximas de 150 ºC.

Al analizar los vectores de velocidad al interior del reactor para los dos posibles casos de operación se aprecia que en ambos casos no es recomendable diseñar entradas simétricas, ya que provocan que el fluido choque al interior y se generen zonas de recirculación que pueden reducir la eficiencia del reactor o provocar choques térmicos en la ventana.
Se necesita estudiar el comportamiento térmico del reactor bajo diferentes condiciones de operación, como temperatura o porosidades.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado para realizar esta investigación a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IA101115 “Modelado de reactores solares termoquímicos basados en receptores volumétricos porosos”.

REFERENCIAS

[1] Linares, Moratilla S., El hidrógeno y la Energía. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Madrid.
[2] Pavlovic T. M., Radonjic I. S., . Milosasavljevic D. D, Pantic L. S. (2012). A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, p. 3891-3902.
[3] Tyner C.E., Kolb G.J., Geyer M., Romero M. (2001) Concentrating solar power in 2001–an IEA/SolarPACES summary of present status and future prospects. SolarPACES 2001.
[4] Steinfeld A., Palumbo R. (2001). Solar thermochemical process technology. Encyclopedia of Physical Science & Technology, Academic Press, Vol 15, p. 237-56.
[5] Steinfeld A. (2005) Solar thermochemical production of hydrogen-a review, Solar Energy Vol. 78, p.603-615.
[6] Alonso E., Romero M. (2015) Review of experimental investigation on directly irradiated particles solar reactors, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 41, p. 53-67.
[7] Jang J.T., Yoon, K.J., Han, G.Y. (2014) Methane reforming and water splitting using zirconia-supported cerium oxide in a volumetric receiver–reactor with different types of foam devices. Solar Energy Vol. 101, p.29-39.
[8] Villafán Vidales H.I., Abanades S., Caliot C., Romero-Paredes H. (2011) Heat transfer simulation in a thermochemical solar reactor based on a volumetric porous receiver. Applied thermal Engineering Vol. 31, p. 3377-3386.
[9] Agrafiotis C., Roeb M., Konstandopoulos A.G., Nalbandian L., Zaspalis V.T., Sattler C., Stobbe P., Steele A.M. (2005). Solar water splitting for hydrogen production with monolitic reactors. Solar Energy Vol. 79, p. 409-421.
[10] Roeb M., Sattler C., Klüser R., Monnerie N., De Oliveira L., Konstandopoulos A.G., Agrafiotis C., Zaspalis V.T. , Nalbandian L. (2006). Solar hydrogen production by two-step cycle based on mixed iron oxides. J Solar Energy Engineering Vol. 128, p. 125-133.
[11] Konstandopoulos A.G., Lorentzou S. (2009). Novel Monolitic Reactors for solar thermochemical water splitting. Solar Hydrogen & Technology, Cap.20, Edited by Lionel Vayssieres. John Wiley & Sons.
[12] Richardson J.T., Peng Y., et al., 2000. Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop. Applied Catalysis A, General Vol. 204, p.19–32.
[13] Fourie J.G., Du Plessis, J.P., 2002. Pressure drop modelling in cellular metallic foams. Chemical Engineering Science Vol. 57, p. 2781–2789.
[14] Wu Z., Caliot C., et al., 2010. Experimental and numerical study on pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications. Applied Energy Vol. 87, p. 504–513.
[15] Wu Z., Caliot C., Bai F., Flamant G., Wang Z. (2011) Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimize volumetric solar air receiver performances, Int. J. Heat and Mass Transfer Vol. 54, p.1527-1537.
[16] Churchill S.W., Chu H.H.S. (1975) Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. Int.J. Heat Mass Transf. Vol.18, p. 1323–1329.
[16] Churchill S.W., Chu H.H.S. (1975) Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. Int. J. Heat Mass Transf. Vol.18, p. 1049–1053.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE CAMPO DE COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS SOLARES PARA MICRO TURBINA DE VAPOR

David Franco Martínez y Rogelio González Pérez
Centro Tecnológico DGAPA, FES Aragón UNAM , Rancho seco s/n, Ciudad Nezahualcoyotl, Estado de México, C.P 57130, México, (52) 55 56230960, Fax (52) 55 56230864, **davd_francom@hotmail.com.**

RESUMEN

Se cuenta con un campo de colectores solares cilíndrico parabólicos, para alimentar vapor saturado a una microturbina de 10 kw de potencia, tomando en cuenta que la radiación promedio en la Nezahualcoyotl estado de México es de 650 w/m2 el área mínima requerida es construido por el campo es de 16 m2, requiriendo cinco concentradores, cada concentrador cilíndrico parabólico (CCP) tiene 2 m de largo y 1,50 m de ancho, con un ángulo de apertura de 90 ° y una razón de concentración de 5, con aluminio súper pulido y una reflexión de 0,8 el cual se utilizó como material reflectante. El cual proporcionará el vapor de agua como fluido de trabajo.

De acuerdo a los resultados de las pruebas aplicadas al CCP modelo, se espera que la eficiencia global de cada concentrador del nuevo campo de colectores solares sea del 70%, y en conjunto de 5 concentradores genere la energía térmica, algo a si como 7 kW térmicos para un flujo de agua de 8 litros por minuto y generación de vapor saturado, requerida por la microturbina de vapor. Se están tomando las adecuaciones para medir la temperatura, presión y flujo del vapor generado para construir el perfil de generación de vapor del campo de concentración.

ABSTRACT

It boasts a field of cylindrical-parabolic solar collectors, for feeding steam saturated to a micro turbine of 10 kw of power, taking into account that the average radiation in the Nezahualcoyotl Mexico state is the required minimum area 650 w/M2 is built by the field is 16 m2, requiring five hubs, each cylindrical parabolic concentrator (CPC) has 2 m long and 1.50 m wide with an opening angle, 90 ° and a reason for concentration of 5 super polished aluminum and a reflection of 0.8 which was used as a reflective material. The one which will provide steam, it is a working fluid. According to them results of them tests applied to the CCP model, is expected that the efficiency global of each hub of the new field of collectors solar is of the 70%, and in set of 5 hubs generate the energy thermal, something to if as 7 kW thermal for a flow of water of 8 liters by second and generation of steam saturated required by the micro steam turbine. They are taking the adjustments to measure temperature, pressure and flow of the generated steam to build the profile of the concentration camp steam generation.

Palabras claves: concentración, solar, microturbina.

1. TRABAJO PREVIO

Al principio del proyecto se caracterizó un concentrador cilíndrico parabólico (CCP), de 2 m de largo y 1,20 m de ancho, con un ángulo de apertura de 90 ° y una razón de concentración de 7.6, con tubo de cobre como concentrador de 5 cm de diámetro, con aluminio súper pulido y una reflexión de 0,8 el cual se utilizó como material reflectante (Figura 1). Este concentrador generó el vapor de agua como fluido de trabajo para una microturbina de vapor experimental.

Además se ha diseñado y construido un sistema electrónico que tiene la capacidad de seguir de forma autónoma y sin intervención humana los movimientos del sol con la intención de aplicar este sistema a un campo de colectores solares para alimentar vapor saturado a una microturbina y generar electricidad. El sistema de seguimiento en un primer análisis consistirá de una etapa de censado de los rayos del sol procurando que la superficie de la placa fotovoltaica y los rayos se encuentren de manera perpendicular, dichos sensores son fotorresistencias.

Cuenta con una etapa de captación y comparación de las señales para posteriormente acoplarlo a una etapa de potencia que logre mover un motor eléctrico que hará girar mediante implementos mecánicos (sistema de engranaje) a la parábola para un posicionamiento deseado.

Figura 1. Concentrador parabólico cilíndrico.

Otros subsistemas son los de alimentación de energía que pueden ser externas o incluso la misma energía proporcionada por la placa almacenada a un banco de baterías.

Utilizando el seguimiento, la energía total recibida en un día puede ser del orden de un 35% mayor que para el mismo colector estático. Aunque este rendimiento se ve reducido en los casos de frecuentes nublados y en todas aquellas condiciones climatológicas en las que la relación entre la energía recibida por radiación directa y la recibida por radiación difusa tienda a disminuir, el aumento de energía así conseguido compensa sobradamente en muchos casos prácticos el consumo de energía y el coste de los propios mecanismos de seguimiento.

Se realizaron pruebas de funcionamiento acoplado a un sistema de almacenamiento de agua (termo tanque) junto con el seguidor solar y probar la eficiencia del sistema total de calentamiento de agua Ver figura 2.

Figura 2. Prototipo final acoplado en la estructura diseñada.

La norma ANSI/ASHRAE, 93-1986 se utilizó como guía para la evaluación del CCP. Así también, se utilizaron las pruebas experimentales del calentamiento de agua, para la aplicación de la Norma NMX-ES-001-NORMEX-2005.

2. DIMENSIONAMIENTO DEL CAMPO DE COLECTORES.

A partir de estos resultados se procedió al diseño de la nueva parábola para el campo de colectores, tomando en cuenta la ecuación que la radiación promedio en la Ciudad de Nezahualcoyotl estado de México es de 650 w/m2, promediados con datos de una estación meteorológica en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, para 2014.

El método experimental de acuerdo a la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 para realizar las mediciones, debe ser en estado estable o casi-estacionario, siendo los parámetros a registrar la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo y determinar el calor útil ganado *Qu*. Así también, se determina la eficiencia instantánea del colector.

$$\eta = Qu / AcGb \qquad (1)$$

Donde:

Qu es el calor util
Gb es la radiación solar
Ac es el área bruta del colector.

La Ec. (1), es para evaluar el calor útil, que depende de la temperatura de entrada y salida del fluido y del flujo másico que circula a través del colector.

$$Q_{útil} = mCp\ (Tsalida\text{-}Tentrada) \qquad (2)$$

Por lo que la eficiencia se puede calcular como:

$$\eta = mCp\ (Tsalida\text{-}Tentrada)/\ AcGb \ (3)$$

se realizaron pruebas en un colector construido y al graficar los resultados obtenemos los valores de la figura 3.

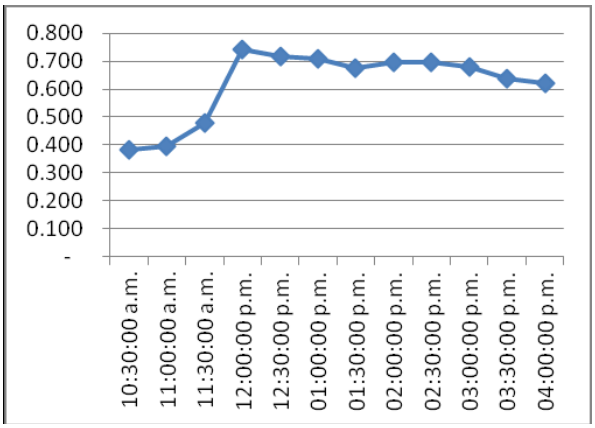


Figura 3.- Eficiencia experimental medida para un CCP. Prueba del 7 de mayo de2014.

De acuerdo a los datos generados en el concentrador modelo y utilizando la ecuación (4) y tomando en cuenta la eficiencia de la turbina para convertir el calor útil del vapor a energía eléctrica obtenido experimentalmente, el cálculo del área requerida será expresado con la siguiente ecuación (4):

$$A_r = Q_{útil} / (\eta_{global} * Gb * t_{urbina}) \qquad (4)$$

Por lo tanto para poder generar 5 kW de energía, una eficiencia global del colector esperada del 70% y una eficiencia estimada de la turbina de 80%, se requerirán un área mínima de 14 m^2.

Tomando como base el modelo estudiado se decidió que cada concentrador cilíndrico parabólico (CCP) tendrá 2 m de largo y 1,50 m de ancho y un tubo concentrador de cobre para gas de 5 cm de diámetro y 2m de largo, con un ángulo de apertura de 90°, dando una razón de concentración de 9.5, con aluminio súper pulido y una reflexión de 0,8, por lo que se requerirán cinco concentradores.

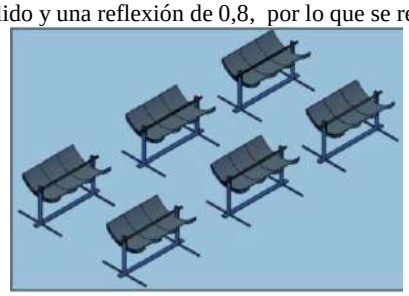


Figura 4. Campo de colectores simulado en Solid Works.

Construcción del perfil de la parábola

Se utilizó un software para obtener las coordenadas de la parábola en función del diámetro y profundidad utilizando la ecuación de la parábola anterior, la cual es:

$$(¼)FX^2 \qquad (5)$$

Concluyendo que al utilizarse una placa de aluminio de 0.91m de ancho por 3.05m y un espesor de 0.98mm, debíamos obtener 4 bastidores para el soporte de cada colector por placa, se ajustaron las dimensiones de la parábola de acuerdo a los siguientes datos:

- Diámetro: 150 cm
- Profundidad: 40 cm

Obteniéndose una distancia focal: 35.15 cm, para no desperdiciar material y obtener un área de 3m^2 por parábola.

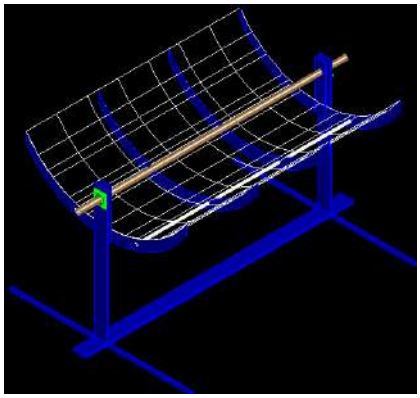


Figura 5. Modelo de parábola en Solid Works.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de las pruebas aplicadas al CCP modelo, se espera que la eficiencia global de cada concentrador del nuevo campo de colectores solares sea del 70%, y en conjunto de 5 concentradores genere la energía térmica, algo a si como 7 kW térmicos para un flujo de agua de 8 litros por minuto y generación de vapor saturado, requerida por la microturbina de vapor.

Se ha logrado hasta el momento el corte de 16 soportes para cuatro concentradores y está en proceso su armado para su evaluación, para de esta forma empezar con las pruebas del sistema de soporte y seguimiento solar, para de ahí hacer pruebas de calentamiento del agua y eficiencia térmica, y diseñar el sistema de acoplamiento con la nueva microturbina de vapor saturado de 5 kW de potencia eléctrica, claro esta que habra´que esperar los resultados experimentales para confirmar la teoría.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de:

- Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al área del PAPIIT
- Técnico Rosendo Méndez Gallo
- Diseñador Industrial Felipe Cornejo Cárdenas

REFERENCIAS

Birnbaum J., Feldhoff J., Fitchner M., Hirsch T., Jöcker M., Pitz-Paal R., and Zimmermann G., “Steam temperature stability stability in a direct steam generation solar power plant”, Solar Energy Vol 85, 2011, 660 - 668.

Duffie A. J., Beckman A. W., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc., Wisconsin, 2006.

Eck M., Zarza E., “Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs”, Solar Energy, Vol. 80, 2006, 1424 - 1433.

Enciso Contreras E., Desarrollo de un software para el diseño de concentradores solares de canal parabólico, tesis de maestría, SEPI - ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2012.

García-Valladares O., Velázquez N., “Numerical simulation of parabolic trough solar collector: Improvement using counter flow concentric circular heat exchangers”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, 2008, 597 - 609.

Hottel H. C., “A simple Model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres”, Solar Energy, Vol. 18, 1976, 129 - 134.

Incropera F. P., DeWitt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, John Wiley and Sons, New York, 2007.

Kalogirou S., Solar Engineering Processes and Systems, 1st. edition, Elsevier Inc., New York, 2009.

Kalogirou S., Lloyd S., Ward J., “Modelling, optimization and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system”, Solar Energy, Vol. 60, 1997, 49 - 59

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

Diseño y optimización técnico económica para sistemas de calor solar para procesos industriales mediante simulación dinámica en TRNSYS

Mario Nájera-Trejo, Ignacio R. Martín-Domínguez, Jorge A. Escobedo-Bretado
Unidad Durango, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Victoria 147, Durango, 34000, México,
6188110774, **mario.najera@cimav.edu.mx.**

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología para estimar la rentabilidad económica de sistemas térmicos solares, mediante modelado, simulación dinámica y adicionalmente análisis paramétrico como herramienta esencial para el estudio de diferentes diseños del sistema. Por otra parte el análisis económico que considera los costos de inversión requeridos para la implementación del sistema y el valor presente de los costos de operación/mantenimiento. Se presentan dos casos de estudio para su análisis económico.

ABSTRACT

This paper presents a methodology to estimate the economic profitability of solar thermal systems by means of modeling, dynamic simulation and additionally parametric analysis as an essential tool to study different system designs. In addition, the economic analysis that considers the capital costs required by the system implementation, the present worth of operating and the maintenance costs. Two cases are presented for economic analysis.

Palabras claves: Simulación, TRNSYS, Solar, Optimización.

INTRODUCCION

Actualmente el desarrollo tecnológico para la conversión térmica de energía solar y su uso subsecuente en procesos industriales se encuentra en sus etapas iniciales de desarrollo y se considera con un enorme potencial de aplicación en un gran rango de sectores industriales. De acuerdo con el balance nacional de energía, la industria utiliza más del 30% del total de la energía del país. Por otra parte, estudios realizados por la agencia de energía considera que cerca del 60% del consumo de energía a nivel industrial ocurre en procesos térmicos a temperaturas por debajo de los 250°C.

Existen grupos en México trabajando en esta temática, sin embargo la complejidad de SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) involucra diversas etapas de desarrollo que demandan una sinergia de especialistas. Entre algunas de estas etapas se encuentran la caracterización del proceso, auditoria y optimización energética, integración conceptual de SHIP, modelado y simulación, optimización técnica y económica, factibilidad, ingeniería de detalle, construcción y puesta en marcha, evaluación de desempeño, impactos ambientales y dictamen técnico.

En este estudio se da a conocer una metodología para la etapa de modelado, simulación y optimización técnico económica de sistemas térmicos solares aplicados en procesos industriales. Sin embargo la variabilidad climatológica y la complejidad de los diversos procesos industriales hacen imprescindible el contar con el conocimiento y las herramientas de cómputo versátiles para el desarrollo de esta etapa. Por otra parte en el tema de optimización de sistemas de captación solar y almacenamiento térmico es obligatorio involucrar los factores económicos. Con ello es posible obtener la configuración del proyecto SHIP más costeable, considerando la inversión inicial del equipo de captación solar con almacenamiento térmico, costos de mantenimiento y además del costo del combustible que será remplazado en el periodo de vida de esta instalación.

NOMENCLATURA

SPWF	Valor presente de una serie de gastos (Series Present Worth Factor)
GPWF	Valor presente de un gradiente (Gradient Present Worth Factor)
i	Tasa de interés anual (interest)
n	Periodo de análisis (Number of periods)
G	Gradiente (Gradient)
R	Importe anual (Uniform Amount)
Aux	Cantidad de energía Auxiliar (Auxiliary Energy)
eff	Eficiencia del calentador (Efficiency)
EC	Costo de la energía (Energy Charge)
PCA	Power Cost Adjustment (Interés anualizado del LPG)
PW	Present Worth (Valor presente)

ANTECEDENTES

El uso de la tecnología solar se ha ido incrementando a un paso acelerado en las últimas décadas. Sin embargo existen metodologías para el diseño de sistemas térmicos solares que aún carecen de confiabilidad. Esto constituye una amenaza para esta industria tecnológica aun en desarrollo, ya que a raíz de malos resultados en su implementación se puede generar desconfianza y difamación, inhibiendo el crecimiento de esta noble industria. Para el correcto desarrollo de proyectos a gran escala, es absolutamente necesaria una planeación que considere una serie de pasos tales como la caracterización de los procesos, auditoria y optimización energética, integración conceptual, modelado y simulación, optimización técnica económica, análisis de factibilidad, ingeniería de detalle, construcción, evaluación de desempeño, impacto ambiental y reporte técnico. Cada uno de estos pasos demanda una gran cantidad de conocimientos y esfuerzo.

Actualmente, la mayoría de los procesos industriales que requieren calor utilizan un sistema de calentamiento basado en algún tipo de combustible fósil para proveer la demanda de energía, por lo que un sistema térmico solar es usualmente acoplado a un proceso térmico industrial ya existente.

Los sistemas de calor solar para procesos industriales necesitan ser modelados y simulados de manera dinámica computarizada con el fin de determinar el comportamiento a lo largo de periodos de tiempo extendidos, usualmente un año y por lo tanto se debe analizar su desempeño. Esto se requiere debido a la continua variabilidad en el suministro de energía del sol, acoplado a un almacenamiento de energía y sobre todo la demanda impuesta por dicho proceso industrial.

METODOLOGIA

Simulación

TRNSYS es un paquete de cómputo utilizado en la simulación dinámica de sistemas principalmente térmicos y que tiene como finalidad la obtención de datos que ayuden a optimizar la eficiencia tanto térmica como económica de diferentes sistemas.

La implementación de un sistema térmico solar para un proceso industrial requiere de una planeación minuciosa, sin embargo este artículo se enfoca en la parte de simulación y optimización. Una vez aplicada la optimización energética y haber determinado los puntos de integración del sistema termo solar, se realiza la simulación del sistema a lo largo de un año típico. El sistema puede estar representado por una configuración simplificada del arreglo de colectores solares con almacenamiento térmico y un sistema de calentamiento auxiliar como se muestra en la Fig. 1.

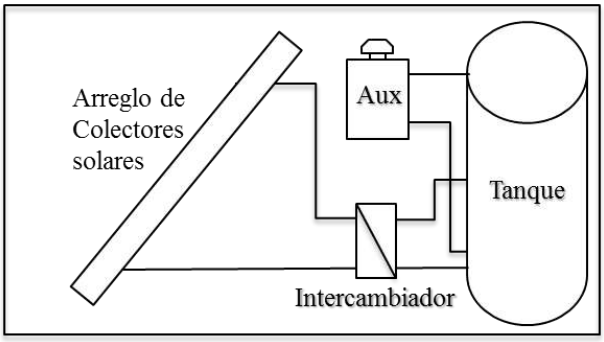


Fig. 1 Diagrama de la configuración simplificada del sistema termo solar

Los parámetros para determinar el desempeño energético del sistema que pueden ser calculados a partir de la simulación y que además son parámetros clave para la optimización son: la ganancia solar del sistema, energía solar incidente, ahorro de energía del sistema convencional o sistema auxiliar de energía.

Análisis Paramétrico

Una vez definidos estos parámetros como resultados de la simulación, es imprescindible realizar una variación paramétrica del sistema con el fin de tener la capacidad de comparar los resultados primeramente desde el punto de vista térmico/energético y después utilizar los resultados de esta variación para optimizar el funcionamiento del sistema desde el punto de vista económico. Optimizar el sistema basado solo en el análisis energético, lo óptimo sería instalar el mayor número de colectores posibles, así como la mayor cantidad de almacenamiento térmico, sin embargo en la práctica esto no resulta ser lo más efectivo, ya que el análisis económico representa una parte primordial en el dimensionamiento y optimización de cualquier sistema térmico. Algunos de los parámetros a variar pueden ser: el área de captación solar, relación volumen de almacenamiento/área de captación, inclinación de los colectores y en algunos casos dependiendo del proceso es posible variar la temperatura de operación y el flujo másico del fluido de térmico. Cabe mencionar que cada combinación paramétrica es una simulación diferente, por lo que se deberá tomar en cuenta el tiempo de cómputo requerido para llevar a cabo este tipo de análisis.

Análisis Económico

Es posible diseñar muchos diferentes sistemas que cumplan con el servicio esperado. Sin embargo el costo de inversión, mantenimiento y operación de cada diferente diseño será sin duda diferente uno de otro. El costo de inversión considera la compra e instalación de equipo necesario. Una parte muy significativa se debe al uso de almacenamiento térmico, el cual es un parte esencial en la mayoría de los proyectos termo-solares. Sin embargo, este costo por lo general varía de forma no lineal dependiendo de la capacidad del tanque.

Dado que por lo general no es posible sustituir completamente el consumo de combustibles fósiles por energía solar, el costo de operación depende de la cantidad de combustible aún utilizado a lo largo de un año típico de operación. Dicho costo energético se puede considerar que ocurre al final de cada año, a lo largo de la vida útil del sistema, siendo afectado en años subsecuentes por el incremento del costo de combustibles. Con ello se tienen flujos de efectivo al final de cada año, que se van incrementando geométricamente a lo largo de la vida útil del sistema. Para poder estimar la rentabilidad económica de un diseño propuesto, se requiere obtener el Valor Presente (PW) de la serie de flujos anuales de efectivo incurridos, para poder sumarlo con el Costo de Inversión que ocurre al inicio del proyecto. Con ello se obtiene el costo, a valor presente, incurrido por la planta industrial como consecuencia de implementar y operar un determinado sistema termo-solar. El costo de cada diferente diseño de sistema analizado será diferente, y el marco de referencia lo constituye el valor presente de la operación del sistema que no implementa tecnologías solares y opera quemando combustibles fósiles durante el mismo periodo de tiempo antes considerado.

La descripción matemática de lo anterior está dada por la cantidad a valor presente (*1*) como resultado de la multiplicación del gasto uniforme (*4*) por la serie de factores a valor presente (*2*) más el valor del gradiente (*5*) multiplicada por el valor presente del gradiente (*3*). La cantidad anual (*R*) es el costo anualizado típico de la energía y está calculado en base a la energía auxiliar (*Aux)* que se obtiene paramétricamente por las simulaciones considerando la eficiencia del equipo utilizado como respaldo (*eff*). El gradiente (*G*) es el resultado de multiplicar la cantidad anual (*R*) por el incremento anual en el costo de la energía (PCA).

$$PW = R * SPWF + G * GPWF \qquad (1)$$

$$SPWF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \qquad (2)$$

$$GPWF = \frac{1}{i}\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n}\right] \qquad (3)$$

$$R = \frac{Aux}{eff * EC} \qquad (4)$$

$$G = R * PCA \qquad (5)$$

Una vez que el costo de operación es obtenido, se suma a la inversión inicial con el fin de obtener el costo total del proyecto. Los numerosos resultados de las corridas paramétricas se acomodan en una tabla dinámica para calcular el costo total del proyecto de cada resultado. Basados en los resultados se obtiene una gráfica en la que se observa el punto de inflexión para el mínimo costo del proyecto.

RESULTADOS

En esta sección se presentan dos casos de estudio con ciertas variantes. El primer caso de estudio consta de un sistema de calefacción de un Invernadero agrícola de 1.6 hectáreas asistido con energía solar, utilizando concentradores cilíndrico-parabólicos (Absolicon T160). Se incluyó en el análisis económico el costo de operación para hacer una proyección financiera del proyecto, comparando el costo de la climatización del invernadero con calefacción a Gas L.P. contra el costo al incluir concentradores solares, considerando la vida útil promedio de un concentrador solar como 20 años. Los ejemplos no incluyen costos de instalación, los cuales en la práctica son de gran impacto, sin embargo a menudo son calculados como una fracción de la inversión del proyecto que varía dependiendo del proveedor. Las simulaciones desarrolladas en estos proyectos pueden ser reutilizadas para el análisis de aplicaciones similares, realizando las modificaciones correspondientes. Los componentes utilizados en la simulación se muestran en la Fig. 2

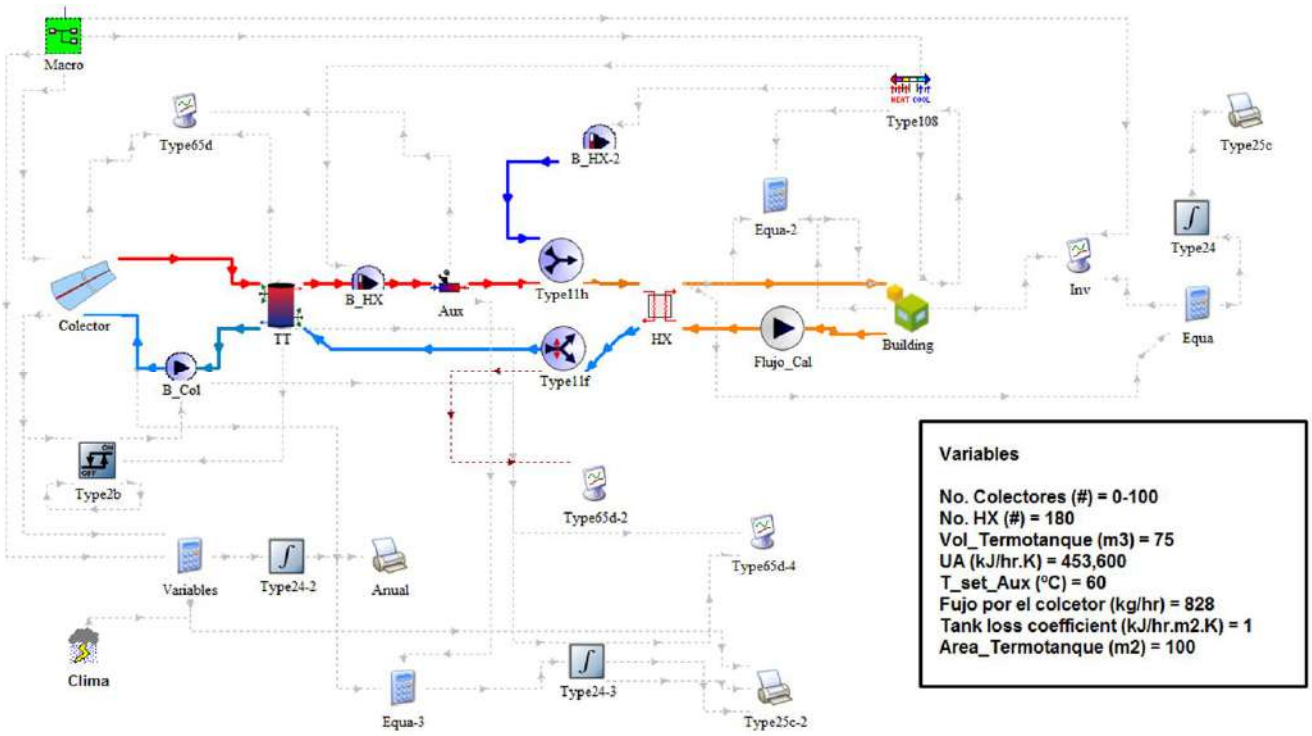


Fig. 2 Simulación en TRNSYS del sistema de calentamiento mediante concentradores solares de canal parabólico incorporando un tanque de almacenamiento térmico y calentador auxiliar.

En este proyecto, el costo de operación se ve principalmente afectado por la energía utilizada en la caldera auxiliar. De esta forma, una vez que el costo de operación es obtenido, se suma a la inversión inicial con el fin de obtener el costo total del proyecto. Los numerosos resultados de las corridas paramétricas se acomodan en una tabla dinámica para calcular el costo total del proyecto de cada resultado. Basados en los resultados se obtiene una gráfica en la que se puede observar claramente el punto de inflexión para el mínimo costo del proyecto. Analizando la Fig. 3, se observa que al incrementar el número de colectores se pueden percibir mayores ahorros, hasta un punto en donde el aumento en el número de colectores incrementa el costo de inversión por encima del ahorros determinado a ese periodo de análisis. En otras palabras, el proyecto más costeable según el análisis de económico de ciclo de vida, con una proyección financiera a veinte años se logra con un sistema de 20 concentradores solares.

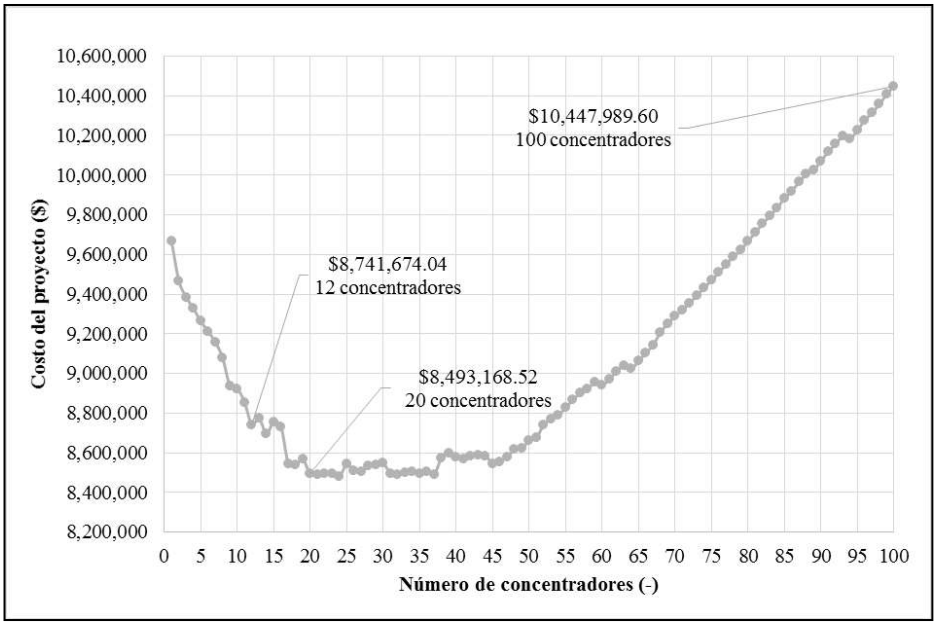


Fig. 3. Comportamiento económico del proyecto de climatización solar de un invernadero agrícola

Por otro lado es posible realizar un análisis del periodo de retorno de inversión contra el dimensionamiento del equipo solar. Este es considerado como el tiempo en que la inversión inicial se iguala con el ahorro neto en el costo de la energía a valor presente. Graficado, resulta en una curva con un puto de inflexión que determina el dimensionamiento del sistema para el tiempo más corto de retorno de inversión. La curva del periodo de retorno de inversión en la Fig. 4 indica que para un diseño del sistema térmico solar de 12 concentradores se tiene el menor tiempo para el retorno de inversión.

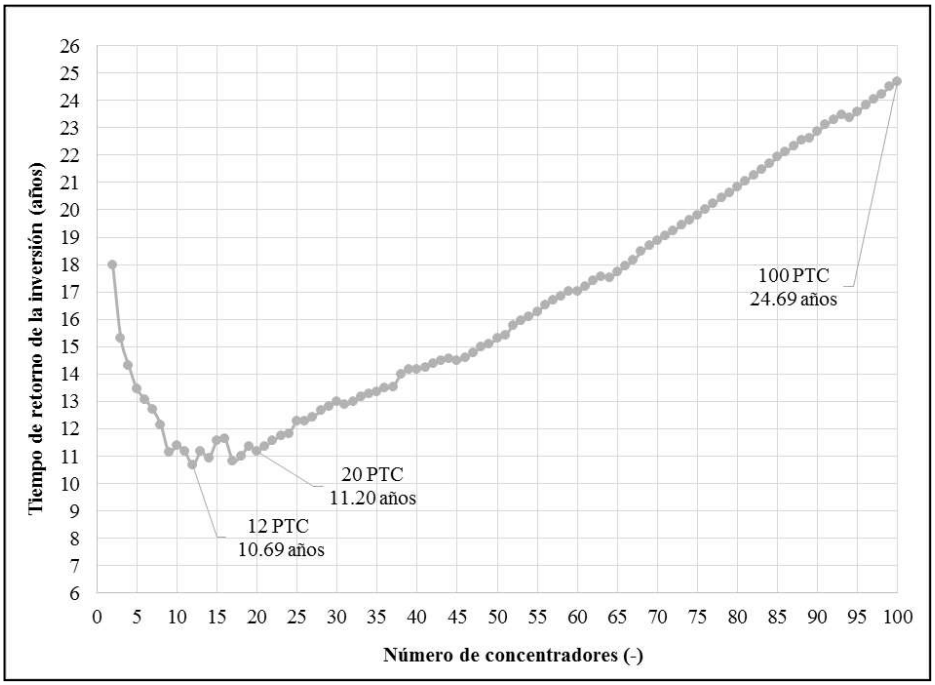


Fig. 4 Periodo de retorno de inversión del proyecto de climatización solar de un invernadero agrícola

Otro ejemplo de esta optimización se presenta cuando es necesario calcular el óptimo volumen de almacenamiento y área de colectores solares a la vez. En este caso se calculó el óptimo número de colectores solares de placa plana y la relación optima de almacenamiento para un sistema Combi (calefacción y agua caliente doméstica). El cálculo del periodo de retorno de inversión para la configuración del sistema de menor costo (señalado en la Fig. 6) es muy cercano a los 9 años.

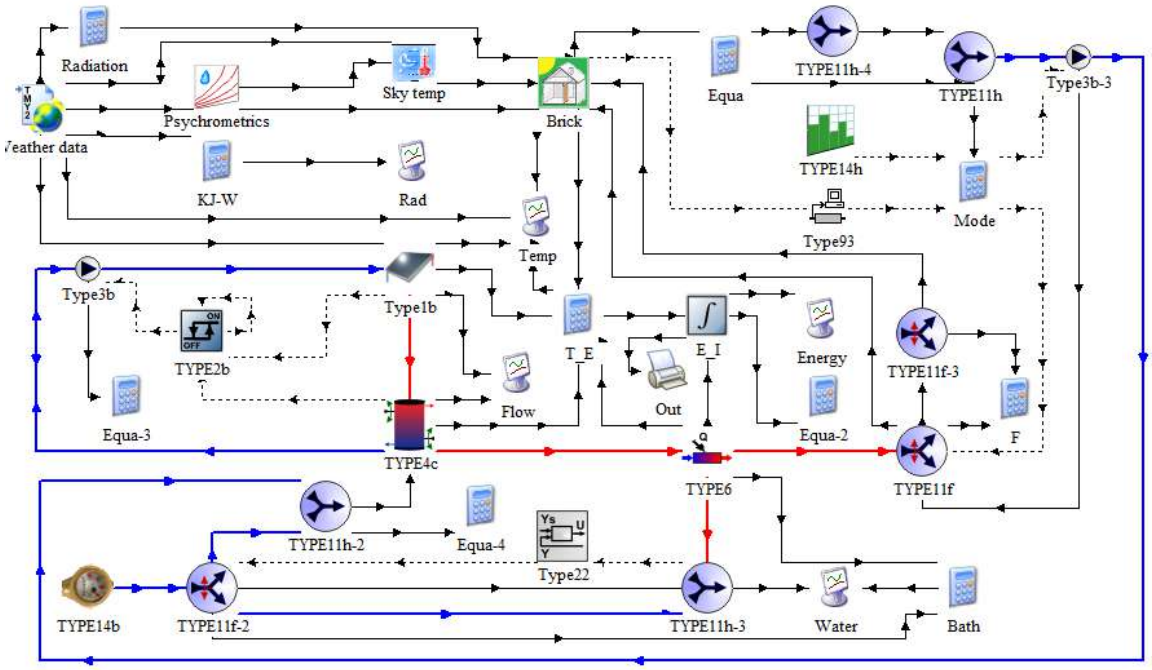


Fig. 5 Simulación en TRNSYS del sistema térmico solar combinado, caso de estudio con colectores de placa plana

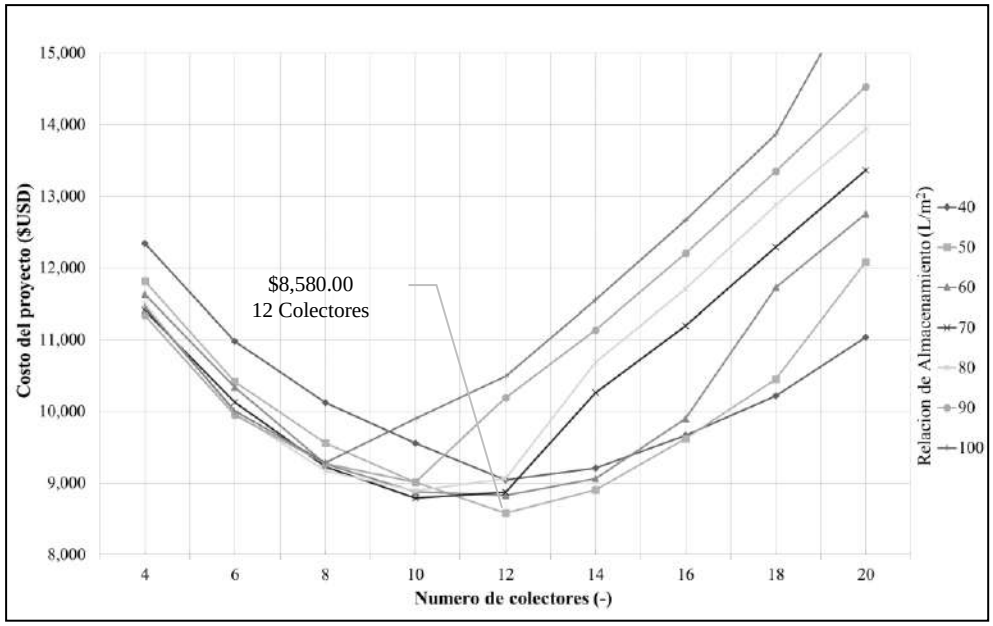


Fig. 6 Comportamiento económico de un sistema Combi

CONCLUSIONES

El análisis de un sistema de calentamiento por medio de energía solar relaciona una gran cantidad de parámetros que definen su comportamiento. La naturaleza variable de algunos de esos parámetros, como la radiación disponible o la temperatura ambiente, hace necesario el uso de simulaciones computacionales para su estudio.

Mediante la metodología presentada en este artículo fue posible minimizar el consumo de GasLP en distintos proyectos, determinando la óptima inversión desde el punto de vista económico con un análisis de ciclo de vida. A menudo el análisis de periodo de retorno de inversión es más usado por inversionistas que buscan inversiones de bajo riesgo y menor tiempo de recuperación, sin embargo existen inversionistas que buscan maximizar sus ganancias, por lo que optimizan en base al tiempo de vida de los equipos.

REFERENCIAS

INE, & SEMARNAT. (2009). Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones únicas sobre el cambio climático. p. 70–82

Leckner, M., & Zmeureanu, R. (2011). Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem. Applied Energy, 88(1), 232–241.

Wallin, J., Bastien, D., & Claesson, J. (2012). The Influence of Energy Conservation on the Performance of Solar Thermal Systems – A Cold Country Case Study. Energy Procedia, 30, 1069–1078.

Ampatzi, E., & Knight, ukIan. (2012). Modelling the effect of realistic domestic energy demand profiles and internal gains on the predicted performance of solar thermal systems.

STOECKER, W. F. Design of thermal systems. 3rd ed. McGraw-Hill; 1989.

Martín-Domínguez, I. R., Burciaga-santos, J. A., & Castro-, P. E. (2011). TRNSYS simulation and optimization of a solar- thermal collection and storage system for the heating of agricultural greenhouses. p. 1–20

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:
Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol),
A través del Proyecto:
P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”
Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del:
FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.
Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR SOLAR DE ALIMENTOS

Paola Israde Burrola[1], **Francisco de Jesús Zavaleta Velázquez**[1]

[1]Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. C.U. Toluca, Estado de México, México. C.P.50110. Teléfono: +52 (722) 2154512. **paoisrade@hotmail.com**.

RESUMEN

En la actualidad se conocen diversas técnicas para el procesamiento de alimentos utilizando energías alternativas. Una de ellas es el uso de la abundante energía solar que sustituye la dependencia de los combustibles fósiles o biocombustibles para dicha aplicación, lo que contribuye a mitigar el daño medioambiental. El procesamiento solar de alimentos nos brinda el beneficio de obtener una mayor calidad del producto comparado con los métodos tradicionales y aunado a ello, se crean oportunidades sustentables de trabajo para la economía local. Uno de los inconvenientes al que muchas regiones que cuentan con un alto índice de radiación solar se enfrentan, es la incapacidad de procesar el excedente de cosechas debido a la falta de soluciones tecnológicas descentralizadas que incluyan el uso eficiente de los recursos energéticos. Por esta razón, se propone un proyecto de deshidratación solar de alimentos para que se puedan utilizar en su forma deshidratada, de lo que se puede sacar provecho debido al incremento del costo del producto y a su fácil obtención. Se ha construido un deshidratador solar directo que ha servido de base para proponer alternativas de diseño en base a los resultados recabados en distintos lotes medidos. Se realizaron pruebas de secado para frutas y verduras, y se obtuvo que para el deshidratado de manzana es posible eliminar el 85% de la humedad contenida en la fruta, en sólo dos días de exposición a la radiación solar de la ciudad de Toluca.

Palabras clave: *frutas, secado, energía solar*.

ABSTRACT

Currently various techniques are known for processing food using alternative energy. One of these is the use of abundant solar energy to replace the dependence on fossil fuels or biofuels for that application, helping to mitigate environmental damage. Solar food processing gives us the benefit of getting a higher quality product compared to traditional methods and coupled with this, sustainable job opportunities are created for the local economy. One of the drawbacks that many regions with a high rate of solar radiation face is the inability to process surplus crops due to lack of decentralized technological solutions that include the efficient use of energy resources. For this reason, a project of a solar food dehydrator is proposed so that fruits can be used in their dehydrated form, what can be advantageous due to the increased product cost and easiness to obtain. A direct solar dryer was built and it has served as the basis to propose alternative design based on measured results collected in different batches. Drying tests were conducted for fruits and vegetables, and it was found that for dehydrated apple is possible to eliminate 85% of the moisture contained in the fruit, in just two days of exposure to solar radiation in the city of Toluca.

Keywords: *fruits, drying, solar energy.*

INTRODUCCION

Asegurar la sustentabilidad del medio ambiente a través de esfuerzos encaminados para encontrar la solución a la problemática energética del país es uno de los retos actuales que se enfrentan en la actualidad, y en ocasiones el principal obstáculo que se tiene es la falta de recursos y de inversión en nuevas tecnologías. Por ejemplo, la producción de energía eléctrica ha tenido un crecimiento en cuanto a infraestructura y calidad debido a los programas de investigación y desarrollo que se han llevado a cabo. No obstante, dichos esfuerzos requieren de una fuerte inversión que se ve reflejada en los altos costos de servicio para los usuarios. Es por ello que se busca adecuar nuevas tecnologías que permitan buscar alternativas para el sector energético.

Específicamente hablando del sector alimenticio, se buscan nuevos métodos de preservación de alimentos usando el menor gasto energético posible, aprovechando los recursos que se tienen en el lugar de producción. Una solución que se propone es el método de deshidratación de alimentos, que consiste en remover el contenido de agua de los alimentos, lo que resulta ser ideal para la conservación de alimentos para su uso posterior.

PROBLEMÁTICA

En la actualidad, el desarrollo económico y social de México está basado directamente en sus recursos energéticos, y en especial en los combustibles fósiles como son la gasolina, diésel, gas natural, etc. No obstante, es necesario buscar nuevas fuentes energéticas que sean implementadas tomando en cuenta los sectores económico, ecológico y social. Se sabe que México es una potencia en cuanto al tipo de energías alternativas con las que cuenta, y su implementación en sectores como la agricultura resulta ser prometedor.

Nuestro país es un importante productor agricultor, pues se cosechan distintas frutas y verduras, que en muchas ocasiones no pueden ser consumidas y se desperdician por motivos de comercialización. Es por ello que una actividad usual entre los agricultores es la deshidratación de alimentos, actividad que puede ayudar a evitar el desperdicio de alimentos; sin embargo, este es un proceso que requiere de una gran cantidad de energía para poder remover el líquido contenido en alimentos. Una alternativa para evitar dicho alto consumo de energía, que específicamente se trata de energía eléctrica, es a través de una aplicación de energía solar para la deshidratación. [1]

ANTECEDENTES

Deshidratación de alimentos

El secado de plantas, granos y carnes ha sido una práctica habitual para la conservación de alimentos, ya que asegura su disponibilidad en distintas épocas del año. El principal objetivo del secado es reducir el contenido de humedad en un producto, y la calidad del secado dependerá de la temperatura, el tiempo de secado y la actividad de agua (para que los microorganismos no proliferen y se detengan las reacciones químicas y enzimáticas de alteración) [2]. Algunas de las razones por las cuales es importante el secado de los alimentos se debe a 1) conservar los alimentos durante largos periodos de tiempo, mayormente en épocas de escasez o fuera de temporada, 2) asegurar la calidad de la alimentación, 3) se conservan las propiedades de los alimentos a secar. [2]

Según Vidal (2013), existe una diferencia entre los términos secado y deshidratación de alimentos, aunque ambos se refieren a la eliminación de agua, el siendo el primero designado para el secado por medios artificiales (como su exposición a una corriente de aire caliente) y el segundo se refiere a la desecación natural (como cuando se expone a la acción del sol) como se muestra en la figura 1. Al hablar de deshidratación implica tener un control sobre las condiciones climáticas dentro de un volumen de control. [1]

Figura 1. Esquema del a) secado y b) deshidratado de alimentos

MARCO TEÓRICO

Métodos de secado de alimentos

1. El secado al aire libre es uno de los métodos que se usan tradicionalmente sin la necesidad de tener algún equipo especial, pues solo basta con extender los alimentos sobre alguna superficie, o colgarlos en un hilo y dejarlos expuestas al aire libre bajo el sol o en la sombra, dependiendo del calor ambiental. [2] Este método, aunque es sencillo, presenta ciertos inconvenientes como son un lento secado de los alimentos gracias a la humedad en el ambiente, lo que puede causar que los alimentos se lleguen a pudrir o enmohecer; ya que los productos están expuestos al polvo, a insectos y otros animales, es posible que los alimentos se contaminen y puedan causar enfermedades a los usuarios y también, la exposición directa de los alimentos a los rayos del sol puede causar un deterioro a la calidad del producto, tales como la decoloración de los alimentos, pérdida de las vitaminas, etc. [2]
2. Usando un secador de alimentos eléctrico, se puede eliminar la humedad gracias a su sistema de calentamiento y ventilación forzada, la cual atraviesa a los alimentos que se disponen en rejillas y que permiten pasar la circulación del aire, eliminando así la humedad contenida [3]

Proceso de secado

Este proceso tiene como objetivo la eliminación de sustancias volátiles, lo que da como resultado un producto sólido y seco. Se llevan a cabo dos procesos durante el secado, siendo 1) la transferencia de energía en forma de calor desde los alrededores para la eliminación de la humedad de la superficie y 2) la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido. La transferencia de energía en forma de calor puede ser resultado de procesos de convección, conducción y/o radiación. Para el proceso 1) existe una dependencia de condiciones

externas como son temperatura, humedad y flujo del aire, el área expuesta de la superficie y la presión. De igual manera, existen ciertas condiciones internas como son el movimiento de humedad dentro del sólido que está en función de su naturaleza física, de la temperatura y su contenido de humedad. A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, se desarrolla un gradiente de temperatura dentro de este mientras que la evaporación de la humedad ocurrirá en la superficie, ya sea por mecanismos como difusión, flujo capilar o presión interna [1].

Existen dos mecanismos para mover la humedad:

1. Evaporación: cuando la presión atmosférica es igual a la presión del vapor de la humedad en la superficie de sólido. Esto ocurre cuando la temperatura de la humedad alcanza el punto de ebullición.
2. Vaporización: circula aire caliente sobre el producto por medio de convección, donde el aire es enfriado por el producto y la humedad se transfiere hacia el aire. Aquí la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la atmosférica.

Cinética del secado

Cuando un sólido húmedo se seca en un lecho fluidizado que contiene un porcentaje de humedad, se puede obtener una curva respecto al tiempo, como se muestra en la figura 2a.

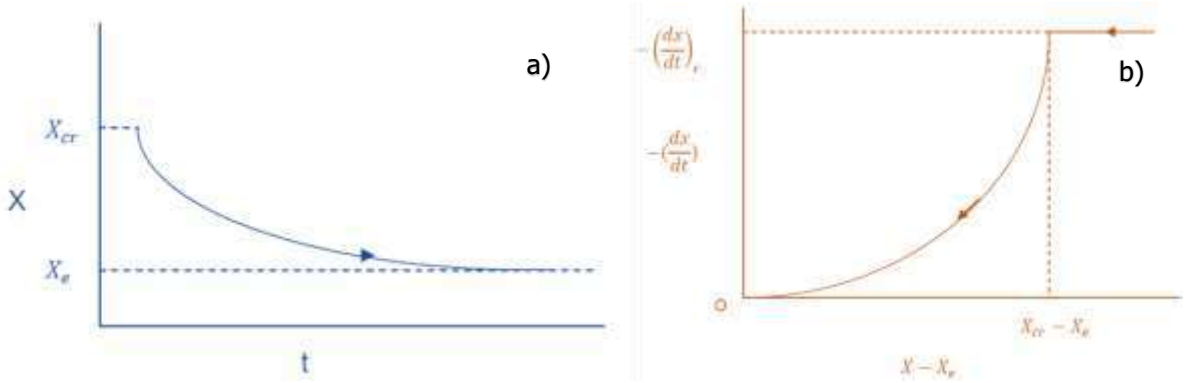


Figura 2.a) secado respecto al tiempo y b) velocidad respecto al tiempo. [1]

La velocidad de secado -dX/dt se obtiene al derivar cualquier punto de la curva X vs t, como se muestra la figura 2b. Se puede considerar un periodo de velocidad constante a la remoción de humedad de la superficie de las partículas, y a un periodo de velocidad decreciente cuando se elimina la humedad interna. [1]

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los secadores solares se componen de las siguientes partes principalmente: 1) espacio destinado para el secado, 2) colector (para transforma la radiación solar en calor), 3) fuente energía auxiliar opcional, 4) equipo de transferencia de calor, 5) medios para mantener el aire de secado en el fluido, 6) conductos, tuberías y aparatos auxiliares.

Para el desarrollo de este secador, se decidió primero realizar su construcción y en base a ello obtener datos para el secado que en él se puede llevar a cabo. Se utilizó madera de roble de 2 cm de espesor (figura 3c). Las medidas de la base del secador son de 1.20 x 0.80 x 0. 35m como se muestra en la figura 3ª y 3b. En la figura 3d se muestran las aberturas que permiten el ingreso en la salida del flujo de aire de 0.6 x 0.1m.

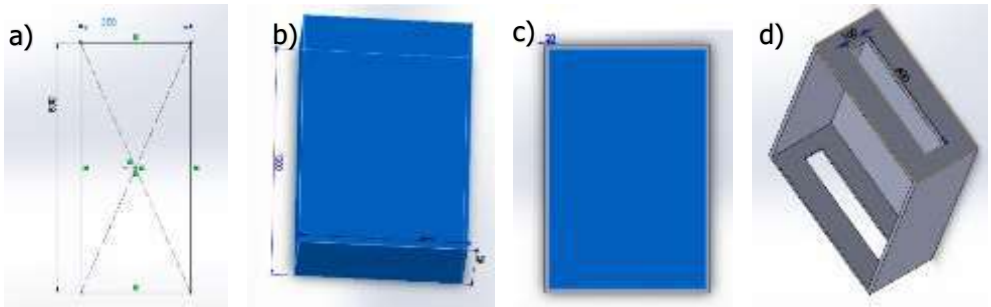


Figura 3. Construcción en Solid Works del secador solar. a) vista lateral del croquis, b) extrusión del croquis, c) grosor del secador, d) orificios de circulación del aire.

De igual manera se colocó una tapa que contendrá el vidrio por donde se recibirá la radiación solar. En la figura 4 se muestra el contorno de la caja (a) y la extrusión y el corte intermedio para el vidrio (b). En el programa de Solid Works es posible modelar sólidos y agregar los materiales que sepan utilizar, y como el nuestro fue pino, es posible seleccionarlo en el programa, como se muestra la figura 4c, y de igual manera aparece el vidrio utilizado [4].

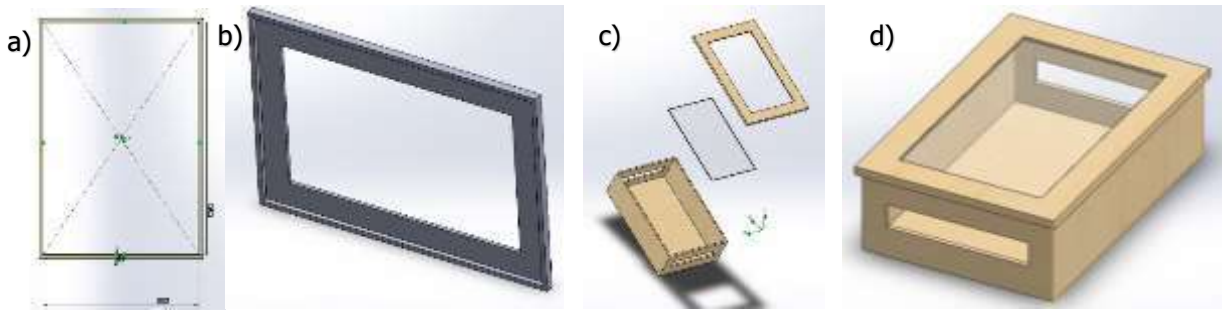


Figura 4. Construcción en Solid Works del secador solar. a) vista lateral del croquis, b) extrusión del croquis, c) vista explosionada del secador, d) secador con la tapa y los orificios de circulación del aire.

Para poder llevar a cabo la integración de las piezas para el ensamble, conformado por la base, la tapa y el vidrio, se seleccionan individualmente las piezas que conformarán el ensamblaje (Figura 5a), y se insertan al ensamble. Las relaciones de armado se muestran en la figura 5b y se hacen por medio de la herramienta "*relación de posición*". [4]

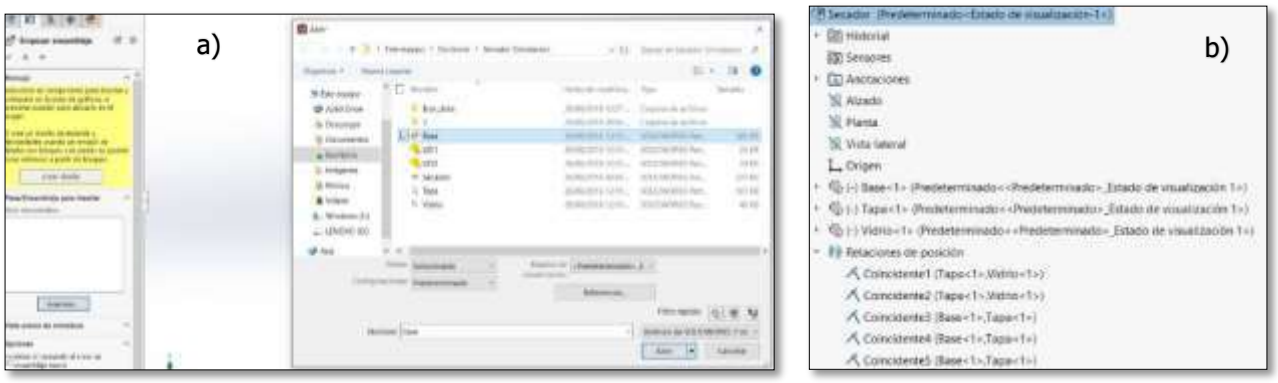


Figura 5. En la Figura se muestran las a) piezas que conforman el ensamblaje del secador solar y las b) relaciones de posición para el armado.

La caja se va a posicionar sobre un eje de referencia X-Z, donde Z corresponde al Norte y al Sur y X, al Este y Oeste. Para este caso, es necesario que se gire la caja alrededor del eje Z, para que se posicione de Norte a Sur. Para hacer esto, se utiliza la herramienta "*girar componente*" de Solid Works. Esta herramienta también ayuda a darle la inclinación deseada de acuerdo con la latitud del lugar; en este caso se posiciona a 21° correspondiente con la Ciudad de México.

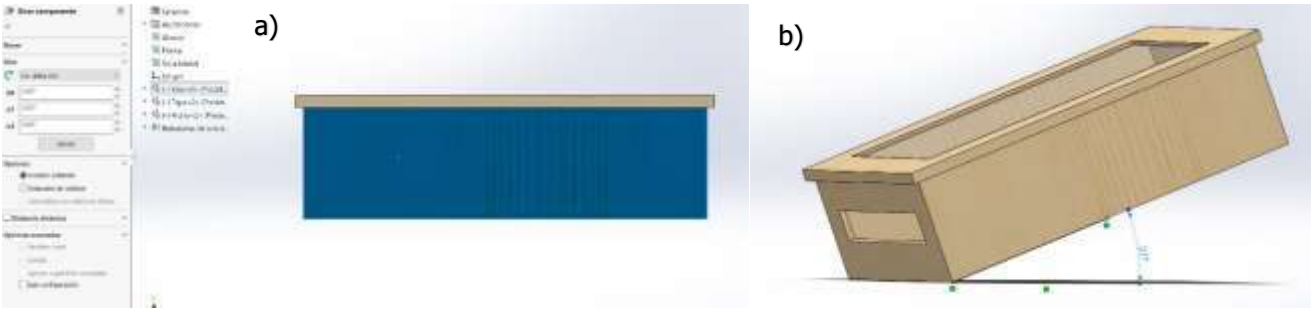


Figura 6. a) Posicionamiento del secador en el eje Z (Norte a Sur) y b) inclinación del secador a la latitud de la Ciudad de México.

Una vez que se tiene armado el sistema, se utiliza el complemento *flow simulation* de Solid Works, y para facilitar la simulación se inicia el comando *Wizard* (figura 7a). Es necesario que se seleccionan las unidades de medición y generalmente se utiliza el sistema internacional (figura 7b). Para seleccionar las características a medir, se hará un análisis externo del sistema, seleccionando primeramente la conducción del calor en sólidos con una radiación solar en la Ciudad de México, el día 31 de diciembre a las 12:00hrs, como se muestra en la figura 7c. La dirección del zenit es el punto más alto medido desde arriba del secador, que en este caso es el eje Y, y el ángulo es medido de norte a sur (sobre el eje Z) [5].

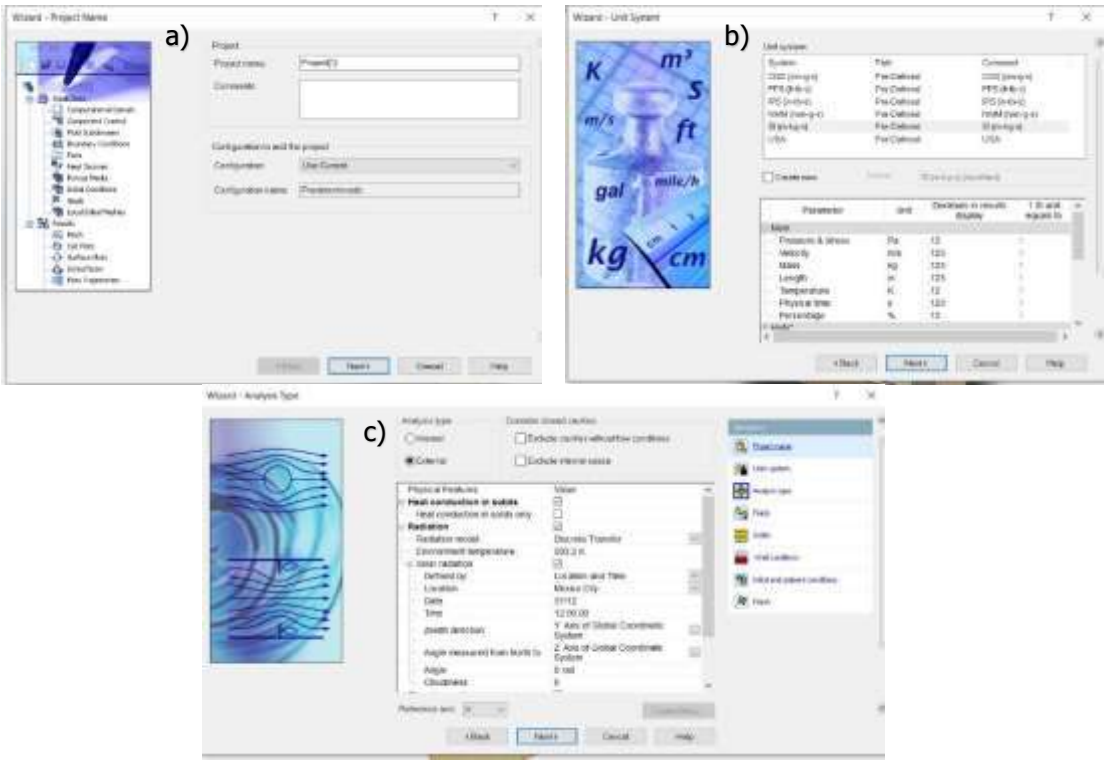


Figura 7. a) Inicio de la herramienta *Wizard*, b) selección de las unidades de medición del sistema internacional y c) datos para la radiación solar en la simulación.

Se selecciona el fluido con el que se trabajará, que en éste caso es aire (figura 8a). De igual manera se seleccionaron los materiales para la simulación. El vidrio se identifica por defecto, pero la madera se tiene que proponer, en este caso se seleccionó la madera de roble (figura 8b). Se configuran las velocidades del viento en la Ciudad de México que en promedio es de 0.3 m/s de un día. Para darle magnitud a los vectores de velocidad, se hace una descomposición de vectores en sus componentes, dependiendo del ángulo del que provenga el viento, es decir, de noreste, norte sur, etc. (figura 8c) [6].

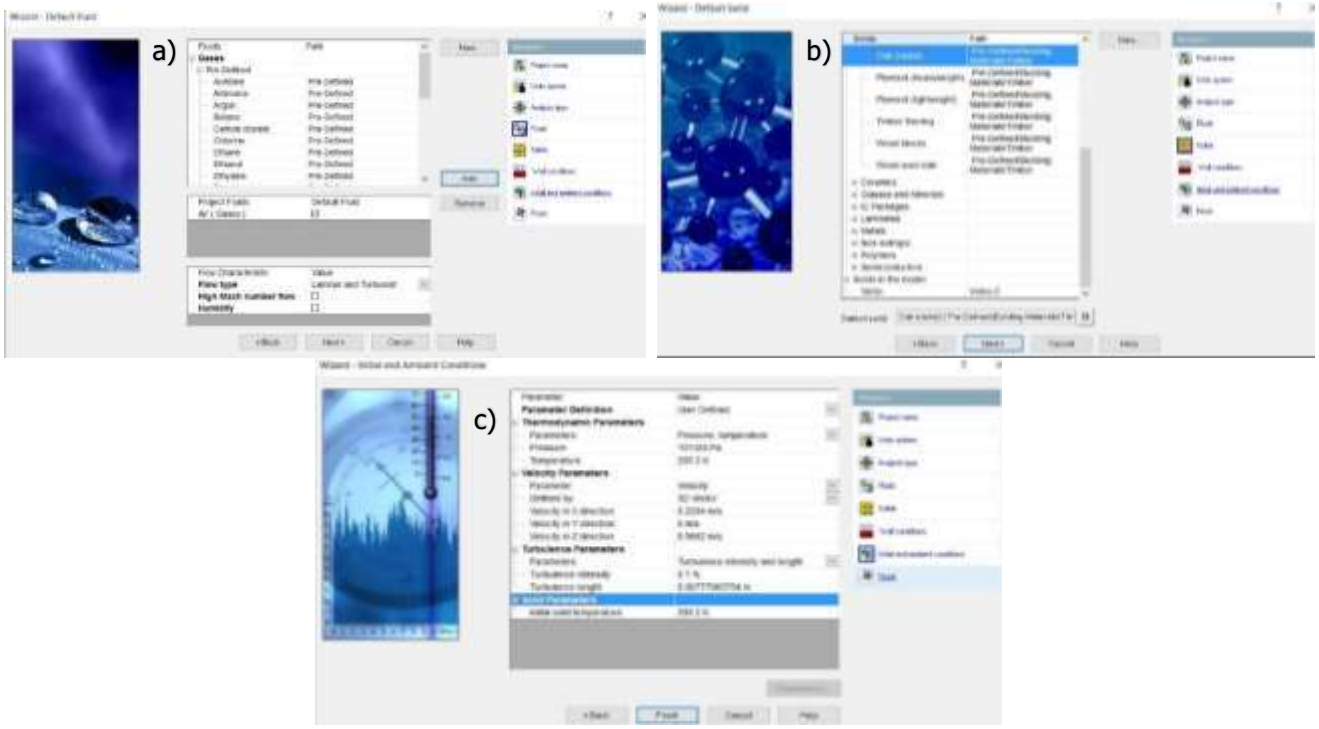


Figura 8. a) Selección del fluido de trabajo, b) selección de los materiales del secador y c) datos termodinámicos y de velocidad.

Para hacer el análisis externo del secador, se define el dominio computacional del sistema (figura 9a), que tiene que ser lo más reducido posible, pero que albergue al sistema (figura 9b). Posteriormente para poder hacer correr el programa, es necesario ajustar las configuraciones de la computadora que se utilizara. Para ello, se usó una laptop LENOVO Y700 con un procesador Core i7 y una tarjeta gráfica de Nvidia, y se utilizaron los 8 procesadores de la computadora. Después es posible correr la simulación una vez ajustados los parámetros. El proceso de la simulación toma aproximadamente de 10 a 15 min, pues se seleccionó una simulación de 10 minutos para el sistema.

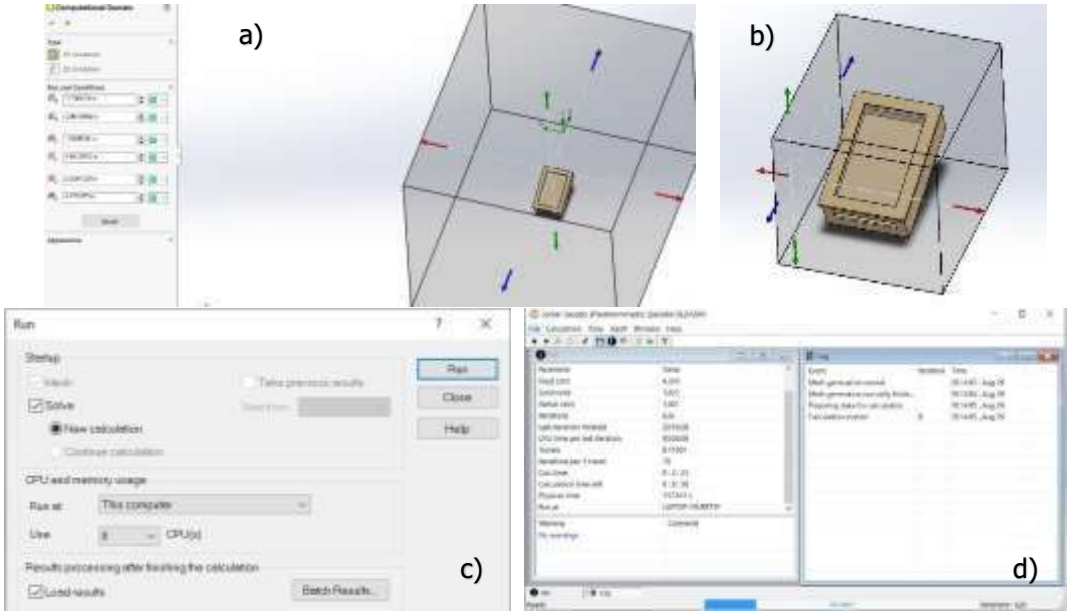


Figura 9. a) Selección del dominio computacional, b) volumen de trabajo a analizar, c) datos de la computadora a utilizar y d) simulación en proceso.

RESULTADOS

Una vez terminada la simulación, se arrojan datos de medición para distintas variables. Primeramente, en la figura 10a, se observa como fluye el aire viniendo de la dirección seleccionada hacia adentro de la caja, esto para ver cómo es que circula el aire en el interior del secador. Para hacer un análisis de la temperatura que se llega a alcanzar dentro del secador, se hizo un análisis interno, y como se observa en la figura 10b, se supone que el aire entra en dirección del eje –Z, entrando por la ranura inferior del secador hacia el interior y tomando en cuenta las mismas características de radiación ya señaladas. Se distingue un plano intermedio en el interior del secador, mostrando los cambios de temperatura al fluir el aire. Aquí se observa que se alcanzan temperaturas alrededor de los 70°C, así como unas flechas que explican la dirección del flujo que lleva el aire al circular en el interior.

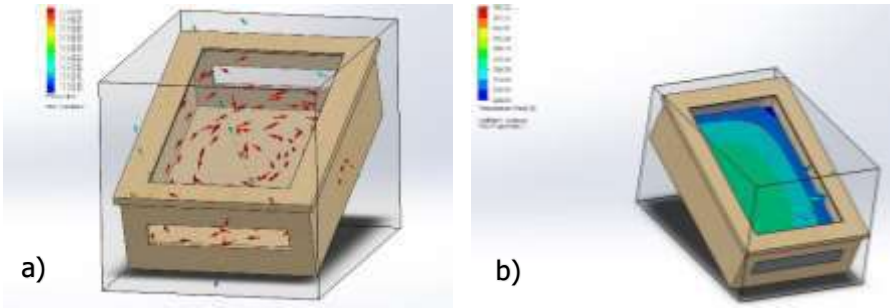


Figura 10. a) Circulación del aire dentro del secador y b) rango de temperaturas alcanzadas por el secador.

La figura 11a, es un ensamble final del secador solar. Es importante mencionar que el ensamble para la simulación de los fluidos, se requería de una geometría simple, por lo que no se añadieron las rejillas ni las manijas que lo conforman. Finalmente, en la figura 11b se muestra el ensamble final explosionado.

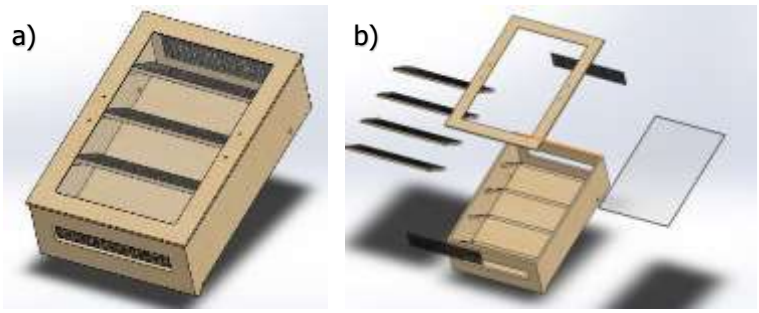


Figura 11. a) Secador solar con las rejillas de secado incorporadas y b) componentes del secador solar.

Para verificar la veracidad de los datos obtenidos en el software, se procedió a secar manzana. Se colocaron 2 kg de la fruta (15 manzanas) dispuestos en las rejillas y se colocaron a las 10:00am el día sábado 5 de diciembre de 2015 (figura 12a). Debido a la intensa radiación que se recibió durante esos días de invierno en nuestra ciudad, las primeras horas de secado fueron cruciales, pues después de 3 horas, se empezó a observar cómo se empezaban a encoger un poco las manzanas y como su coloración cambiaba. No se les puso ningún tipo de tratamiento previo (como jugo de limón para evitar su oxidación). Después de 5 horas, las manzanas habían perdido ya cierto porcentaje de humedad, y su textura había cambiado, como se muestra en la figura 12b. Sin embargo, aún se sentían un poco blandas y lo que se esperaba era que estuvieran crujientes. El secador estuvo en la intemperie por una noche. El único inconveniente presentado fue que en la parte externa del vidrio se formó una fina capa húmeda del rocío de la mañana, la cual se le quitó con un trapo seco. Posteriormente se dejó todo el día domingo para que aprovechara toda la radiación incidente desde las primeras horas del día hasta el anochecer, que fue cuando estuvieron completamente listas las manzanas. A las 3 pm del día domingo, las manzanas ya habían cambiado completamente su forma, pues se percibía cierto doblez en las orillas de éstas. Su sabor era agradable al gusto y prácticamente se podían ya degustar, pues estaban crujientes. Sin embargo, decidí dejarlas todo el día completo para eliminar cualquier residuo de humedad que pudiera quedarse dentro de ellas.

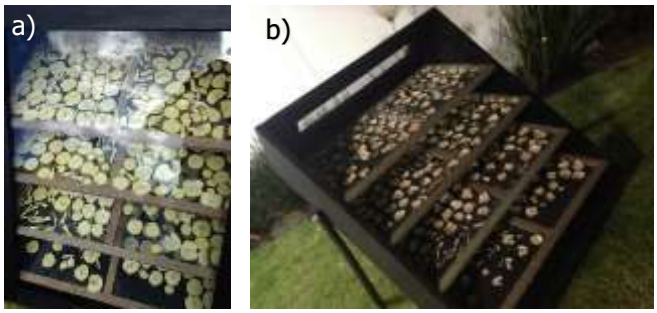


Figura 12. Disminución del porcentaje de humedad de las manzanas.

Cabe mencionar que durante todo el proceso de secado no se formó ningún tipo de condensación dentro del secador, específicamente en el vidrio. A las 7:00 de la noche cuando ya se había metido el sol por completo fue cuando se procedió a colectar las manzanas ya secas (figura 13a). Se observó que no dejan ningún tipo de residuo solido en las mallas (como polvo), pues la muestra solida se recupera en su totalidad. De las 15 manzanas que se tenían inicialmente, se obtuvieron dos canastas de fruta seca, dando un aproximado inicial del 10% del peso inicial (figura 13b). Posteriormente, con el fin de comprobar que porcentaje de humedad se había eliminado, se pesaron las manzanas secas en una báscula, la cual mostró un peso de la fruta seca de 240 g.

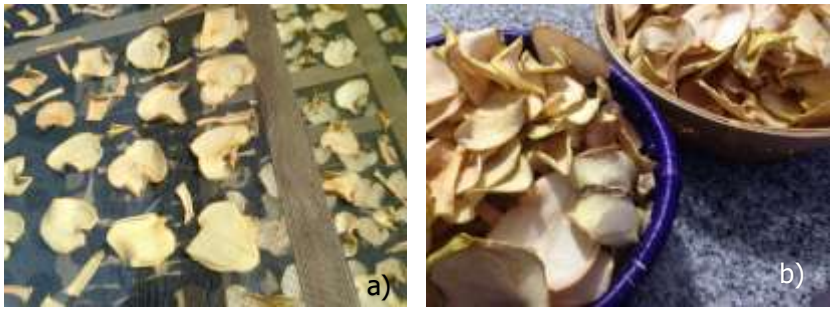


Figura 13. a) Manzanas deshidratadas en el secador y b) una vez que se recogieron y pesaron.

CONCLUSIONES

Se construyó un secador solar de alimentos de 1.20 x 0.80 x 0.35 m, con madera de roble y se hizo la simulación correspondiente en el software de diseño Solid Works, esto para obtener datos sobre su funcionamiento

Aunque inicialmente eran 2kg de manzanas, se debe tomar en cuenta que, al partirlas, se le quita un poco de peso al remover los centros, que incluyen a las semillas y al tallo. Dicho resultado es muy confiable debido a que las manzanas contienen de un 85-90% de humedad, por lo que la pérdida de 88% de humedad suena bastante creíble. [1]

A través del software de diseño de Solid Works se realizaron las principales piezas que componen el secador solar. Este ensamble se compone de una geometría muy simple para hacer más sencilla la simulación del mismo, a través del ensamble mostrado en este trabajo y usando parámetros similares a los de la realidad, se puedo observar su funcionamiento. En el análisis externo se ve que aunque el aire venga de una dirección completamente diferente a los cortes de entrada, se genera un leve efecto de diferencia de presión en la entrada y la salida, y aunque el tiempo de residencia de este no es mucho, llega a subir unos grados la temperatura permitiendo la extracción de humedad de la fruta en un tiempo mayor; en cambio, si el sistema propuesto estuviera cerrado y se hiciera un análisis interno del secador, se observaría que al colocar un flujo de aire en la entrada de debajo del secador con la radiación solar de un lugar como la ciudad de México, es suficiente para alcanzar altas temperaturas que favorecen el tiempo de deshidratación de los alimentos.

Así se pude concluir que se podrían realizar algunos cambios al diseño, disminuyendo el área de las aperturas de la caja principal, para así evitar un flujo de aire grande favoreciendo al tiempo de residencia del fluido, además de que afectaría en tener un tiempo del proceso de secado menor ayudando a aumentar la producción de fruta seca, traduciéndose en una mayor eficiencia del sistema de secado. Otra opción viable para mantener la temperatura dentro del sistema es encontrar la manera de aislarlo, así se podría hacer un cálculo del flujo de calor (W/m^2) a través de las paredes con aislamiento y ver si en comparación al costo de producción de secador el beneficio es mayor.

REFERENCIAS

1. Vidal, A., *Diseño y construcción de un deshidratador híbrido con energías alternas*, in *Escuela Superior de ingeniería mecanica y eléctrica*. 2013, Instituto politécnico nacional: Unidad Culhuacan. p. 131.
2. Almada", F.C.P.d., *Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*, A.S.p.e.d.y.l. cooperación, Editor. 2005: Asunción, Paraguay.
3. Gastronomiasolar. *Deshidratar frutas y otros alimentos*. Cocina con el sol. Es limpio y saludable 29/07/2016]; Available from: http://gastronomiasolar.com/deshidratar-frutas-alimentos/.
4. SolidSolutions. *Radiation in Thermal Simulation Studies*. 2014 12/06/2016]; Available from: https://www.solidsolutions.co.uk/blog/2014/05/radiation-in-thermal-simulation-studies/#.V8TKiJjhBnI.
5. Roccaforte, D., *RV External Analysis with Solar Radiation*. 2013.
6. GoEngineer, *SolidWorks Simulation - Radiation Basic Setup*. 2011.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

Efectos de deriva en la distribución de flujo solar concentrado para plantas de receptor central

Isaías Moreno Cruz y Camilo A. Arancibia Bulnes
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Privada Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos 62580, México,
Tel. (777)3620098, **caab@ier.unam.mx.**

Marcelino Sánchez González
Centro Nacional- de Energías Renovables (CENER), C/ Ciudad de la Innovación 7,
Sarriguren 31621, Navarra, España.

RESUMEN

Se ha desarrollado una nueva herramienta de simulación numérica para estudiar los efectos de deriva en el flujo radiativo concentrado en plantas solares de receptor central. Se entiende por deriva cuando la mancha solar concentrada generada por un helióstato no se mantiene enfocada en el punto deseado del receptor, si no que vaga a lo largo del día sobre éste, en una trayectoria bien definida. Dicho efecto es producto de imprecisiones mecánicas en la fabricación y montaje de un helióstato y son un efecto que siempre está presente en las plantas de receptor central, y que por lo tanto debe ser compensado. Este fenómeno se ha investigado sólo en cuanto a su fenomenología, pero hasta ahora no se ha incluido en las herramientas de simulación. En particular se estudia el comportamiento de la distribución de flujo radiativo concentrado en una planta formada por 82 helióstatos, bajo diferentes escenarios de deriva y de corrección de la misma. Se encuentra un impacto muy importante, una reducción de más de 70% a lo largo del día en el flujo pico cuando no se aplica compensación. Por el contrario, cuando se aplican esquemas simples de compensación es posible recuperar de manera significativa los niveles de concentración de diseño de la planta.

ABSTRACT

A new tool for numerical simulation to study the effect of drift over the concentrate radiative flux in central receiver system is developed. Drift refers to the situation when the spot of the heliostat is not maintained at a specific point over the receiver throughout the day. Instead, the impact point describes a specific path characteristic of that heliostat. This effect is originated by errors during installation and construction of the heliostats, always present in central receiver systems, and thus should be compensated. The phenomenology of drift has been studied, but so far it has not been included in simulation tools. In the present work the distribution of the concentration radiative flux in a field of 82 heliostats has been studied, with different cases of drift correction. The flux density differs strongly from the ideal values assumed in an ideal case without drift, were a reduction about 70% in the peak flux is found without drift correction. However, when drift compensation is implemented it is possible obtain flux levels closer to the design point.

Palabras claves: concentración solar; tecnología de torre central; helióstatos; deriva; flujo radiativo concentrado

INTRODUCCIÓN

Las plantas de receptor central (PRC), también conocidas como plantas de torre central o torre solar de potencia, son sistemas que utilizan la energía solar concentrada para producir electricidad. Una PRC típica esta compuesta por tres subsistemas: un campo de helióstatos, un receptor y un sistema de conversión de potencia. El campo de helióstatos consiste de un gran número de espejos con seguimiento solar de forma individual, en dos ejes, lo que permite mantener enfocada la radiación solar sobre el receptor, localizado en lo alto de una torre. El receptor absorbe la radiación reflejada por los helióstatos transformándola en energía térmica y transfiriéndola a un fluido, generalmente sales fundidas, o agua, para producción directa de vapor. Finalmente el sistema de conversión de energía transforma la energía térmica en mecánica, en una turbina de vapor y un generador eléctrico.

La primera PRC operó en California (EUA), en el periodo de 1984 a 1991 (Hildebrandt et al., 1977). La primera planta con fines comerciales, la PS10, se puso en operación en España en 2006 (Behar et al., 2013) y en la última década se han desarrollado alrededor de una decena de este tipo de plantas. A pesar de esto, la energía obtenida a partir de campos de helióstatos es todavía relativamente cara y dicho campo helióstatos representa cerca del 50% del costo total de la planta (Hildebrandt et al., 1977). Una de las razones de ello, es que aunque los helióstatos tienen una precisión de seguimiento de diseño de 0.05º (Walraven, 1978), esta en la práctica no se alcanza. Esto se debe a que existen imprecisiones geométricas durante la instalación y operación de los helióstatos, que generan el fenómeno conocido como *deriva*.

Se entiende por deriva el fenómeno de que la mancha solar concentrada por un helióstato se mueva a lo largo del día sobre el receptor siguiendo una determinada trayectoria, en lugar de permanecer estática en el punto de enfoque predeterminado. Este es un fenómeno muy común y extremadamente difícil de evitar en los campos de helióstatos, al grado de que es normal tener que estar introduciendo correcciones cada 15 días en el seguimiento individual de cada uno. Esto desde luego baja la precisión global de seguimiento y el nivel de concentración producido por el campo. Algunos errores comunes que la generan son (Escobar-Toledo et al., 2014): error de posicionamiento angular, error de pedestal y error de canteo. El error de posicionamiento es la diferencia entre la posición ideal de referencia y la real en los ángulos cenital y acimutal de movimiento del helióstato; es decir, que cada uno de dichos ángulos es incierto por una constante aditiva, que proviene de la incertidumbre en la posición exacta de los sensores de referencia. El error de pedestal esta asociado a la inclinación que posee el pedestal del helióstato respecto a la posición ideal, es decir, la vertical. Finalmente, el error de canteo esta asociada a la orientación del de las facetas del helióstato, que dan lugar a un eje óptico desviado con respecto al eje de diseño. Cada uno de estos errores puede ser pequeño, del orden de entre una décima o un cuarto de grado y aun así provocar efectos importantes de deriva.

En el presente artículo se describe una metodología que nos permite simular el comportamiento de un campo de helióstatos con deriva a lo largo del día, en donde podemos observar la gran diferencia en la densidad de flujo con y sin deriva en los helióstatos y también tratar de predecir la bondad de diferentes métodos que se proponen para la compensación de dicha deriva.

METODOLOGÍA

El código presentado tiene la capacidad de simular un campo de helióstatos en donde cada helióstato incluye su propia deriva. La simulación se lleva acabo utilizando trazado de rayos con el método de convolución, en el cual el rayo reflejando del espejo es un cono de error calculado por la convolución de las distribuciones Gaussianas correspondientes a la forma solar, y los errores ópticos. Las ecuaciones utilizadas se basan en el modelo analítico de Collado et al. (1986) para calcular la densidad de flujo de un helióstato en el receptor, y las ecuaciones de deriva propuestas en Escobar-Toledo et al. (2014). El código esta programado en lenguaje C y se basa en cuatro cálculos básicas: (a) El cálculo de la posición solar, (b) la generación de errores por una distribución normal, (c) el cálculo de la deriva de cada helióstato y (d) el cálculo de la densidad de flujo producida por el conjunto de helióstatos.

Se utilizaron tres sistemas de referencia, un sistema de referencia global, un sistema de referencia local asociado al helióstato y un sistema de referencia en el receptor. La posición solar es calculado como lo propone Duffie and Beckman (2013), basada en la simplificación de Spencer (1971), el vector solar calculado en tiempo solar esta referenciado al sistema global de referencia. Los errores de deriva son generados por una distribución Gaussiana, por el método de Box-Muller (Knuth, 1997; Press et al., 1992). Los errores de deriva son generados por imprecisiones geométricas durante la instalación y operación de los helióstatos. Los parámetros primarios de error que producen deriva son (Escobar-Toledo et al., 2014): error de posicionamiento angular ($\Delta\theta_z$, $\Delta\gamma_s$), error de canteo (ξ) y error de pedestal (ε, κ). La Fig. 1 muestra el error de pedestal y el error de canteo.

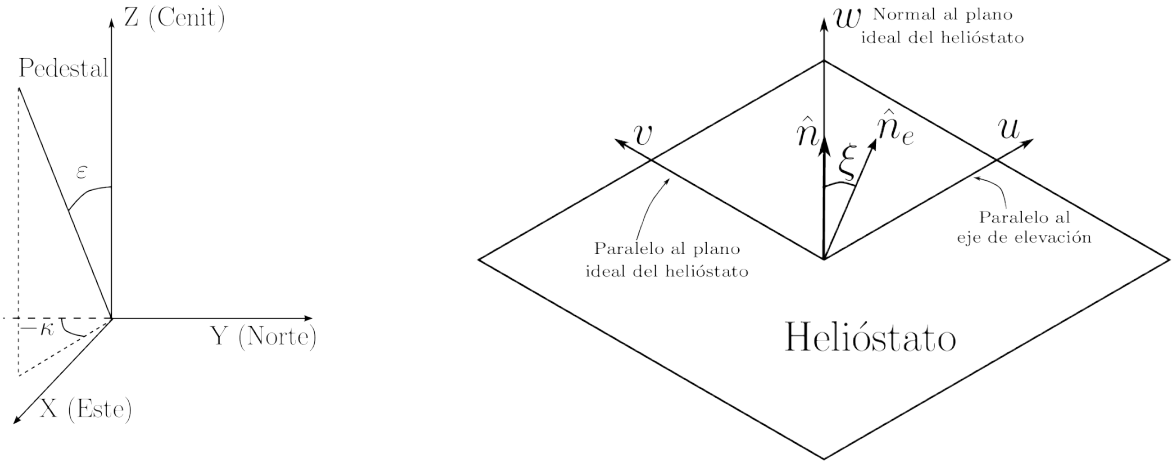


Fig. 1: Del lado izquierdo se muestra el error de pedestal (ε, κ) y del lado derecho el error de canteo (ξ).

El error de posicionamiento se representa por dos errores constantes en los ángulos cenital $\Delta\theta_z$ y acimutal $\Delta\gamma_s$. El canteo de un helióstato puede ser representado por dos ángulos, el primero asociado al eje de elevación y el segundo paralelo al plano ideal del helióstato. El error respecto al eje de elevación ya está tomando en cuenta en el ángulo $\Delta\theta_z$, por lo que el canteo puede ser representado únicamente por el ángulo ξ en el plano uw. Así el error de canteo en el sistema de referencia local del helióstato esta dado por el vector $\hat{n}_e = (\sin\xi\,, 0, \cos\xi)$. Para conocer este vector en el sistema de referencia global consideramos las rotaciones (Collins et al., 1989) correspondientes al giro del helióstato, que están dadas por $\theta_z' = \theta_z + \Delta\theta_z$ y $\gamma_s = \gamma_s' + \Delta\gamma_s$, para obtener la matriz de rotación correspondiente $\mathbf{P}$. De manera análoga obtenemos la matriz de rotación $\mathbf{M}$ para el error de pedestal, donde la rotación esta compuesta de 3 pasos, un giro por un ángulo κ, otro en un ángulo ε y finalmente uno en $-\kappa$ (Lara-Cerecedo et al., 2016). Por lo tanto, el vector normal con errores de deriva esta dado por $\hat{n}_{ec} = \mathbf{MP}\,\hat{n}_c$. La deriva es función de la posición cenital θ_z y acimutal $\gamma_s$del helióstato las cuales dependen del vector solar, que es función del tiempo, lo que significa que la deriva es dependiente del tiempo.

Para el cálculo de la densidad de flujo en el receptor usamos la propuesta de Collado et al. (1986), que sugiere un modelo para calcular la densidad de flujo generado por un helióstato en un receptor plano. Este modelo esta basado en la integración de las distribuciones de flujo de cada rayo reflejado sobre el receptor y se expresa en términos de la función de error. La simplificación que involucra es que considera

helióstatos rectangulares continuos y con curvatura esférica. La forma solar y los errores ópticos son considerados como distribuciones probabilísticas Gaussianas, por lo que la convolución puede ser resuelta de forma analítica.

A partir de la solución así obtenida podemos conocer la potencia en el receptor, conociendo la posición de un helióstato y su orientación. Asignado errores aleatorios Gaussianos al helióstato podemos calcular la deriva de éste en un determinado momento y poder determinar cual será el nuevo punto de impacto p. Si esto se aplica a todos los helióstatos de un campo, cada uno con su correspondiente deriva podemos calcular la distribución de flujo producida por el campo en el receptor y su evolución a lo largo del día.

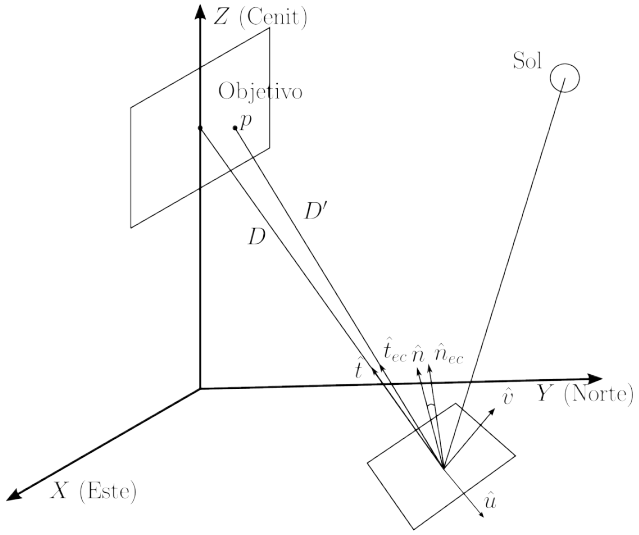


Fig. 2: Vector central de refracción en el helióstato con $\hat{t}_{ec}$ y sin $\hat{t}$ deriva.

El código requiere los siguientes datos de entrada: datos generales, datos de corrección de deriva y datos del campo de helióstatos. Los datos generales incluyen día y mes; la hora de inicio y fin; la latitud del lugar; la desviación estándar asociada al tamaño del Sol, considerado como un distribución Gaussiana; la discretización del receptor , y el paso del tiempo de la simulación. Los datos de corrección de deriva incluyen el día, el mes, el tiempo de corrección así como la media y la desviación estándar para la generación de errores de deriva. Para el campo de helióstatos se requiere la posición de helióstatos, la posición del objetivo, el tamaño del helióstato, la refrectancia del espejo, el error de seguimiento y pendiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección analizaremos el impacto de la deriva en la densidad de flujo sobre el receptor, como un ejemplo simularemos el campo experimental de 82 helióstatos localizado en Hermosillo, Sonora, México, que se encuentra a una latitud de 29.03º. Este campo se desarrolló conjuntamente por la UNAM y la UNISON, como parte del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración y Química Solar (LACYQS). La simulación se lleva a cabo para el 21 de junio, desde las 7:00 a 17:00 hrs (tiempo solar), considerando un cono de error del sol de 2.51mrad (Sánchez-González y Santana, 2015), con un tamaño del receptor de 8x8m y una discretización de 5x5cm. El tamaño del helióstato es de 6x6m, con una reflectancia ρ de 0.80 y un receptor ubicado en la torre a una distancia de 32m de altura.

Para la generación de todos los errores primarios de deriva ($\varepsilon, \xi, \Delta\theta_z \; y \; \Delta\gamma_s$) errores de deriva se utilizo una desviación estándar σ=4.5 mrad, lo que significa que el 98% de los valores varían entre -9 y 9 mrad, y los ángulos κ varían uniformemente entre $-\pi$ y π.

Cada uno de los 82 heliostatos es simulado con su respectiva deriva. En la Fig. 3a podemos observar el comportamiento de las curvas de deriva a lo largo del día en el receptor. Como podemos observar, la deriva, además de producir un desplazamiento a lo largo del día del punto de impacto de cada helióstato, tiende a descentrarlos hacia las orillas del receptor. Por esto es indispensable su corrección. La manera más simple de hacerlo, es una vez observado el punto de impacto real, es restar el vector del punto de impacto real al punto de impacto deseado. De este modo los helióstatos son corregidos al centro del receptor, y es a lo que llamamos corrección de deriva. Esta corrección se puede hacer por ejemplo al comenzar la operación, a las 7:00hrs. Luego, conforme avance el día se irá deteriorando esta corrección, lo cual se ilustra en la Fig. 3b.

Con la deriva corregida a las 7:00hrs el campo de helióstatos se simulo a lo largo del día, cada 30 min, hasta las 17:00hrs. En las Figs. 4 puede verse los efectos de la deriva en la distribución de flujo en el receptor para las 8:00, 11:00, 13:00 y 15:00hrs. Puede observarse con claridad una distribución muy bien definida y simétrica al comienzo del día, la cual ya al mediodía se ha deteriorado significativamente.

La Fig. 5 muestra la densidad de flujo máximo para el campo de helióstatos a lo largo del día, comparando el comportamiento ideal y real. El comportamiento ideal, sin deriva, es usualmente utilizado para las simulaciones de campo. Comparando la densidad de flujo máximo podemos observar que para la hora corregida el flujo es igual, como se espera que ocurra, y después de no más de tres horas la curva se separa drásticamente, decreciendo 43%. La diferencia máxima ocurre cerca de las 14:30hrs y es del 82% respecto al ideal. La curva con deriva decrece porque el *spot* de los 82 helióstatos en el receptor esta disperso, como se muestra en la Fig. 5b. Si consideramos un área de 2x2 en el receptor, podemos calcular la potencia a lo largo del día y ver que la potencia real es 53% de la ideal, en el área indicada.

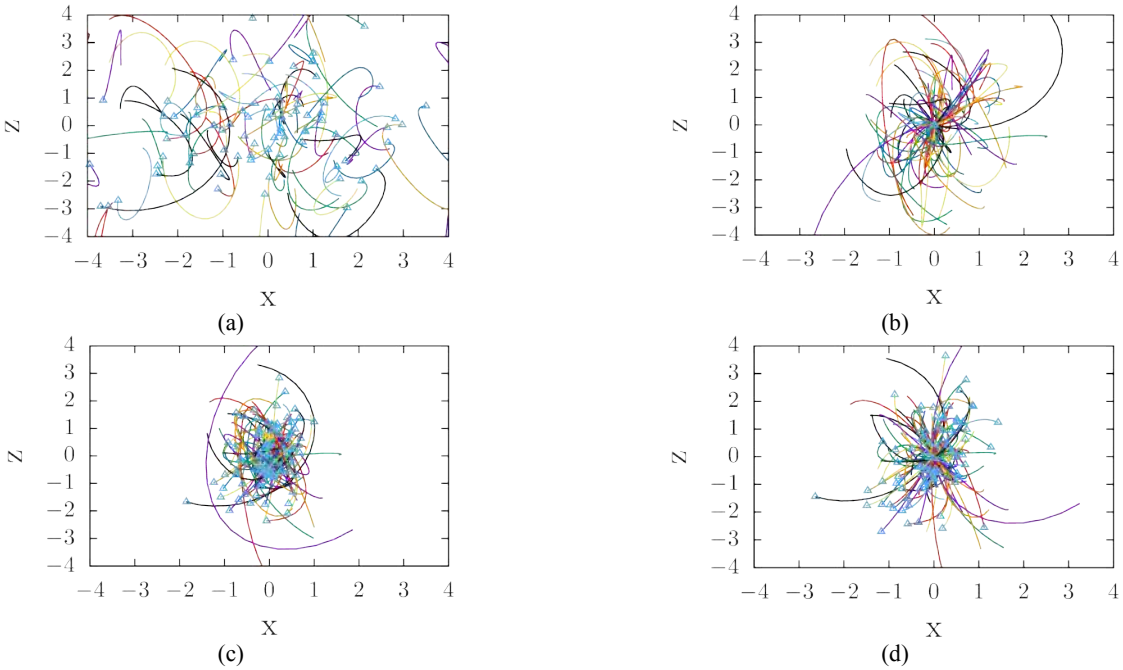


Fig. 3: Comportamiento de la deriva para cada uno de los 82 helióstatos a lo largo del día (a); efecto de una corrección de deriva a las 7:00hrs (b); corrección de deriva mediante el centroide de las curvas (c), y corrección al medio día solar (d). En todos los casos los triángulos representan el punto de la curva correspondiente al comienzo de la operación (7:00 a.m.).

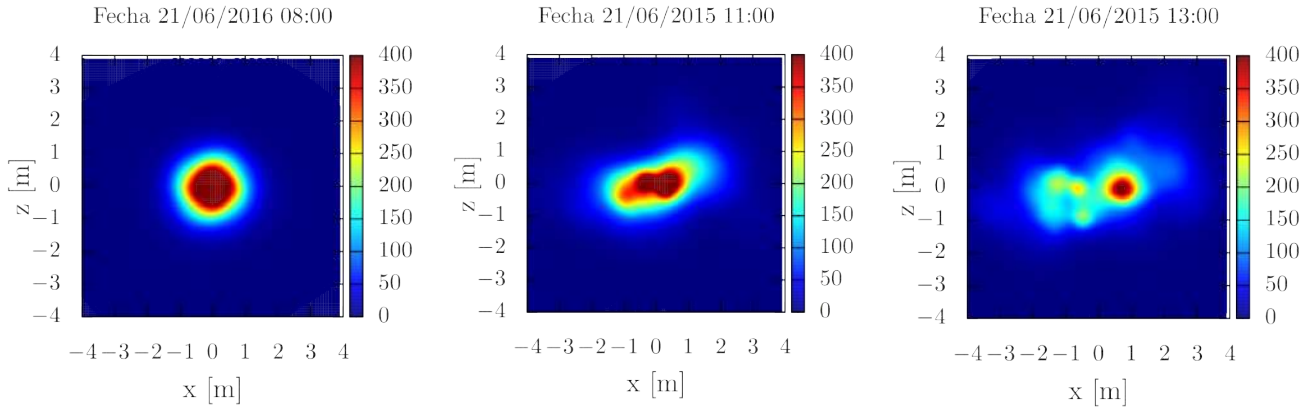
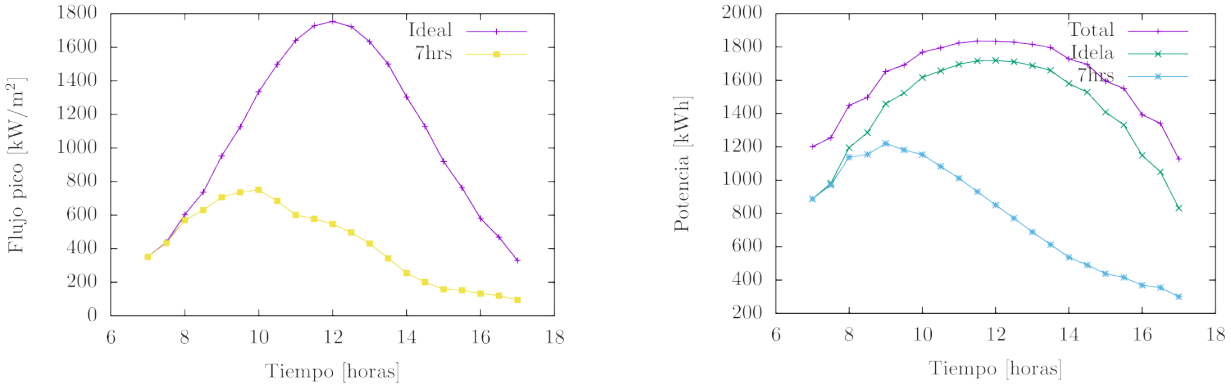


Fig. 4: Comportamiento del campo de helióstatos a lo largo del día, para el 21 de junio a las 8, 11, 13 y 15hrs. Realizando una corrección de deriva a las 7hrs.

Para la misma área de 2x2m podemos calcular el factor de intercepción Γ para la potencia real e ideal. Su comportamiento puede observarse en la Fig. 6, donde observamos como el valor de Γ real decrece a través del día. El promedio del factor de intercepción real es 0.87, mientras que el real es de 0.51, para un área de 2x2m.

Hemos comparado la densidad de flujo usando una corrección a las 7:00hrs, la cual es la forma de corrección de deriva más intuitiva dado que se corrige a la hora de orientar cada helióstato al receptor, o más de una vez a lo largo del día, pero no es la mejor como se puede ver en la Fig.7. La corrección ideal es una corrección que se conserve a través del tiempo, puede ser posible dado que trabajamos con errores sistemáticos. Si conocemos la curva de deriva de cada helióstato del campo podemos proponer algunas estrategias de corrección, como por ejemplo corregir la deriva con el valor de desviación del medio día solar del día previo, o con el centroide de la curva de deriva. La Fig. 7 muestra el comportamiento de las curvas de deriva con una corrección a las 7hrs, al medio día solar y con el centroide.



(a) (b)

Fig. 5: Densidad de flujo máximo en el receptor a lo largo del día, para el comportamiento real e ideal (a) y potencia interceptada en el receptor en un área de 2x2m.

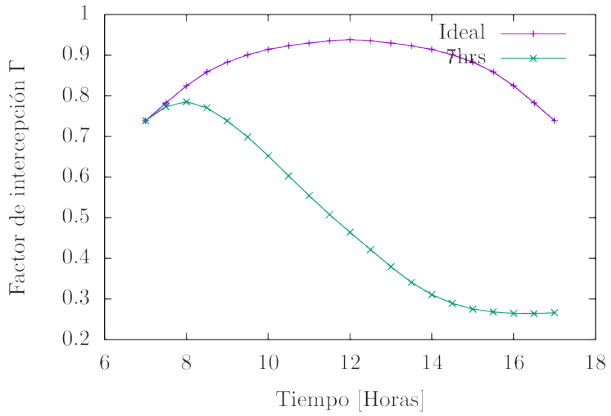
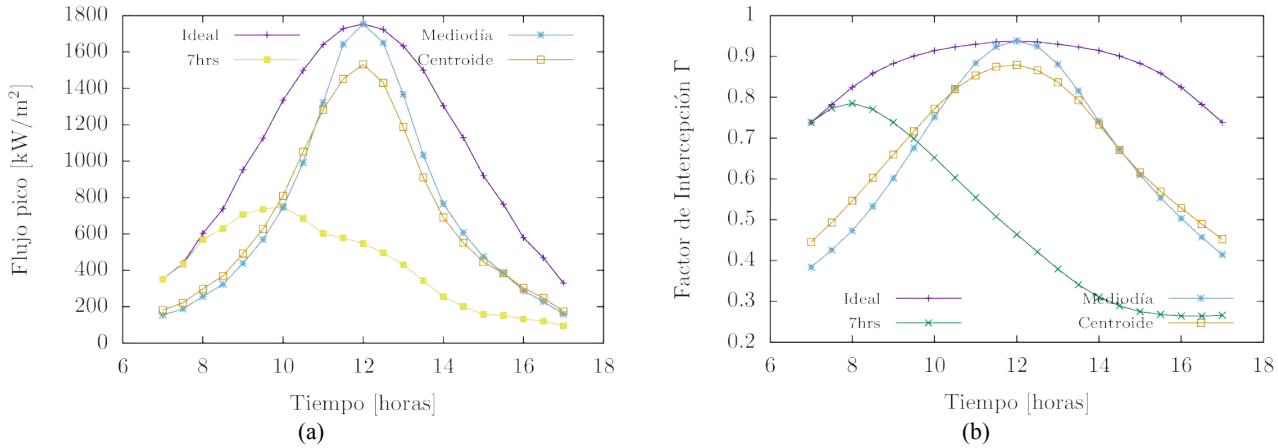


Fig. 6: Comportamiento del factor de intercepción real e ideal (Γ) a lo largo del día para un área de 2x2m.

La Fig. 7a muestra la densidad de flujo máximo entre el comportamiento ideal y las diferentes correcciones. La diferencia porcentual entre el comportamiento ideal y la corrección real con deriva es de 54.7%, 39.2% y 39.8% para la corrección de deriva a las 7:00hrs, al medio día solar y utilizando el centroide, respectivamente. La Fig. 7b muestra el comportamiento del factor de intercepción, en una área de 2x2m, para un comportamiento ideal y la corrección de deriva utilizando el centroide y el medio día solar.

Para la misma área, 2x2m, tenemos 14,098 kWh para una simulación ideal sin deriva comparada con la real de 7,587, 11,064 y 11,154 kWh. Significa que tenemos una reducción de energía de 46.18, 21.52 y 20.87% para correcciones a las 7hrs, al medio día solar y con el centroide, respectivamente.



(a) (b)

Fig. 7: Densidad de flujo máximo (a) y comportamiento del factor de intercepción Γ (b) para diferentes correcciones de deriva.

Tabla 1: Diferencia de la densidad de flujo pico entre el comportamiento ideal y las correcciones de deriva.

Corrección	7hrs	Medio día	centroide
Min. %	0.00	0.00	12.68
Media %	68.81	48.50	47.07
Max. %	82.83	57.43	52.50

CONCLUSIONES

El estudio dinámico del *spot* en el receptor ocasionado por un heliostato, o campo de helióstatos que poseen deriva, nos permite visualizar sus efectos directamente en la potencia obtenida en el receptor a lo largo del día. El conocerla nos permite plantear estrategias de corrección para mejorar la densidad de flujo en el receptor.

En el presente articulo sean planteado tres formas de corrección. La más intuitiva es la corrección a la hora de ingresar un helióstato al receptor, aproximadamente a las 7:00hrs, la cual nos da excelentes resultados a la hora de corrección pero mientras el día va avanzado las perdidas de potencia son muy grandes.

La corrección al medio día solar, es similar a la corrección anterior solo que en lugar de corregirlo a la hora de ingresar el helióstato lo corregimos al medio día solar del día anterior, lo que nos permite obtener una potencia máxima al medio día solar y una disminución gradual antes y después. Las correcciones anteriores necesitan conocer un valor de la deriva a una determinada hora. Por otro lado, la tercera corrección propuesta, basada en el centroide de la curva de deriva, necesita conocer el valor de deriva a lo largo de un día anterior completo poder realizar la corrección.

Los mejores resultados se obtuvieron al utilizar la corrección del centroide, dado que la reducción de potencia respecto al valor ideal fue de 20.87%. Sin embargo se requiere mucha mayor información que la corrección al medio día solar en la cual la potencia se reduce únicamente 21.52%, es decir solo 0.65% más que la corrección con el centroide. Es por eso que se recomienda una corrección simple, corrigiendo al medio día solar, para obtener mejores resultados evitando grandes perdidas. Por otro lado, si existe la posibilidad de invertir más tiempo en el muestreo experimental de errores, se puede proponer una corrección dinámica, como la de Iriarte-Cornejo et al., (2012), la cual potencialmente podría dar excelentes resultados y que se explorará en trabajo futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por el proyecto No. 609837 (“STAGE-STE”), del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea. Isaías Moreno-Cruz agradece el apoyo de CONACYT a través de una beca doctoral.

BIBLIOGRAFÍA

Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., 2013. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (C), 12–39.

Berenguel, M., Rubio, F., Valverde, A., Lara, P., Arahal, M., Camacho, E., López, M., 2004. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. Solar Energy 76 (5), 563–575.

Collado, F., Gomez, A., Turégano, J., 1986. An analytic function for the flux density due to sunlight reflected from a heliostat. Solar Energy 37 (3), 215–234.

Collins, G. W., et al., 1989. The foundations of celestial mechanics. The Foundations of Celestial Mechanics, by George W. Collins, II. Tucson, AZ, Pachart Publishing House (Pachart Astronomy and Astrophysics Series. Volume 16) 1.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons.

Escobar-Toledo, M., Arancibia-Bulnes, C. A., Iriarte-Cornejo, C., Waissman, J., Riveros-Rosas, D., Cabanillas, R. E., Estrada, C. A., 2014. Heliostat image drift behavior for different error sources. Journal of Renewable and Sustainable Energy 6 (2), 023117.

Escobar-Toledo, M., Arancibia-Bulnes, C. A., Peña-Cruz, M. I., Riveros-Rosas, D., Peón-Anaya, R., Iriarte-Cornejo, C., Cabanillas, R. E., Estrada, C. A., 2012. Analysis of drift phenomena in heliostat images. In: ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2012 10th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. American Society of Mechanical Engineers, pp. 385–392.

Hildebrandt, A. F., et al., 1977. Power with heliostats. Science 197, 1139–1146.

Iriarte-Cornejo C., Arancibia-Bulnes C. A., Salgado-Transito I., Waissman J., Cabanillas R. E., Estrada C. A., 2014. Compensation of heliostat drift by seasonal sampling. Solar Energy 105, 330-340.

Knuth, D., 1997. The art of computer programming 1: Fundamental algorithms 2: Seminumerical algorithms 3: Sorting and searching.

Kribus, A., Vishnevetsky, I., Yogev, A., Rubinov, T., Apr 2004. Closed loop control of heliostats. Energy 29 (5-6), 905–913. 195

Lara-Cerecedo, L. O., Moreno-Cruz, I., Pitalúa-Diaz, N., Arancibia-Bulnes, C. A., 2016. Modeling of drift effects on solar tower concentrated flux distributions. International Journal of Photoenergy 2016, 8375361.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1992. Numerical recipes (Cambridge University Press, Cambridge).

Sánchez-González, A., Santana, D., 2015. Solar flux distribution on central receivers: A projection method from analytic function. Renewable Energy 74, 576–587. 200

Spencer, J., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. Search 2 (5), 172–172.

Walraven, R., 1978. Calculating the position of the sun. Solar Energy 20 (5), 393 – 397.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO Y PRUEBAS TÉRMICAS DE UN REACTOR SOLAR TÉRMICO DE CAVIDAD PARA REDUCCIÒN DE ÓXIDOS METÁLICOS

Carlos E. Arreola Ramos, Juan O. Del Valle Barrera, Heidi I. Villafán Vidales, Camilo A. Arancibia Bulnes
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada de Xochicalco s/n, 62580 Temixco, Morelos, México. **email: caab@ier.unam.mx**

Fernando U. Morales López
Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca, Avenida Universidad s/n, 71270 San Pablo Huixtepec, Oaxaca, México.

Hernando Romero Paredes
Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, Vicentina, 09340 Ciudad de México, México

RESUMEN

Se diseñó y construyó un reactor solar térmico de cavidad para reducción de óxidos metálicos, para su aplicación en la producción de combustibles solares. Dicho reactor utiliza un medio cerámico poroso como absorbedor, donde se depositan los óxidos a reducir y el cual es iluminado por radiación solar altamente concentrada. El diseño se llevó a cabo para poder ser operado bajo diferentes condiciones en el Horno Solar del IER-UNAM y se realizó con base en trazo de rayos y simulaciones térmicas. En este trabajo e discute el proceso de diseño del reactor y se reportan los resultados de las preimeras pruebas térmicas horno solar, así como su evaluación calorimétrica. El diseño permite emplear diferentes condiciones de operación así como diferentes materiales cerámicos y eventualmente ser aplicado a una variedad de reacciones químicas de interés.

Palabras clave: Concentración solar; Termoquímica solar; Combustibles solares; Calorimetría.

ABSTRACT

A cavity solar thermochemnical reactor for the reduction of metal oxides has been developed, to be employed in the production of solar fuels. The reactor utilizes a porous ceramic medium as absorber material, where the metal oxides to be reduced are deposited and are illuminated by highly concentrated solar radiation. The design was carried out in order to be operated under different conditions in the IER-UNAM Solar Furnace, and is based on ray tracing and thermal simulations. The first results of the thermal testing of the reactor in the solar furnace and its calorimetric evaluation are reported. The design allows the use of different operating conditions and different ceramic materials, and could be applied to a variety of chemical reactions of interest.

Keywords: Solar concentration; solar thermochemistry; solar fuels; Calorimetry.

1. INTRODUCCIÓN

La producción solar de combustibles limpios, como el hidrógeno, es un área de investigación amplia y prometedora (Ngoh y Njomob, 2012). En particular, los métodos termoquímicos son una de las opciones más atractivas para producir combustibles solares. Estos métodos se basan en a utilización de radiación solar altamente concentrada para alimentar reacciones químicas endotérmicas de alta temperatura, que dan como resultado neto la producción de hidrógeno, o bien la producción de hidrocarburos de alto contenido energético, a partir otros más pobres, como el carbón, el coque de petroleo o biomasa de desecho. A largo plazo, la termoquímica solar tiene el potencial de convertirse en una opción atractiva para obtener combustibles almacenables y transportables, resuciendo la emisión de gases de efecto invernadero.

Entre los procesos que se pueden utilizar para producir hidrógeno solar, los ciclos termoquímicos son una de las opciones más prometedoras ya que en principio podrían permitir alcanzar una una alta eficiencia energética, debido a la conversión directa de calor en hidrógeno en procesos de alta temperatura (Steinfeld, 2005; Kodama y Gokon, 2007). Existen diferentes ciclos termoquímicos que permiten obtener hidrógeno (Abanades et al., 2006), entre los cuales están los basados en óxidos metálicos (Martinek et al., 2014; Chambon et al., 2011). En particular, los óxidos de Cerio ha recibido un interes especial en trabajos recientres (Abanades y Flamant 2006; Villafán-Vidales et al., 2009; Chueh et al., 2010; Venstrom et al., 2014), debido a sus ventajas operativas y potencial de mayores eficiencias (Chueh et al., 2010).

En términos generales, ciclos de óxidos metálicos se pueden representar como un conjunto de dos reacciones

$$MO_{ox} \rightarrow MO_{red} + (1/2)\, O_2 \quad (1)$$

$$MO_{red} + H_2O \rightarrow MO_{ox} + H_2 \quad (2)$$

donde MO_{ox} representa un óxido metálico y MO_{red} un óxido reducido del mismo metal. El primer paso del ciclo es una reacción endotérmica altamente energética que requiere temperaturas típicamente por arriba de 1000 K. En esta reacción, el óxido metálico es reducido a alta temperatura, liberando oxígeno y quedando en un estado menor de oxidación. En el segundo paso el óxido reducido se hidroliza con vapor de agua a temperaturas mucho menores, dando lugar a la producción de hidrógeno y recuperándose el óxido original. El resultado neto del ciclo es disociación de la molécula de agua, sin la producción de ningún residuo. Los ciclos termoquímicos se prefieren a la termólisis directa de la molécula de agua, que es un proceso que requiere temperaturas mucho mayores (por arriba de 2500 K) y presenta problemas técnicos muy difíciles de superar (Steinfeld, 2005).

Una parte fundamental del desarrollo de procesos termoquímicos solares para la producción de hidrógeno, es el diseño de reactores eficientes para llevarlos a cabo. En dichos reactores, dadas las altas temperaturas y altos niveles de flujo solar concentrado involucrados, los procesos de transferencia de calor por radiación toman un lugar preponderante, junto a la convección y conducción. El diseño debe optimizar la transferencia de calor del flujo solar concentrado hacia los reactivos, preservando la integridad de las diferentes componentes del reactor ante las altas temperaturas.

Los reactores solares termoquímicos se pueden clasificar en reactores directa o indirectamente irradiados. En el primer tipo los reactivos son iluminados directamente por la radiación solar concentrada, que entra al reactor a través de una ventana transparente, mientras que en el segundo los reactivos se calientan indirectamente mediante conducción, siendo absorbido el calor por una pared opaca del reactor. Los reactores directamente irradiados son los que presentan mejores eficiencias, debido a una transferencia de calor más directa hacia los reactivos y permiten operar en procesos de mayor temperatura. En particular, se usan para llevar a cabo los ciclos termoquímicos de óxidos metálicos. A su vez, los reactores directamente irradiados pueden clasificarse como reactores del tipo monolítico, con material activo fijo y reactores que utilizan partículas en movimiento. Los reactores del tipo monolítico están formados por estructuras porosas donde se deposita el óxido metálico a utilizar. Este material recibe directamente la radiación concentrada y transfieren el calor a un fluido, normalmente aire, que atraviesa la estructura. Los reactores multiplican considerablemente la superficie de contacto entre la radiación solar y el material del absorbedor y el gas de arrastre que lo atraviesa, permitiendo potenciar la transferencia de calor por convección y, por ello, trabajar a grandes flujos solares (Gomez-Garcia et. al. 2016; Agrafiotis et al., 2007; Becker et al., 2006). Con el fin de implementar procesos termoquímicos a base de óxidos metálicos mixtos soportados en estructuras cerámicas porosas, se ha desarrollado un reactor solar térmico de cavidad, para ser utilizado en el Horno Solar del IER-UNAM (HoSIER) (Riveros-Rosas et al., 2010).

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE REACTOR

Partiendo de las ventajas arriba mencionadas que se extraen de la literatura, se optó por plantear un reactor de cavidad, directamente irradiado y con el óxido metálico depositado en una espuma cerámica porosa. El diseño se llevó a cabo en tres etapas: un primer análisis basado en trazo de rayos, para determinar los parámetros geométricos generales del reactor, un análisis de transferencia de calor para determinar las dimensiones de los materiales aislantes; y, finalmente, el diseño de detalle para definir todas las componentes y su acoplamiento y generar los planos de fabricación.

2.1. Trazo de rayos

A priori y basándose en la experiencia previa con reactores solares en el (HoSIER) se fijó una de las caracterísiticas geometricas generales para el reactor, como se explica a continuación:

Se busca poder trabajar con materiales transparentes de bajo costo para la ventana que cierra la cavidad. Comunmente se utilizan ventanas de cuarzo, para que absorban lo menos posible la radiación solar concentrada que pasa por ellas, sufriendo de este modo menos calentamiento y por lo tanto menos riesgo de ruptura debido a choques térmicos. Sin embargo, dichas ventanas son muy costosas y se encarecen más proporcionalmente a medida que aumenta su área, por lo que no parecen opciones viables para reactores de escala piloto o industrial. Además, en la práctica hay multiples situaciones experimentales en que dichas ventanas fallan debido a estrés térmico. Por lo tanto, se decidió trabajar con vidrio en lugar de cristal de cuarzo. Para reducir el calentamiento de la ventana, se decidió alejar la misma del foco, poniéndola más adelante, es decir más cerca del concentrador. De este modo la radiación al pasar por la ventana viene menos concetrada, con la consecuente reducción del calentamiento. Esto se vuelve más importante si se toma en cuenta que el vidrio tiene un punto de fusión menor al del cuarzo. Por otro lado, alejar la ventana también reduce el riesgo de incrustaciones y ensuciamiento de la ventana por partículas que salen despedidas de la zona de reacción, con la consecuente generación de puntos calientes que dan lugar a estrés térmico. Se planteó de manera preliminar tener una distancia de al menos 17 cm.

Por otro lado, se planteó que el material poroso se encuentre en la zona focal con el objeto de alcanzar temperaturas de reacción (alrededor de 1600 K para la reducción y alrededor de los 1000 K para la producción de H_2).

Partiendo de estas premisas, se llevaron a cabo simulaciones de trazo de rayos mediante el software SOLTRACE, para analizar el efecto que tiene usar ventanas de diferentes tamaños, ubicadas a diferentes distancias del foco, sobre la distribución de flujo radiativo concentrado y la potencia total incidente sobre la muestra. En este análisis se incluyeron el helióstato, el concentrador, con sus 40 facetas, la brida de la ventana y las dos caras de la misma. Se consideraron ventanas con diámetros de 20 y 40 cm, ubicadas a distancias de entre 0

y 26 cm del punto focal. También se consideró el caso sin ventana. Este último, así como el de las ventanas a distancias menores a 17 cm se incluyeron sólo con fines de comparación. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de estas simulaciones.

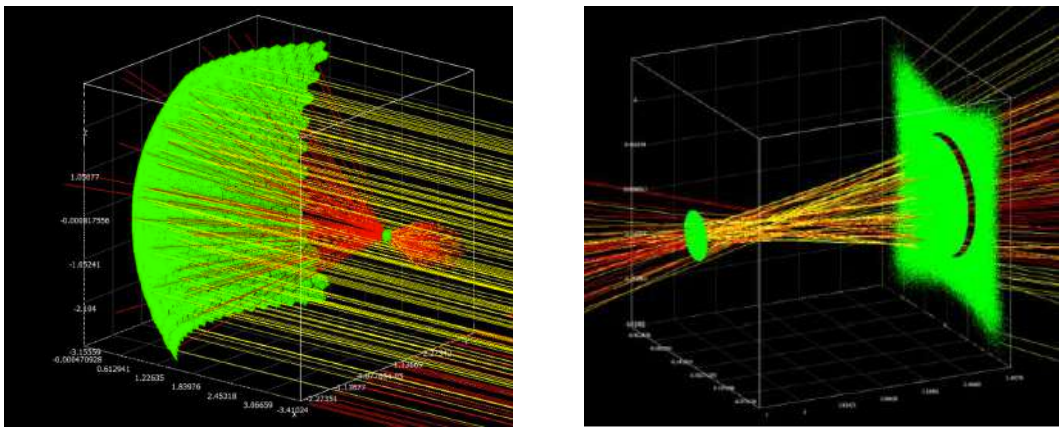


Figura 1. Simulación de los componentes principales del horno y el reactor mediante trazo de rayos. En la imagen izquierda se puede observar el concentrador del horno enfocando los rayos sobre el reactor; en la imagen de la derecha se observa un acercamiento con el detalle de las superficies que se usaron para representar el reactor; de izquierda a derecha, la mancha en la zona focal, la ventana y la brida refrigerada de la misma.

Las consideraciones para las simulaciones fueron las siguientes: los errores ópticos globales, incluyendo helióstato y concentrador, se tomaron como de 2.2 mrad, con base en un estudio previo del horno (Riveros-Rosas et al., 2011). Para las propiedades ópticas de la ventana se consideraron una transmitancia de 87%, en el rango de longitudes de onda de 0.25 a 2.5 µm, con una reflectancia del 2% en el rango visible, de 0.4 a 0.7 µm. Sin embargo, para fines de la simulación, se tomaron estos valores en todo el espectro de longitudes de onda. Lo anterior representa una sobrestimación en la radiación incidente de 9.8%, ya que aproximadamente el 91% de la radiación solar se encuentra en la banda de longitudes de onda donde el material tiene buena transmisión. Se incluyo un bafle (sistema de enfriamiento de la brida), delante de la ventana, que bloqueó el resto de la radicación cuya transmitancia se determinó como 0%. Finalmente, la forma solar se obtuvo de una imagen real tomada en un día típico en Temixco (Gallardo, 2013).

En la Tabla 1 se presentan ejemplos de los resultados parara el caso particular de una ventana de 40 cm de diámetro. Como se puede ver, el alejar la ventana tiene el efecto de reducir la potencia que llega al foco, ya que se cierra el ángulo efectivo de aceptación del reactor para la radiación concentrada. Debido a esta observación, se decidió establecer la potencia de diseño en alrededor de 10 kW. Esto buscando aumentar la distancia de la ventana al foco lo más posible, pero buscando a la vez tener un diámetro no excesivamente grande para evitar que la ventana sea demasiado frágil ante la presión negativa del vacío parcial que se genera en el reactor. Por otro lado, es importante que el diámetro no sea tan grande para que el reactor no cause mucho sombreamiento sobre el concentrador, debido al bloqueo de radiación proveniente del helióstato. Otro parámetro importante es el flujo radiativo máximo aceptable, el cual que se decidió en 4 MW/m^2, debido a los rangos de temperatura de operación que se desea tener. Con estos criterios se decidió utilizar una ventana de 40 cm de diámetro, ubicada a 22 cm del foco donde se ubica el material poroso.

Tabla 1. Potencia total concentrada en el foco, flujo máximo, flujo medio y diámetro del spot a 95% de la potencia, para diferentes distancias, en el caso de una ventana de 40 cm de diámetro.

Distancia (cm)	Potencia (W)	Flujo máximo (MW/m^2)	Flujo medio (MW/m^2)	D -95% (cm)
Sin	25565	9.82	3.90	8.90
0	17565	6.72	2.68	8.90
8	17348	6.50	2.90	8.50
10	17116	6.66	2.93	8.40
18	12859	5.56	2.31	8.20
22	9920	4.51	2.02	7.70
26	7701	3.62	1.61	7.60

Finalmente, para lograr que la radiación solar concentrada se distribuyera de forma más homogénea en la matriz cerámica, se decidió desplazarla esta, alejándola del foco 5 cm (Figura 2). Con esto se obtuvo un diámetro de spot de 15 cm a un 95 % de la potencia.

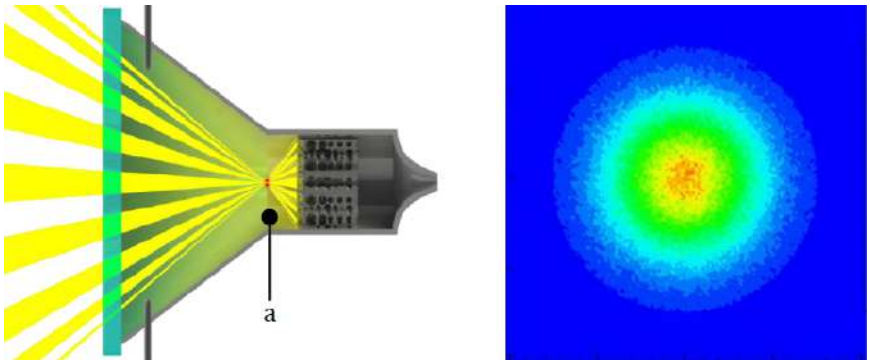


Figura 2. En la imagen de la izquierda se muestra el punto focal (a) y los 5 cm de desplazamiento de la matriz cerámica hacia delante del foco. Del lado derecho se muestra el resultado para la distribución de la radiación solar concentrada en la matriz cerámica a un 95% de la potencia del concentrador.

2.2. Optimización del peso del reactor mediante análisis térmico.

A partir de las dimensiones obtenidas del análisis anterior, se llevó a cabo un diseño preliminar del reactor. En dicho diseño, las dimensiones de los componentes fueron determinados básicamente por los diámetros de la ventana y del spot. Se consideraron materiales de las siguientes características:

a) Cono enfriado en acero inoxidable o cobre, porque ambos tienen una muy buena conductividad térmica, que permitirá fácilmente disipar el calor para evitar daños accidentales a los mismos.
b) Ventana de Pyrex® (vidrio borosilicato), ya que resiste temperaturas de hasta 600 °C y presenta una buena transmitancia en el espectro de radiación solar. Ventanas de cuarzo de tamaño similar son demasiado caras.
c) Brida de la ventana en cobre o acero inoxidable, por la buena conductividad térmica, para ser enfriada fácilmente.
d) Cerámica porosa de SiC, ZrO_2 o Al_2O_3, ya que todos resisten temperaturas de trabajo de 1600 K.
e) Cilindro de soporte de SiC, ZrO_2 o Al_2O_3 sin porosidad.
f) Aislante de fibras cerámicas o ladrillo refractario de Al_2O_3.
g) Carcasa del reactor en acero inoxidable.
h) Tubbing de entrada de gases en acero inoxidable.

La optimización partió de la reducción del peso total del reactor y con ello de los materiales que protegen y dan forma a la cámara de reacción. Del cálculo previo del peso de todos los componentes se encontró que el elemento más denso y que representaba el 60% del peso total del reactor era el material refractario (aislante). Para reducir el tamaño de éste, se llevó a cabo una simulación térmica mediante el software FLUENT, en la cual se calculó la distribución de temperaturas de los materiales en condiciones de operación. Del análisis se determinaron las zonas límite en que las temperaturas del aislante estarían en condiciones de operatividad y por tanto, podría prescindir de material refractario.

En la Figura 3 se ilustra la metodología utilizada: (a) El cálculo se realizó con la consideración de que el medio poroso mantendría una temperatura extrema de operación de 1600 °C durante 5 minutos. El material refractario seleccionado fue alúmina de alta pureza. Los fluidos de entrada y salida de argón se consideraron de tiro forzado a 0.15 m/s (1 atm ,20 °C) y 0.10 m/s (1 atm, 1200 °C) respectivamente. (b) De la simulación se obtuvo el mapa de distribución de temperaturas a distintas coordenadas x, y. (c) Con esto se redujo el volumen de aislante y por lo tanto su peso de 79 Kg a 34 Kg, representando cerca del 50 % del peso total del aislante (d) .Con las modificaciones las dimensiones de los demás componentes del reactor se redujeron costos de materiales y de fabricación.

2.3. Componentes del Reactor

Los componentes principales se muestran en la Figura 4. La parte externa del reactor la compone una carcasa de acero inoxidable en la cual se sujetan componentes externos del reactor como: Soportes, refrigerantes, bridas y por la parte interna aislantes térmicos. Otro componente es la ventana, la cual se diseñó para ser refrigerada mediante un intercambiador de calor, por el diseño, el sistema refrigerante no obstruye el paso de la radiación solar concentrada y genera las condiciones inertes dentro de la cámara de reacción.

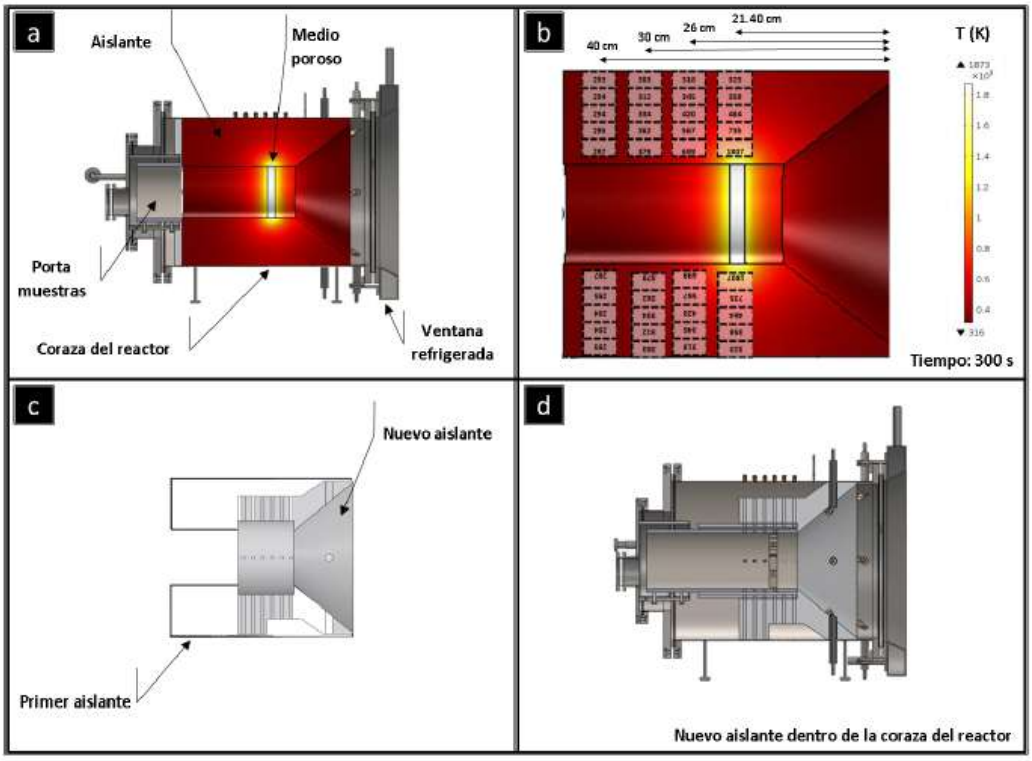


Figura 3. Ilustración del modelo térmico del reactor en FLUENT (a y b) y la teducción del volumen del material refractario que se planteó como resultado de la simulación con respecto al original (c y d).

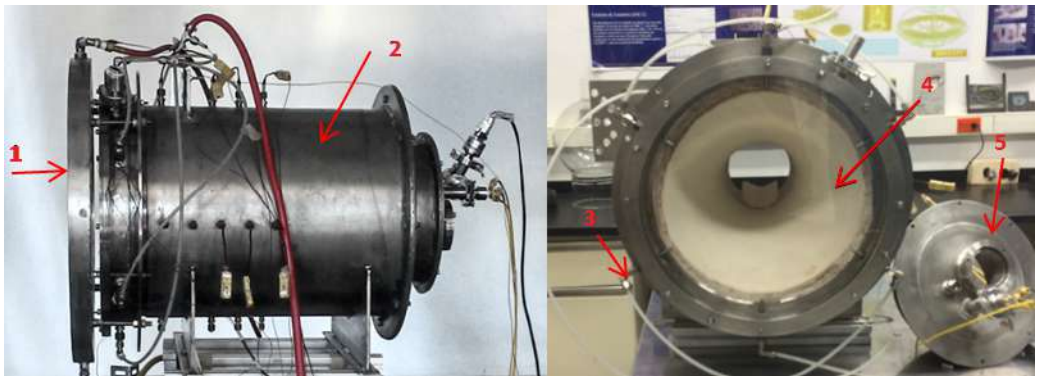


Figura 4. Izquierda, vista lateral del reactor, mostrando el escudo enfriado para la brida (1) y el cuerpo del reactor (2). Derecha, vista frontal del reactor, Inyectores de gas (3), cono cerámico (4), y brida de instrumentación y muestreo (5), que va en la parte posterior del equipo.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Como una primera evaluación del reactor, se llevó a cabo un estudio calorimétrico del mismo, que permite conocer su eficiencia térmica al funcionar como absorbedor de la radiación solar, en ausencia de reacción química. Para esto se insertó en el foco un material refractario (Al_2O_3) con porosidades geométricamente definidas de 7.5 cm de diámetro, pero sin recubrimiento de óxidos metálicos como reactivo.

Los principales parámetros usados para evaluar térmicamente el absorbedor volumétrico fueron la temperatura del fluido a la salida del absorbedor) y la eficiencia térmica (potencia entregada al reactor). La eficiencia térmica η_{th} es definida como el cociente del calor transferido hacia el fluido (Q_f), que en este caso fue aire difundido a través de los poros del material cerámico y la potencia incidente (Q_0).

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_f}{Q_0} \tag{3}$$

La potencia incidente Q_0 se calcula a partir de la irradiancia solar medida durante los experimentos (ver más abajo) y distribución de flujo obtenida experimentalmente para el horno solar (Pérez Enciso, 2015), considerando sólo aquella fracción que incide sobre la ventana, de acuerdo a los resultados de las simulaciones de trazo de rayos. Recordando que de la simulación se obtuvieron las dimensiones del reactor para 10 kW (Q_{0-t}) de potencia, para distribuir de forma más homogénea la radiación solar concentrada en la todo el medio poroso (zona de reacción), está se desplazó del foco 0.05 m, por lo que la distancia óptima del punto focal a la ventana fue de 0.23 m con un diámetro de ventana de 0.40m y un spot o zona de máxima concentración de 0.15 m de diámetro a un 95 % de la potencia del reactor. Es importante mencionar que para la primera prueba experimental se utilizó un medio poroso 50% más pequeño (figura 6) que el planteado en la simulación con SOLTRACE, por lo que la potencia teórica suministrada en el medio poroso con condiciones simuladas se redujeron por la mitad. Del mismo modo Q_0 se vio afectado por factores operacionales del horno solar (HoSIER) como: Suciedad en el heliostato, concentrador, la irradiancia solar directa promedio en el momento de la prueba (G_b), el porcentaje de apertura del atenuador (F_{at}) y el factor de horno (F_H). Este último es un factor operativo del HoSIER obtenido de forma experimental, que muestra la disminución de la potencia y la relación de concentración solar del HoSIER. En este trabajo se consideró un F_H= 0.56, reportado por (Pérez Enciso, 2015). Para el caso del calor transferido (Q_f) hacia el fluido el valor se obtuvo de las temperaturas del aire a la entrada y salida, así como con el flujo másico. Simplificando al aire como un gas ideal y tomando el calor específico promedio se tiene

$$Q_f = \dot{m} C_p \, (T_s - T_e) \tag{4}$$

Por otro lado, para ela potencia incidente

$$Q_0 = F_H \, \frac{G_b}{1000} \, \frac{F_{at}}{100} \, Q_{0-t} \tag{5}$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico del aire, C_p su calor específico y T_s, T_e son sus temperaturas de salida y de entrada, respectivamente.

Durante la experimentación se realizaron mediciones de temperatura en diferentes zonas del reactor solar, siendo las más importantes las mostradas en la figura 5: Las temperaturas de entrada y salida del aire y dos temperaturas en el medio poroso; una de ellas en la periferia del medio poroso y otra por la parte central posterior del medio (Figura 6). Las temperaturas se midieron mediante termopares tipo K con protección de fibra de vidrio, y usando un sistema de adquisición de datos modelo 34970A, de la marca Agilent. Es importante señalar que la temperatura de entrada del aire corresponde también a la temperatura ambiente, ya que el aire fue succionado de la periferia de la zona de experimentación he inmediatamente inyectado por las entradas de gases. El caudal de aire se midió utilizando un rotámetro no digital colocado entre la salida del compresor de aire y las entradas de los seis inyectores de gases del reactor. Por otro lado, la radiación solar directa se midió utilizando un pirheliómetro marca Eppley, mdelo NIP, que cuenta con su mecanismo de seguimiento solar.

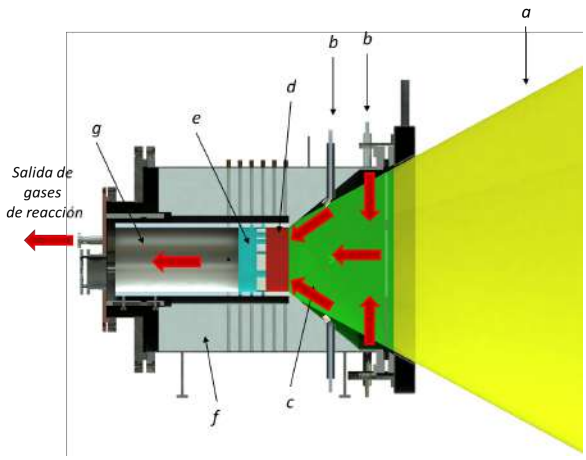


Figura 5. Se muestra el esquema simplificado del flujo de gases dentro del reactor y sus principales componentes. Radiación solar proveniente del Horno solar (HoSIER) [a]. Entrada de gases de reacción [b]. Radiación proveniente del HoSIER después de pasar la ventana [c, verde]. Punto focal del HoSIER dentro del reactor [d]. Medio poroso [e]. Aislante cerámico con forma de cavidad (los tubos paralelos que se observan en la imagen son los conductos para instrumentación) [f]. Conducto de salida de gases de reacción [g].

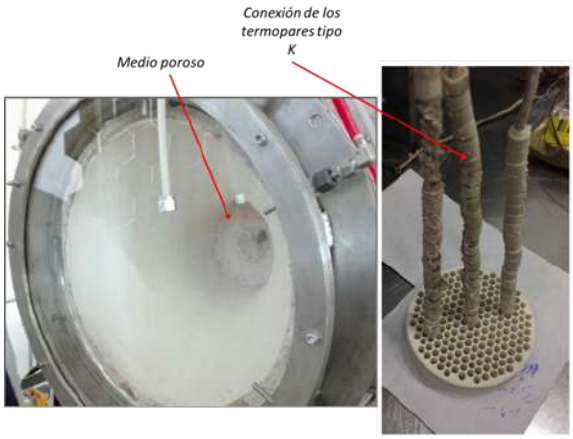


Figura 6. En la imagen de la izquierda se observa el medio poroso de 7.5 cm de diámetro dentro de la cavidad del reactor. Del lado derecho se pueden ver los termopares tipo K instalados en la cara posterior del medio poroso (uno de los termopares se desconecto durante la experimentación por lo que solo se censaron dos).

La Figura 7 muestra los datos medidos durante la experimentación y la Tabla 2 los resultados que se obtuvieron a partir del procesamiento de estos datos. La experimentación tuvo una duración de 20 minutos, durante el día 3 de abril del 2016, comenzando a las 14:19 Hr.

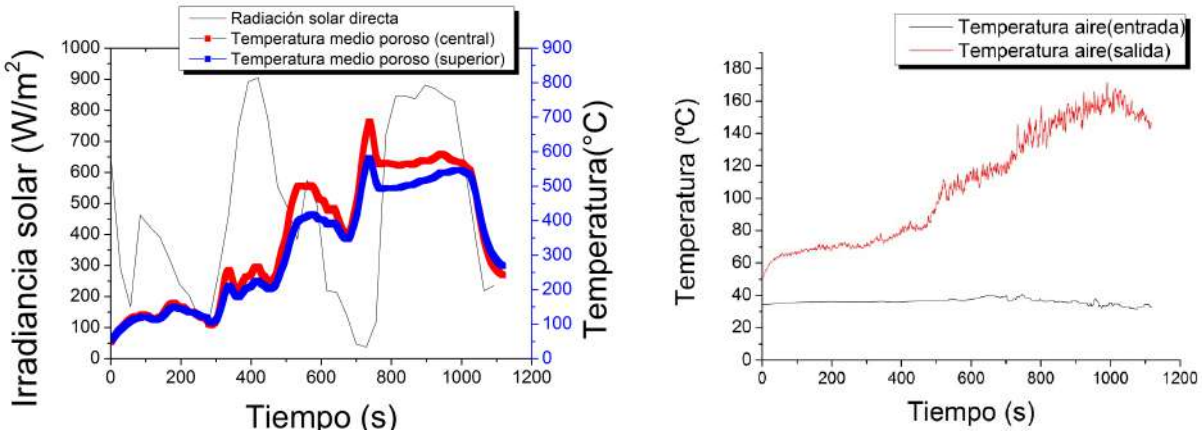


Figura 7. Temperaturas superior y central del medio poroso y radiación solar en función del tiempo (izquierda); temperaturas de entrada y salida del aire en función del tiempo (derecha).

Tabla 2. Parámetros que se usaron y obtuvieron en las pruebas del reactor.

Parámetro	Valor
$\dot{m}$	66.67 L/min (0.001293 kg/s)
C_P	1.012 kJ/kg K
G_b	800 W/m²
Q_{0-t}	10 kW
F_{at}	35%
F_H	0.56
T_e	304.15 K
T_s	433.15 K
Q_f	0.169 kW
Q_0	1.568 kW
η_{th}	0.11

En la Fig. 7 se puede apreciar que en la mayor parte del tiempo la irradiación solar tuvo un comportamiento muy variable, esto dificultó mucho tener resultados estables. Desafortunadamente los días de experimentación para esta campaña preliminar coincidieron con la

temporada de lluvias en Morelos, con presencia de nubes, lo cual no permitió tener mejores condiciones. Sin embargo se repetirá próximamente la campaña para obtener datos más estables.

Como se puede observar, a pesar de las variaciones, el comportamiento promedio de la radiación solar fue con tendencia creciente, lo cual se manifiesta en un incremento sostenido de la temperatura de salida del aire durante todo el experimento. Esto se vio reforzado por la inercia térmica del medio poroso, que a pesar de la disminución de la irradiancia en el intervalo entre los 500 y 750 s de operación, nunca se enfrío del todo. La región más estable de operación fue para los tiempos entre 800 a 1100 s, durante los cuales la irradiancia solar se mantuvo razonablemente constante. Este intervalo se consideró cuasiestacionario para el medio poroso y fue el utilizado para evaluar la eficiencia térmica. Sin embargo hay que notar que no es un verdadero estado estacionario por que el resto de las componentes del reactor tienen una inercia térmica mucho mayor que el medio poroso. Es importante notar que las temperaturas en los dos puntos medidos del medio poroso se emparejan rápidamente, en alrededor de 3 minutos, cada vez que cambia la irradiancia solar. Esto es alentador en cuanto a la operación futura del reactor, dado que al tratarse de un medio cerámico es un tiempo relativamente rápido. Sin embargo, esto también indica que el período considerado para la evaluación de la eficiencia tampoco es verdaderamente un estado estacionario para el medio poroso.

La eficiencia obtenida de la evaluación es baja (11%), particularmente considerando que todavía se está operando a temperaturas relativamente bajas (el atenuador del horno sólo se abrió hasta 35 %). Sin embargo, esto no se puede para nada considerar un resultado concluyente, ya que al no haberse alcanzado todavía el equilibrio térmico en el aislate, tenemos una importante transferencia de calor hacia él. Esto se traduce en una aparente pérdida por parte del medio poroso hacia los alrededores, mismas que una vez alcanzado el verdadero estado estacionario no aparecerán. Por otro lado, es necesario hacer mediciones en varios otros puntos del reactor para tener una imagen más detallada de cómo se está dando la transferencia de calor.

4. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño de un reactor solar térmico de cavidad estacionaria con una potencia máxima de 10 kW. Mediante el trazado de rayos se obtuvieron las dimensiones óptimas de la cámara de reacción considerando la distribución de la radiación solar concentrada (spot) sobre la cerámica porosa a un 95 % de la potencia. La estructura del concentrador se diseñó con componentes de fácil construcción y operación. De la simulación, se obtuvieron las dimensiones del reactor para 10 kW de potencia, que son una ventana de 40 cm de diámetro, ubicada a 23 cm por detrás del foco. Para obtener mayor uniformidad de flujo radiativo sobre el medio poroso, este se ubicó a 5 cm por delante del foco, con lo cual se obtuvo un diámetro de mancha concentrada de 15 cm respectivamente, a un 95 % de la potencia incidente sobre la ventana. Las simulaciones térmicas permitieron tomar decisiones para disminuir significativamente el peso de los aislantes y otros componentes hasta 45 kg.

El diseño obtenido permite emplear diferentes condiciones de operación así como diferentes materiales cerámicos y eventualmente ser aplicado a una variedad de reacciones químicas de interés. Por el momento sólo se ha podido llevar a cabo pruebas térmicas preliminares del reactor en el Horno Solar del IER. En ellas se obtuvo una eficiencia térmica preliminar del 11 % para el reactor en estado transitorio, la cual deberá ser verificada con posterioridad en experimentos más prolongados bajo condiciones de irradiancia solar más favorables y con las dimensiones del medio poroso utilizadas en la simulación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por parte del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), a través del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), en el marco de la Convocatoria 2013-02, del Fondo SECTORIAL CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, dentro del Proyecto Estratégico No. 10, con título: “COMBUSTIBLES SOLARES Y PROCESOS INDUSTRIALES”, por medio del cual fue posible desarrollar la investigación y apoyar la formación de recursos humanos a nivel posgrado. Carlos Ernesto Arreola Ramos y Juan Omar del Valle Barrera agradecen el apoyo de CONACYT a través de becas de posgrado. Los autores agradecen al Dr. Ricardo A. Pérez Enciso por su implementación del HoSIER en el software Soltrace, utilizada en las simulaciones presentadas en este trabajo. También se agradece al Dr. Carlos A. Pérez Rábago y al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar por apoyo técnico prestado para el desarrollo de este trabajo.

6. REFERENCIAS

Abanades S., Charvin P., Flamant G., Neveu P. (2006). Screening of water-splitting thermochemical cycles potentially attractive for hydrogen production by concentrated solar energy. Energy Vol. 31, pp. 2469–2486.

Abanades S., Flamant G. (2006). Thermochemical hydrogen production from a two-step solar-driven water-splitting cycle based on cerium oxides. Solar Energy Vol. 80, pp.1611–23.

Agrafiotis C.C., Mavroidis I., Konstandopoulos A.G., Hoffschmidt B., Stobbe P., Romero M. (2007). Evaluation of porous silicon carbide monolithic honey combs as volumetric receivers/collectors of concentrated solar radiation. SolEnergy Mater Sol Cells 2007, Vol. 91, pp. 474–88.

Becker M., Fend T., Hoffschmidt B., Pitz-Paal R., Reutter O., Stamatov V., Steven M., Trimis D. (2006) . Theoretical and numerical investigation of flow stability in porous materials applied as volumetric solar receivers. Solar Energy Vol. 80, p.1241–1248.

Chambon M., Abanades S., Flamant G. (2011).Thermal dissociation of compressed ZnO and SnO_2 powders in a moving-front solar thermochemical reactor. AIChE Journal Vol. 57, pp. 2264–2273.

Chueh W.C., Falter C., Abbott M., Scipio D., Furler P., Haile S.M., Steinfeld A. (2010). High-flux solar-driven thermochemical dissociation of CO_2 and H_2O using nonstoichiometric ceria. Science Vol. 330, pp. 1797-1801.

Gallardo Pérez, L. (2013). Diseño de un Sistema Óptico para el Estudio Experimental de la Forma Solar en Temixco, México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería, UNAM.

Gomez-Garcia F., González-Aguilar J., Olalde G., Romero M. (2016). Thermal and hydrodynamic behavior of ceramic volumetric absorbers for central receiver solar power plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 57, pp. 648–658.

Kodama T., Gokon N. (2007). Thermochemical cycles for high-temperature solar hydrogen production. Chemical Review Vol. 107, pp. 4048–4077.

Martinek J., Viger R., Weimer A.W. (2014). Transient simulation of a tubular packed bed solar receiver for hydrogen generation via metal oxide thermochemical cycles. Vol. 105, pp. 613–631.

Ngoh S.K., Njomob D. (2012). An overview of hydrogen gas production from solar energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 16, pp. 6782- 6792.

Pérez Enciso R. (2015). Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Riveros-Rosas D., Herrera-Vázquez J., Pérez-Rábago C. A., Arancibia-Bulnes C. A., Vázquez-Montiel S., Sánchez-González M., Granados-Agustín F., Jaramillo O. A., Estrada C. A. (2010). Optical Design of a High Radiative Flux Solar Furnace for Mexico. Solar Energy Vol. 84, pp. 792–800.

Riveros-Rosas, D., C.A. Arancibia-Bulnes, C. Pérez-Rábago, C.A. Estrada (2011). Concentration images profiles of the high-flux solar furnace of CIE-UNAM in Temixco, Mexico. First Stage. Proceedings of the 17th SolarPACES Conference, Granada Spain, 2011 paper 40660.

Steinfeld A. (2005). Solar thermochemical production of hydrogen—A review. Solar Energy Vol. 78, pp. 603–615.

Venstrom L.J., De Smith R.M., Hao Y., Haile S.M. (2014). Efficient splitting of CO_2 in an isothermal redox cycle based on ceria. Energy & Fuels Vol. 28, pp. 2732–2742.

Villafán-Vidales H.I., Arancibia-Bulnes C. A., Dehesa-Carrasco U., Romero-Paredes H. (2009). Monte Carlo radiative transfer simulation of a cavity solar reactor for the reduction of cerium oxide. International Journal of Hydrogen Energy Vol. 34, pp. 115-124.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE OPERACIÓN DE UNA ESTUFA SOLAR PARABÓLICA PARA OPERAR EN PEREIRA, COLOMBIA

Nathaly Daza Ramírez, Ángela M. Jaramillo Granada y Beatriz Cruz Muñoz
Departamento de Física, Universidad Tecnológica de Pereira,Vereda La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia
Tel. (+57) 63137147, natydazar@gmail.com, amjaramillo@utp.edu.co, bcruz@utp.edu.co

Rubén Dorantes Rodríguez
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, México, D.F. CP 02200, México.
Tel. 01(55) 53189539, rjdrodriguez@live.com.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el proceso de construcción de una estufa solar parabólica para uso doméstico, tanto en el medio rural como urbano en el Departamento de Risaralda, Colombia. Esta estufa solar tiene la ventaja de alcanzar temperaturas de cocción en poco tiempo, dadas las condiciones climáticas del entorno, donde se dispone de irradiación solar directa con una mayor intensidad entre las 10 a.m y la 1 p.m. De esta manera, se construyó una estufa solar con un diámetro de 1.28 m para un ángulo de apertura de 90°, un factor de concentración de 3 soles y una capacidad volumétrica de 3 litros de la olla de acero con acabado negro mate, la cual se usó como receptor. El plato parabólico se fabricó con 28 secciones triangulares de lámina galvanizada y se utilizó una película reflectante autoadhesiva elaborada de PET multilayeraluminizingsticker (tereftalato de polietileno multicapas aluminizado autoadhesivo), con un factor de reflexión de 95%. Se hicieron dos pruebas experimentales donde se llenó la olla con 3 litros de agua y también con dos litros de aceite comestible, se registraron las temperaturas alcanzadas cada 5 minutos mediante un termómetro de cocina TP101 y una cámara termográfica Fluke Ti300, esta última además de tomar el valor de temperatura de la olla, permitió conocer su distribución de temperatura. Los resultados mostraron, luego de 9 días de exposición, que el agua alcanzó su temperatura de ebullición en tiempos que van desde los 80 minutos, y en aceite se observaron temperaturas hasta de 168°C en tres horas de exposición. Así mismo se muestra la comparación entre el modelo matemático que describe el comportamiento térmico de la estufa solar parabólica, dadas sus características y dimensiones y los valores registrados.

ABSTRACT

In this work the process of construction a parabolic solar cooker for home use, both in rural and urban in the Department of Risaralda, Colombia is presented. This solar heater has the advantage of reaching cooking temperatures in a short time, given the climatic conditions of the environment where it is available direct sunlight with greater intensity between 10 am and 1 pm. In this way, a solar stove was built with a diameter of 1.28 m for an opening angle of 90°, a concentration factor of 3 suns and a volumetric capacity of 3 liters of steel pot with black matte finish, which was used as a receiver. The parabolic dish was made with 28 triangular sections of galvanized sheet and an adhesive reflective film made of PET multilayer aluminizings ticker (aluminized polyethylene terephthalate multilayer adhesive), with a reflection factor of 95% was used. Two experimental tests where the pot with 3 liters of water and two liters of edible oil filled were made, the temperatures reached every 5 minutes using a cooking thermometer TP101 and a thermal imaging camera Fluke Ti300 were recorded, the latter also taking the temperature value of the pot, allowed to know the temperature distribution. The results showed, after 9 different days of exposure, the water reached its boiling point in time ranging from 80 minutes, and oil temperatures were observed up to 168°C in three hours of exposure. Also it is shown the comparison between the mathematical model describing the thermal behavior of the parabolic solar cooker, given its characteristics and dimensions and the recorded values.

Palabras claves: Estufa solar parabólica, energías renovables, construcción, diseño.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de leña y combustibles sólidos (24,6% en Colombia [1]) no solo resulta perjudicial para el medio ambiente sino que la incidencia de humo afecta potencialmente la salud de quienes interactúan con él. Actividades como la de cocinar con leña, incrementan el riesgo de padecer afecciones como Enfermedad Pulmonar Obstructiva (EPO), cáncer de pulmón, intoxicación por monóxido de carbono (en lugares cerrados), Infección Respiratoria Aguda (IRA), entre otras afecciones respiratorias y oculares. Además la exposición a los gases expulsados por la biomasa, se le ha asociado el bajo peso al nacer, la mortalidad infantil, anemia y el retardo mental de la niñez debido a la contaminación intradomiciliaria y teniendo en cuenta que los mismos generan costos hospitalarios el uso de dichos elementos no solo afecta la salud sino además la economía del país [2].En la zona urbana es más común encontrar el uso del gas y/o electricidad como fuente de calor para la cocción de alimentos, los cuales generan gastos mensuales que pueden ser significativos para familias de escasos recursos o inclusive algunos habitantes de la zona rural ni tienen acceso a este tipo de servicios.

Evidenciado el anterior panorama, y aprovechando los recursos naturales existentes, por ejemplo la energía solar, que mitiguen los efectos de emplear combustibles fósiles y madera, las cocinas solares significan una alternativa pertinente a regiones que presenten una incidencia de radiación solar directa, es decir, es más eficiente en zonas calurosas, donde la implementación de estos dispositivos ofrecen ventajas económicas, debido a que no necesitan el suministro de elementos de combustión ni de electricidad para su funcionamiento. De igual modo son amigables con el medio ambiente ya que no producen gases de efecto invernadero; también son seguras, ya que en estas no hay peligro de incendios, escapes e intoxicación [3].

2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTUFA SOLAR PARABÓLICA

Dimensiones de la estufa solar

Se construyó un prototipo de una estufa solar parabólica para la cocción de alimentos, con base en un modelo de cálculo óptico, térmico y mecánico presentado anteriormente [3, 6], con las dimensiones descritas en la tabla 1, y se decidió fabricar la geometría parabólica a partir de la unión de secciones triangulares, como se muestra en la figura 2.

Tabla 1. Dimensiones y características de la estufa solar parabólica

Factor de concentración [Soles] y ángulo de apertura	*Potencia [W] y capacidad [L]*	*Diámetro[m] y altura del foco [m]*	*Área de apertura [m^2] y altura [m]*
3/90°	382,74/3,0	1,28/0,32	2,57/0,32

Considerando el valor del diámetro se calculó el perímetro del área de apertura, obteniendo 4,021 metros, un tamaño que se calificó como adecuado para el ancho de las secciones es aproximadamente 0.14 m (ancho deseado). Finalmente el número de secciones se determinó a partir de la relación entre el perímetro del área de apertura y el ancho deseado, dando como resultado 28 secciones triangulares. Para calcular el largo de cada pieza se consideró la altura de la estufa, calculada a partir de una integral de longitud para una curva parabólica, obteniendo una longitud de 0,7346 m. Con la ecuación de la parábola en dos dimensiones en coordenadas cartesianas, se eligieron las alturas para ubicar tres aros que darían forma al paraboloide (número que se estimó apropiado en términos de efectividad, practicidad, costos y peso). Para cada altura de los aros se calculó el diámetro correspondiente, cifras que se utilizaron para calcular la distancia desde la punta de cada sección al punto donde se ubica cada aro que sujeta la pieza triangular (figura 1).

Se optó por usar una película reflectante y adherirla a una lámina galvanizada calibre 30, la cual fue elegida debido a su flexibilidad y a su alta resistencia a la corrosión, además de su fácil obtención y bajo costo. Luego se cortaron las 28 piezas de lámina galvanizada, igualmente se curvaron 3 varillas de aluminio de 5/16", consiguiendo tres aros de 0,61 m, 0,44 m y 0,31 m de radio interno (figura 2). Para hacer portable la estufa solar se decidió cortar en cuatro secciones los primeros 2 aros y el último (aro de 0,31 m) en 2 secciones uniéndolos con niples galvanizados de 1/4 x 2", donde un extremo de cada niple se fijó con pegamento a cada sección de aro de manera que quedara unido permanentemente. Y el otro extremo de cada niple y de cada sección de aro se perforaron con el fin de que al momento de armar nuevamente los aros, sus secciones se acoplaran con un tornillo de 5 mm a través de la perforación antes dicha.

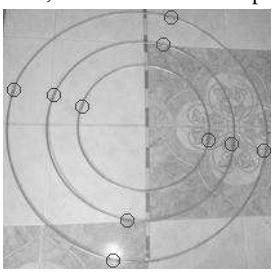


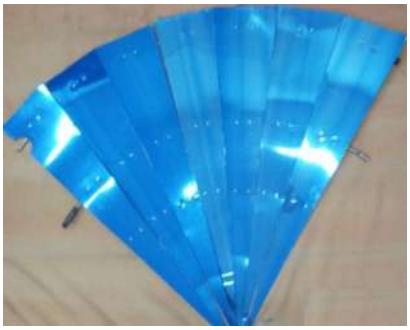
Figura 1. Aros de aluminio que soportan el paraboloide en revolución donde las circunferencias indican el punto de corte de cada uno.

Figura 2. Piezas triangulares de lámina galvanizada de 0,14 m de ancho superior y 0,735 m de longitud.

Los aros ubicados a las alturas adecuadas se unieron a las piezas de lámina galvanizada a través de argollas, las cuales se fijaron a las piezas mencionadas con remaches; entre lámina y lámina se pegaron dos bisagras de 1 pulgada a diferentes alturas. Por practicidad al momento de armar la estufa y a su vez reducir los espacios entre lámina y lámina, se unieron 4 grupos de 3 láminas y 4 grupos de 4 láminas cada uno con 2 bisagras de 1 pulgada entre lámina y lámina, las cuales se lijaron, se limpiaron con thinner y se adhirieron con soldadura epóxica Pegadit. A cada lámina se le pegó una película reflectante autoadhesiva elaborada de PET multilayeraluminizingsticker, tal como lo ilustra la figura 3, en la cual se observan 7 láminas, un grupo de 3 y otro de 4 unidas con las bisagras anteriormente mencionadas.

Al momento de calcular el área focal y el tamaño de la parrilla de la olla, fue necesario realizar la técnica experimental de trazado de rayos, la cual consiste en hacer incidir un haz de luz en la superficie a analizar, para finalmente ver la distribución de los rayos incidentes en él. Para aplicar la técnica mencionada se usó un rayo láser, para esto se construyó un modelo en cartón paja y se adhirieron los aros de aluminio. Se colocó un espejo en la superficie del concentrador apuntándolo con el láser en la dirección paralela al eje vertical del paraboloide y se repitió este procedimiento para diversas posiciones del espejo en el paraboloide y se registró cada punto del reflejo en un aluminio, se colocó un espejo en la superficie del concentrador apuntándolo con el láser en la dirección paralela al eje vertical del paraboloide y se repitió este procedimiento para diversas posiciones del espejo en el paraboloide y se registró cada punto del reflejo en un papel ubicado en el área focal. Así, se pudo observar una mayor concentración en un área de 0,0028 m^2. Con esta información se realizó

la construcción de la parrilla. Finalmente, se fabricó la estructura teniendo en cuenta tanto el peso de la estufa y la olla, como que fuera resistente a temperaturas superiores a 100°C, por lo que se empleó tubo cuadrado de ¾ de pulgada de acero pulido. Adicionalmente, se diseñó un mecanismo de giro manual que permitiera reorientar la estufa solar para que los rayos solares directos incidieran en el foco. Luego de ensamblar todas las piezas del paraboloide, se fijó a la estructura construida en tubo cuadrado. En la figura 4 se observa la apariencia final de la estufa solar con la olla situada en el foco del paraboloide.



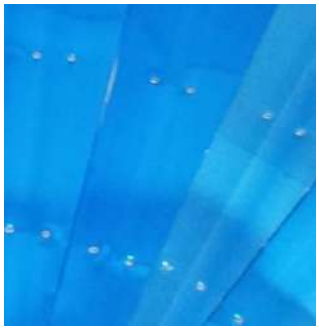


Figura 3. Láminas galvanizadas con la película reflectante y los remaches.

Figura 4. Apariencia final de la estufa solar parabólica construida.

3. EVALUACIÓN TERMICA DE LA ESTUFA SOLAR

La evaluación térmica se llevó a cabo con el procedimiento que se describe a continuación, el cual tenía como finalidad la comparación del funcionamiento teórico de la estufa, de acuerdo con el modelo matemático desarrollado y con el desempeño experimental llevado a cabo en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). En el procedimiento se utilizaron los instrumentos de medición que se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Instrumentos de medida utilizados en el proceso de evaluación.

Instrumento	***Exactitud***	***Rango***
Cámara termográfica Fluke Ti300	±2°C	-20°C a 650°C
Termohigrómetro HTC-303A	±1°C	-50°C a 70°C
Termómetro digital de cocina TP101	±1°C	-50°C a 300°C

Una vez se identificaron los instrumentos de trabajo se realizaron las pruebas del funcionamiento de la estufa mediante los siguientes pasos:

1. Toma de condiciones ambientales, datos que fueron proporcionados por la Estación Hidroclimatológica de la UTP.
2. Se ubicó la estufa en un lugar donde quedase expuesta totalmente al sol. Se llenó la olla con agua, se tapó y se colocó en la parrilla de la estufa a las 10:00 a.m. Se insertó en el orificio de la tapa de la olla un termómetro digital para cocina TP101 y se ubicó una cámara infrarroja Fluke Ti300 al frente de la estufa para obtener imágenes térmicas de la distribución de calor en la estufa solar y de la temperatura de la olla. Se midió la temperatura ambiente con un termohigrómetro HTC-303A.
3. Se procedió a tomar valores de temperatura e imágenes por termografía infrarroja cada cinco minutos y durante todo el proceso, se estuvo al pendiente del momento en el que el agua hirvió y se apuntó la hora exacta en que ocurrió el evento.
4. Este experimento se repitió 9 veces para el agua y 1 vez para el aceite de oliva, en diferentes días, con el fin de evaluar el funcionamiento de la estufa en diferentes condiciones
5. Con los datos obtenidos de temperatura de la olla, del fluido y de las condiciones ambientales se realizó la simulación correspondiente a los días y horas de evaluación.
6. Luego de tabular los datos (arrojados por el termómetro y las imágenes) y realizar la simulación, se realizó la comparación entre el comportamiento teórico de la estufa (obtenido de la simulación) y la experimental (obtenido de la evaluación) para evaluar el funcionamiento de la misma. Los resultados se presentan mediante gráficos e imágenes que muestran la irradiación solar, la temperatura experimental (olla y fluido) y la temperatura obtenida por el modelo matemático, así como el error relativo porcentual. Además se realizó un diagrama de barras en el cual se muestra la cantidad de energía ganada, disipada y útil por el sistema durante el tiempo de exposición.

CÁLCULO DE LA EMISIVIDAD DE LA OLLA

Se utilizó la cámara termográfica Fluke Ti300 para obtener la temperatura e imágenes termográficas de la olla. Sin embargo, para obtener un valor correcto de temperatura es necesario conocer la emisividad de la olla, lo cual es un dato que requiere la cámara. Para calcular la emisividad de la olla se siguió este procedimiento[5]:

1. Se adhirió una tira de cinta negra aislante de aproximadamente 15 cm a la olla.
2. Se calentó agua alrededor de 60 °C y se esperó a que la cinta y la olla lograran el equilibrio térmico.
3. Se ingresó al aparato la temperatura ambiente (T=24,6 °C) y la emisividad de la cinta (0,95).

4. Se apuntó con el cursor a la olla, y se procedió rápidamente a cambiar la emisividad en la cámara hasta llegar al mismo valor de temperatura obtenido en el paso anterior.
5. Se registró el valor de la emisividad correspondiente a la temperatura adquirida y se repitió por ocho veces.
6. Con este procedimiento, el valor experimental promedio de la emisividad fue de 0,91.

3. RESULTADOS

Para la evaluación del comportamiento térmico se realizaron nueve pruebas con 3L de agua, exponiendo la estufa a la radiación solar desde las 10 a.m., hasta el momento en que el agua alcanzó su punto de ebullición. La figura 5a presenta el comportamiento de la estufa, donde se comparan los resultados de la temperatura experimental y la temperatura de la simulación. Se evidenció que la temperatura experimental (temperatura de la olla y del agua) sigue la tendencia del modelo matemático con valores similares, y así mismo, se observa que las caídas bruscas en la curva de irradiación solar generan cambios más lentos en las temperaturas medidas debido a la inercia térmica del conjunto olla-agua, generando un aumento en el error relativo (figura 5b). Se nota que la temperatura teórica al alcanzar el punto de ebullición del agua continúa creciendo mientras que las temperaturas experimentales permanecen alrededor de 95°C, puesto que el agua empieza a evaporarse y toda la energía se transforma en calor latente de evaporación. Sin embargo se prefirió dejar que la temperatura calculada siguiera evolucionando para considerar el uso de otros fluidos como el aceite, cuya temperatura de ebullición normal es más alta que la del agua. En la figura 5c se puede notar que la energía de entrada a las paredes de la olla (Q solar) es mucho mayor a las pérdidas totales, que son pérdidas por convección (Pérd. Conv) + Pérdidas por emisión (Pérd. emi.), obteniendo una energía útil transferida al conjunto olla-agua (Q. útil) durante todo el tiempo de exposición de 7,94 MJ, lo cual demuestra un buen desempeño de la estufa solar. Se evidencia además que las pérdidas más significativas son las pérdidas por emisión.

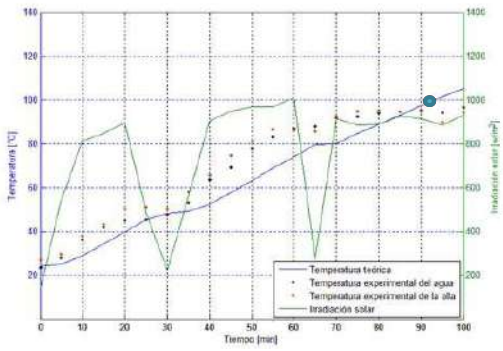


Fig. 5a). Comportamiento de la estufa solar durante 100 minutos de exposición el día 9 de enero de 2016

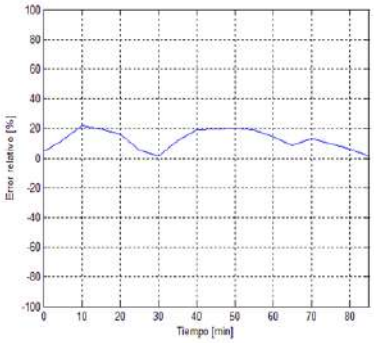


Fig. 5b). Error relativo de los datos experimentales y el modelo matemático.

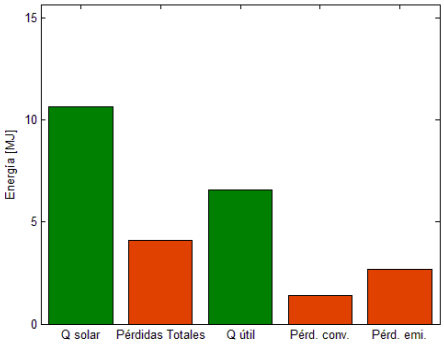


Figura 5c). Energía recibida por la estufa solar durante el tiempo de exposición el día 9 de enero de 2016.

En la figura 6 se puede observar gráficamente, por medio de termografía, el aumento y distribución de la temperatura en la olla y la parrilla. Las zonas más calientes se observan con un color más rojo o blanco, pero las zonas con menor temperatura se observan en tonos en la gama del azul; y esta diferencia de temperaturas, es decir su no uniformidad, se debe a que posiblemente no está llegando a la estufa la componente totalmente directa del sol, debido a la orientación de la estufa y/o a los defectos de construcción. Además se puede observar la temperatura elevada de la olla por encima del fondo, que corresponde a las láminas reflectantes.

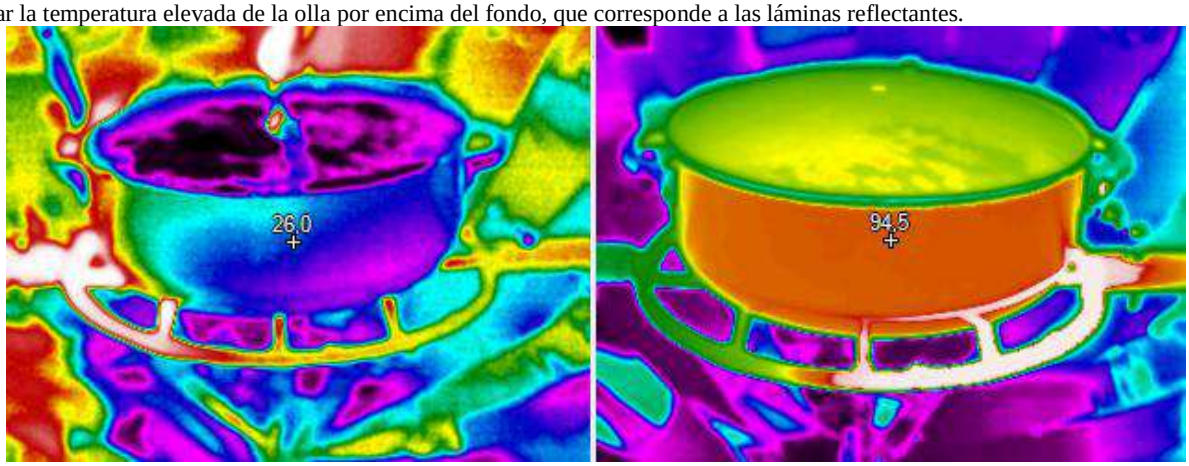


Figura 6. Imágenes térmicas infrarrojas tomadas al inicio y final de la prueba del día 9 de enero de 2016.

En la figura 7a se nota un comportamiento creciente de la temperatura del sistema para el día 28 de enero, de igual manera que la figura 5a, pero teniendo los valores de la temperatura teórica por encima de los experimentales, diferencia causada posiblemente por la velocidad del viento que pudo ser superior a 5 Km/h, sin embargo la estación hidroclimatológica de la UTP no registró tal variable, por lo

cual esta perdida con esta velocidad no se tuvo en cuenta en la simulación, generando el error relativo registrado en la figura 7b. También es de recordar que los datos de irradiación utilizados son globales y no de irradiación directa, que es la que incide y se refleja en el paraboloide, por lo que de contar con datos de irradiación directa, seguramente aseguraría un acercamiento entre las dos curvas.

Igual que la figura 5c, en la figura 7c se observa que la energía de entrada (Q solar) y el calor útil (Qútil) es mayor a las pérdidas totales, con lo que se garantiza que el conjunto olla-agua aumenta su temperatura por encima de la temperatura ambiente.

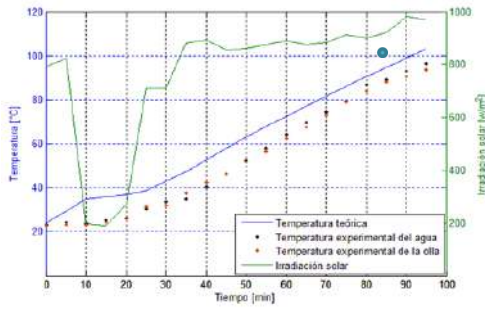


Fig. 7a) Comportamiento de la estufa solar durante 95 minutos de exposición el día 28 de enero de 2016.

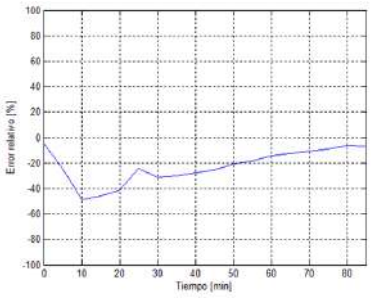


Fig. 7b) Error relativo de los datos experimentales y el modelo matemático.

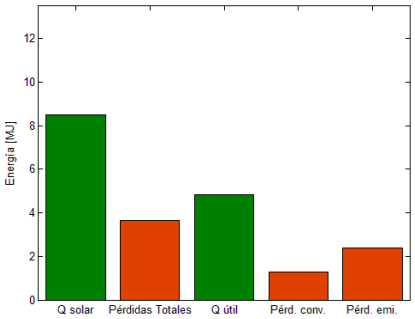


Fig. 7c) Energía recibida por la estufa solar durante el tiempo de exposición el día 28 de enero de 2016.

En la figura 8 se aprecia la diferencia de temperatura al inicio y al final de la prueba, dónde el sol se está reflejando más que todo en el lado derecho de la estufa solar (figura 8 a la derecha).

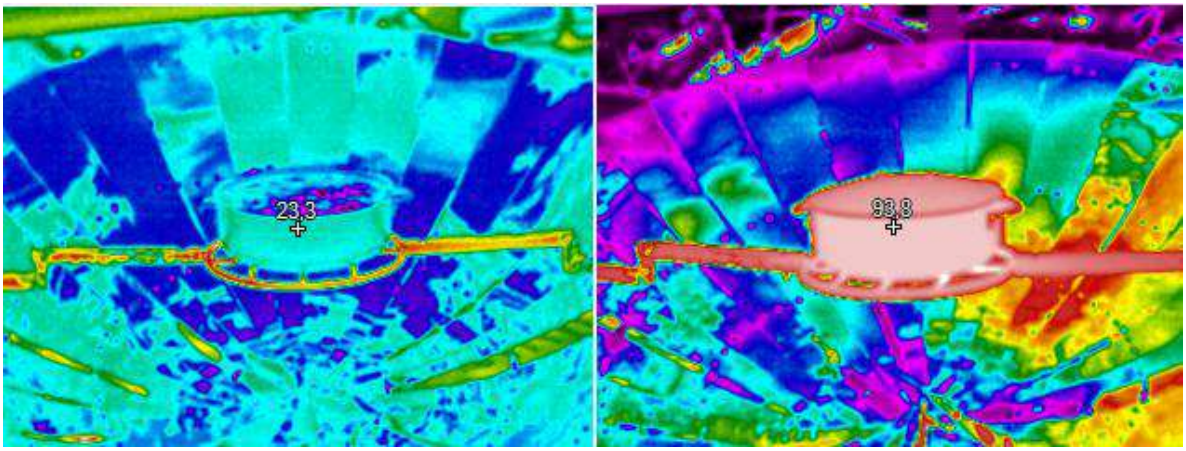


Figura 8. Imágenes térmicas infrarrojas tomadas al inicio y final de la prueba el día 28 de enero de 2016.

A pesar que el comportamiento térmico de la estufa solar y el predicho por el modelo teórico no fue idéntico, ambos resultados conservan la misma tendencia. Esta diferencia, como se mencionó antes, puede deberse a la velocidad del viento que produce pérdidas por convección, y a otros factores que no se consideraron en el modelo matemático, como las perdidas por evaporación y como ya se indicó, al uso de datos de irradiación global en lugar de irradiación directa.

Debido a que las anteriores pruebas limitaban la estufa a la temperatura de ebullición del agua, ya que esta solo alcanza su máximo valor alrededor de 96°C, se optó por realizar la prueba con un fluido que tuviese una temperatura de ebullición más alta, para lo cual se eligió aceite de oliva, cuyo punto de ebullición corresponde a 225°C. Con aceite de oliva se realizó una prueba de calentamiento, utilizando 2 litros del mismo desde las 10:00 a. m. hasta la 1:00 p. m., siguiendo un procedimiento similar al del agua, para lo cual se obtuvieron los resultados reportados en la figura 9.

En esta figura se puede observar que el aceite alcanzó una temperatura máxima de 168°C, sin embargo el modelo matemático registró temperaturas más altas (180°C), ya que después de 80 minutos la nubosidad aumentó lo que generó un impacto negativo en la temperatura. No obstante, el comportamiento de la estufa solar al inicio de la prueba fue similar y superior al modelo teórico (figura 9a) como 9b)). En la figura 9c), se puede notar que aunque las pérdidas son elevadas, aún son inferiores que las ganancias, sin embargo, aunque la energía útil fue baja, el comportamiento real de la estufa fue satisfactorio.

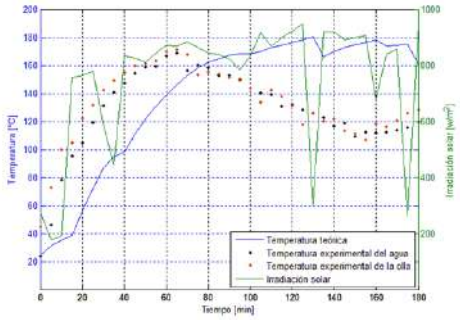


Fig. 9a) Comportamiento de la estufa solar durante 180 minutos de exposición el día 13 de enero de 2016, utilizando aceite de oliva.

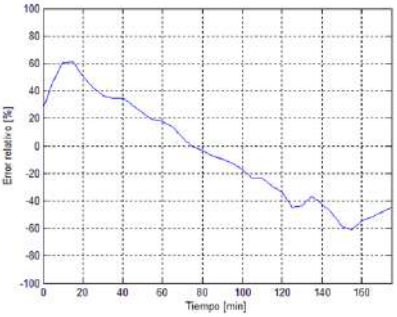


Fig. 9b) Error relativo de los datos experimentales y el modelo matemático.

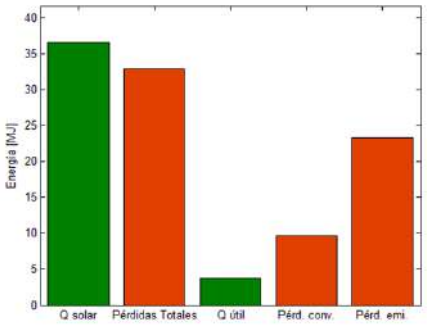


Fig. 9c) Energía recibida por la estufa solar durante el tiempo de exposición el día 13 de febrero de 2016, utilizando aceite de oliva.

4. CONCLUSIONES

- Los parámetros de diseño del concentrador solar parabólico permitieron que las ganancias superaran las pérdidas y por ende la estufa logró alcanzar temperaturas que permiten que ésta pueda ser utilizada para la cocción de una gran gama de alimentos, considerando las temperaturas alcanzadas, que experimentalmente pueden alcanzar los 170°C y que por la masa calentada, puede ser utilizada para alimentar del orden de cuatro personas.
- El diseño desarmable de la estufa solar facilita su transporte a las áreas rurales, zonas de camping, terrazas, entre otros. Además su cómodo almacenamiento permite que se pueda ubicar en espacios reducidos.
- La estufa solar fue modelada con las condiciones climáticas de Pereira, Risaralda, sin embargo, esta puede usarse en áreas con mayor irradiación y menor nubosidad y obtenerse mayores temperaturas en menor tiempo.
- El modelo teórico arroja un mayor aumento en la temperatura del fluido ya que para este modelo de la estufa se utilizaron valores de irradiación global (irradiación directa + difusa) entregados por la estación UTP, pero en la práctica la estufa solar funciona solo con la componente directa de ese valor, de allí que la estufa solar construida tenga un comportamiento más lento.
- El modelo matemático de la estufa se asemejó al comportamiento de la misma hasta el momento en que se alcanzó la temperatura máxima con el agua (aproximadamente 96°C para 3 litros de agua), debido a que en el modelo la temperatura sigue aumentando, pero realmente el agua al hervir se evapora, ya que no se cuenta con una olla a presión que permita aumentar la temperatura del vapor de agua.
- El modelo matemático fue una aproximación ideal aunque bastante cercana al comportamiento experimental de la estufa solar, las diferencias se deben a la imprecisión de la construcción (como la suma de errores de corte y acople de las piezas), y las pérdidas energéticas debido a las condiciones reales del funcionamiento de la estufa (orientación y viento) y de los materiales con los cuales está construida, que influyen en la comparación de ambos resultados. Sin embargo es importante hacer notar que el modelo matemático desarrollado permite diseñar y escalar con precisión una olla más grande o más pequeña, con el objetivo de poderla construir.
- Otra razón por la cual el modelo matemático no coincidió exactamente con los datos experimentales, es que la temperatura y velocidad del viento utilizados no son del lugar de la prueba, ya que esta información se obtuvo de la estación climatológica UTP ubicada en un edificio aledaño a este.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] N.A Guzmán, L.A. Estrada y J.O. Africano. «Costo efectividad del gas natural domiciliario como tecnología sanitaria en localidades rurales del Caribe Colombiano». REVISTA SALUD PÚBLICA, vol 10, n° 4, pp. 537-549, 2009.

[2] F. Mejía Barragán. Implicaciones ambientales del uso de leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.

[3] A. Jaramillo Granada, N. Ramírez y R. Dorantes. "Cálculo y diseño de una estufa solar parabólica para la cocción de alimentos". XXXIX Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Campeche, Campeche, México, octubre 2015.

[4] Testo Argentina S.A.. "Academia Testo", 2010. Disponible en línea: http://www.academiatesto.com.ar/cms/determinacion-de-la-e. [Último acceso: 23 Diciembre 2015].

[5] N. A Guzmán, L. A. Estrada y J. O. Africano. «Costo efectividad del gas natural domiciliario como tecnología sanitaria en localidades rurales del Caribe Colombiano». REVISTA SALUD PÚBLICA, 2009, vol. 10, n° 4, pp. 537-549.

[6] P. F. Díez. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura, Cantabria: Servicio de Publicaciones de la Escuela T. Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1992.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por el Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magneto-Opticas de Nuevos Materiales (GIMM), del Laboratorio de Refrigeración, Fenómenos de Transporte y Energías Renovables de la UAM-A y del proyecto CEMIESOL.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO

David Gudiño Ayala
Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO),
Periférico Sur Manuel Gómez Morín # 8585, Tlaquepaque, Jalisco, CP 45090, México,
Teléfono: 3669-3506, Fax: 3669-3505, dgudino@iteso.mx

RESUMEN

Se presentan los resultados del estudio del comportamiento térmico de un sistema de secadores solares híbridos sin carga de producto a secar, tanto para la etapa o rampa de calentamiento como para la etapa de operación normal donde la temperatura permanece estable. El sistema consta de dos secadores solares tipo charola integrados (dimensiones 0.61x1.22x0.095 m) y un calentador de gas doméstico. En el fondo de la charola hay un serpentín de cobre por donde se hace circular agua caliente (80ºC) para ayudar al proceso de secado.

El estudio consistió en realizar balances de energía para conocer los porcentajes de calor promedio disipados en cada parte del sistema: charolas, conexiones y calentador de gas, usando el sistema a diferentes condiciones ambientales (con y sin radiación solar) y de operación (etapa de calentamiento y de operación normal). La energía aportada provino en ocasiones sólo de la fuente auxiliar de energía (gas LP) a través de un calentador de gas comercial, o de radiación solar en conjunto con la del gas quemado.

Se encontró que el porcentaje de energía disipada en los secadores de charolas (la que ayuda al proceso de secado), respecto a la energía total suministrada por el gas durante la etapa normal de funcionamiento fue del orden de 27% para las pruebas hechas sin recibir radiación solar, y de un 20% para las pruebas con radiación solar. Cuando el cálculo se hizo respecto a la energía transportada por el agua de calentamiento que se usa como medio de transporte de calor del calentador de gas a los colectores, la eficiencia de disipación de calor promedio en los colectores fue del orden del 80% para las pruebas sin radiación solar, y de un 52% para las otras con condiciones solares.

También se obtuvo la eficiencia promedio del calentador de gas durante las etapas de calentamiento y operación normal, y cuando los secadores operaron con y sin radiación solar. Los valores medios de la eficiencia con y sin radiación solar fueron 54% para la etapa de calentamiento y 36% para la de operación normal. La eficiencia fue ligeramente mayor (3 %) cuando el sistema operó recibiendo radiación solar.

ABSTRACT

The results of the study of the thermal behavior of a hybrid solar draying systems is presented without the load of material to be dried both at the start heating ramp and the normal operation where temperature remains constant. The systems includes two integrated solar tray driers (dimensions 0.61x1.22x0.095 m) and a residential boiler. Below the tray lies a cupper coil whereas hot water (80 °C) circulates to speed the drying.

The study consisted on energy balances to determine the average percent of heat dissipated in each part of the system: trays, connections, and boiler using the system at different ambient and operating conditions, energy supplied came only form the auxiliary source (burn LP gas) supplied by the boiler or by solar radiation as well as the gas boiler.

It was found that the percentage energy dissipated on the tray dryers (the heat that speeds the drying (respect the total energy supplied by the gas boiler during normal operation) is in the order of 27% for tests without solar radiation and of 20% for tests including solar radiation. When the comparison is in respect of the energy carried by the heating water coming from the gas boiler the efficiency of average dissipated heat on the trays was in the order of 80% for tests without solar radiation and of 52% for the other conditions.

The average efficiency of the boiler for the heating and normal operation was also determined for operation with and without solar radiation. The efficiency values with and without radiation where 54% for the heating step and 36% for normal operation. Efficiency was slightly higher (3%) when the system operated with solar radiation.

Palabras claves: secador hibrido, comportamiento térmico, serpentín cobre, agua caliente, energía disipada, eficiencia boiler

INTRODUCCIÓN

El uso de secadores solares híbridos, donde además de la energía solar se utiliza otra fuente auxiliar de energía, ofrece una buena alternativa para mejorar el proceso de secado únicamente solar que puede ser llevado a cabo con una gran diversidad de tipos de secadores solares como lo menciona Ekechukwu y Norton (1999). Esto sin duda ya es una ventaja importante cuando se compara contra el secado

tradicional donde el proceso es lento y normalmente carente de condiciones higiénicas (Gudiño, 2007 y Chávez, 2010), pero también es común que, aunque se usen secadores solares simples, el proceso de secado a veces no llega a completarse totalmente en un solo día de Sol, por lo que éste es interrumpido durante la noche para continuar a completar lo poco que hizo falta hasta la mañana del día siguiente, con su consecuente enfriamiento y rehidratación ocurridos durante la noche, lo que contribuye a disminuir la eficiencia del proceso y a incrementar el tiempo total para tener el producto terminado. Aquí es donde el uso de un secador solar híbrido puede ayudar a mejorar el proceso dándole continuidad para terminar el lote iniciado. También podría pensarse en hacer un proceso semi-continuo, donde se incluya el día y la noche para realizar esta tarea, incluso en días nublados, dependiendo de las necesidades del productor.

Como lo mencionan diversos autores, la fuente auxiliar de energía puede ser obtenida de la biomasa (Benon y Fuller, 2002, Madhlopa y Ngwalo, 2007), de energía eléctrica a través de resistencias que calientan el aire de secado (Boughali, *et al*, 2009), de gas LP (López, 2011 y Gudiño y Calderón, 2014) o de energía geotérmica (Casimiro, 1997, Arellano, et al, 2008 y Delgado, *et al*, 2013). Respecto al uso del gas LP como fuente auxiliar de energía, existen dos empresas establecidas en la República Mexicana que ofertan secadores híbridos, que además de utilizar un calentador solar para ayudar a calentar el aire de secado, usan gas LP como fuente auxiliar de energía: SAECSA, Energía Solar (Saecsa.com, 2016) y BRETCON, Ingeniería Solar (Bretconenergíasolar.com, 2016).

El estudio de secadores solares híbridos (SSH) en ITESO inició con la caracterización teórico-práctica de un colector solar (Gudiño, 2012) cuyas curvas características de funcionamiento, teóricas y prácticas, mostraron una buena concordancia. La fuente auxiliar de energía utilizada en este trabajo, y en todos los siguientes estudios aquí referidos, proviene de la combustión de gas LP. Este se utiliza para calentar agua en un calentador doméstico, para después hacerla recircular por un serpentín de cobre ubicado en el fondo de la charola que conforma dicho colector solar (secador), para contribuir a mejorar el proceso de secado.

Este mismo colector se analizó por Gudiño y Calderón, 2014, donde el objetivo consistió en hacer comparaciones entre estudiar el secador en modo híbrido (operado con energía solar y gas) y en modo puramente solar, y donde el secador operó en modo directo (la radiación incide directamente sobre el producto a secar) y con una sola capa de producto a secar. En ese estudio se encontró que los tiempos de secado para llegar a un mismo contenido de humedad son en promedio 31 % menores (2 horas menos) cuando el secador operó en modo híbrido, y que las eficiencias de evaporación tienen un comportamiento inverso dado que cuando el secador operó en modo solar fue en promedio casi el doble de eficiente (η_{evap} = 23.4 % modo solar vs η_{evap} = 13.4 % modo híbrido) respecto de la operación en modo híbrido. Esto indica que, aunque el proceso es más rápido cuando se utiliza la fuente auxiliar de energía (modo híbrido), mucho del calor aportado por el agua caliente obtenida por la combustión de gas LP se pierde al medio ambiente y realmente no se aprovecha en el proceso de secado, haciendo que el sistema sea poco eficiente.

Con base en los resultados anteriores, se llevó a cabo otro estudio que implicó la construcción de dos secadores híbridos del mismo tipo, pero donde se incorporaron algunas modificaciones con la intención de aprovechar mejor la energía proporcionada por la fuente auxiliar de energía (gas LP), para mejorar su funcionamiento térmico e intentar incrementar su eficiencia de evaporación (Roldán y Gudiño, 2014). Se utilizaron dos secadores con la intención de hacer pruebas comparativas donde se puedan cambiar las condiciones de operación entre un secador y otro, pero donde ambos operen bajo las mismas condiciones ambientales de radiación solar, humedad relativa y temperatura ambiente. Las modificaciones consistieron en hacer el secador menos largo, pero con capacidad de procesar una doble capa de producto a secar. También se incorporó la opción de utilizar o no utilizar un disipador de calor dentro de la charola para ayudar a transferir calor del agua de calentamiento al aire de secado, de operar los secadores en modo de recepción de radiación solar directo e indirecto, y de operarlos en modo híbrido (energía solar y gas) o modo puramente solar. Aunque hubo una leve mejoría en cuanto a la eficiencia promedio de evaporación, estuvo entre 13 y 15% independientemente del modo de recepción de radiación solar, en general se encontró que estos secadores tienen un comportamiento similar al obtenido en el primer diseño de secador solar híbrido, y que se sigue desperdiciando mucha de la energía aportada por la fuente auxiliar, por lo que se sugirió que el secador se debe seguir estudiando para conocer mejor su funcionamiento, así como las partes o regiones donde se debe mejorar.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo consistió en realizar balances de energía en las diferentes partes del sistema compuesto por los dos secadores solares mencionados en el estudio anterior, con la intención de conocer los porcentajes de energía promedio disipada en cada parte del mismo (charolas, conexiones y calentador de gas) al trabajarlo bajo diferentes condiciones ambientales y de operación, y donde la energía aportada provenga sólo de la fuente auxiliar de energía (gas LP) a través de un calentador de gas comercial doméstico, o de la radiación solar que incide sobre los secadores solares en conjunto con la del gas.

MÉTODOS Y MATERIALES

El sistema utilizado para llevar a cabo este estudio está conformado por dos secadores solares híbridos (A y B), un calentador doméstico comercial, una motobomba recirculadora de agua caliente y la interconexión entre ellos. Se decidió utilizar el calentador con gas LP como fuente auxiliar de energía que calienta el fluido de trabajo durante todo el proceso de prueba para lograr tener un mejor control de la temperatura de operación y que el estudio fuera más confiable, pero la idea es que a futuro el agua caliente provenga de algún sistema de calentadores solares de agua. Así se propicia más el uso de las fuentes renovables de energía y se reduce al mínimo posible el uso de fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles.

Características de secadores

Las características de los secadores utilizados en este estudio ya han sido descritas en trabajos anteriores presentados en ANES (Roldán y Gudiño, 2014). Cada secador está conformado por una charola de 0.61 m de ancho, 1.22 m de largo y 0.095 m de alto (Ac = 0.744 m^2). En el fondo de la parte exterior de la charola está unido un serpentín de tubo de cobre flexible de 12.7 mm de diámetro, por donde fluye agua caliente (80 °C) a razón de 2 LPM en circuito cerrado, que en este caso proviene de un calentador de gas comercial, y que ayuda a mejorar y a dar continuidad al proceso de secado. Cuenta además con una cubierta de vidrio de 4 mm de espesor, aperturas de entrada y salida equivalentes a un medio de la altura total (0.048 m de altura libre), una placa absorbedora entre la cubierta de vidrio y el fondo del secador para hacer un sistema indirecto, aislante térmico de fibra de vidrio en el fondo y partes laterales de cada secador, aislante térmico de espuma de polietileno en toda la instalación hidráulica, y una inclinación de 25 grados al sur para propiciar la convección natural del aire de calentamiento, que en este caso está en contracorriente con el flujo de agua, dado que este último va de arriba hacia debajo en cada secador. Ver figura 1.

Figura 1. Fotografía de sistema de secadores solares híbridos en operación.

Procedimiento

Las pruebas se llevaron a cabo bajo dos variantes principales: con incidencia de radiación solar más energía proveniente de la combustión de gas LP, y con energía proporcionada únicamente por la fuente auxiliar de energía (gas LP). Esto último con la intención de cuantificar de mejor manera las pérdidas de calor en cada una de las partes del sistema de secadores solares estudiados, dado que esto se torna un poco más complicado cuando el sistema opera bajo condiciones solares donde las variables ambiente pueden ser menos estables.

En cada prueba realizada, primero se procedió a instalar el adquisidor de datos de temperatura y la PC para la captura de los mismos, así como la instalación del piranómetro para medir la radiación solar, cuando procede. Luego se midió la masa inicial de los tanques de gas LP para poder cuantificar la cantidad de gas y energía utilizados en cada etapa de operación (rampa de calentamiento y etapa de operación normal con temperatura estabilizada).

Luego se accionó la bomba de recirculación, se purgó las trazas de aire dentro del sistema, se establecieron los flujos a 2 LPM y, cuando todo estuvo listo, se inició la toma de tiempo de la rampa de calentamiento. Cuando esta terminó por haber llegado a la temperatura de estabilización deseada (80 °C), se hizo cambio de tanque de gas para ahora continuar con la etapa de operación normal (una hora de duración) y poder cuantificar la energía consumida en esta parte. Los datos medidos en cada etapa y prueba son: temperaturas (ambiente, entrada y salida de cada secador, entrada y salida de bomba y boiler), flujos de agua, radiación solar (cuando procede) y masas de gas utilizado por etapa. En la figura 2 se indica la posición de los termopares dentro del sistema, así como los demás aparatos usados. Las masas de los tanques de gas se midieron inmediatamente después de haber terminado cada prueba.

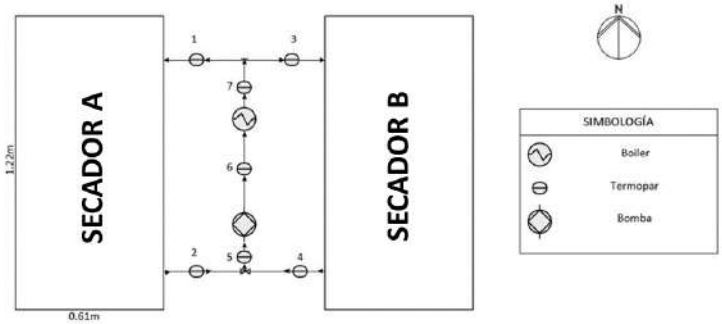


Figura 2. Diagrama del sistema de secadores solares híbridos con ubicación de termopares.

Cuando las pruebas se llevaron a cabo con condiciones solares, se consideró que estas se hicieran alrededor del mediodía solar para asegurar una buena incidencia de radiación solar, mientras que las pruebas con ausencia de radiación solar se realizaron poco después de la puesta del sol, y después de haber mantenido los secadores cubiertos con una capa opaca de fibra de vidrio, de tal manera que la temperatura interna del colector se mantuviera estable, y sin incidencia previa de radiación solar.

Posteriormente se realizaron balances de energía en las diferentes partes que componen el sistema y así se pudieron determinar los porcentajes de calor disipado en cada una de ellas. El balance consistió en hacer cálculos del calor sensible que el flujo de agua gana o pierde en cada elemento, luego se comparó contra la energía aportada, para calcular los porcentajes de disipación de calor. El cálculo de la energía aportada por el gas se obtuvo de multiplicar la masa de gas por su poder calorífico considerado como 49949 kJ/kg (NON-085-ECOL, 1994, 70 % butano-30 % propano), mientras que para la energía solar se multiplicó la irradiancia promedio por el área de colectores.

Equipos e instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados fueron los siguientes: Bascula de 10 kg de capacidad marca ALC para pesar los tanques con gas; piranómetro marca Kipp And Zonen, modelo C3, y sistema de medición de radiación solar modelo CC20, para medir la radiación solar sobre una base con la misma inclinación del secador (25°); rotámetros de polisulfona, con temperatura máxima de operación de 100 °C, demarca Blue and White de 0.5 a 5 LPM y diversas válvulas y conexiones para regular y medir el flujo de agua caliente; termopares tipo T calibrados para medir temperaturas. Estos últimos se encuentran conectados a un registrador USB-TC de 8 canales marca Measurement Computing que envía la señal directamente a una PC, donde mediante los software Instacal y TracerDaq propios para este registrador, se almacena la información para su posterior procesamiento. La velocidad de muestreo fue de 1 dato por minuto.

Otros equipos que conforman el sistema y que permiten su estudio son: bomba recirculadora de agua caliente marca Bell and Gossett, modelo NRF-22, calentador doméstico de paso automático marca Kalotron, modelo KART09, con válvula solenoide para controlar el flujo

de gas al quemador, control automático de temperatura marca GoLink, modelo FY400, que regula dicha válvula solenoide y que permite mantener la temperatura de operación en un valor determinado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron varias pruebas de estudio de los secadores solares híbridos (SSH) durante los meses de octubre a noviembre de 2015, de las cuales solo en 4 se lograron obtener resultados confiables, y son las que se presenta en este trabajo.

Aportación de energía al sistema

La tabla 1 muestra un resumen de la energía total aportada al sistema de secadores para las 4 pruebas mencionadas. Se muestra la fecha de prueba, la condición en que se llevó a cabo (con y sin radiación solar), la energía aportada por el gas y la energía proveniente de la radiación solar, cuando procede. También se muestra un desglose de la energía aportada en cada etapa: rampa de calentamiento y período de operación normal, donde para esta última etapa la temperatura se mantuvo en aproximadamente 80°C, y el período de duración fue de una hora. También se muestra la temperatura ambiente promedio tenida a lo largo de toda la prueba.

Tabla 1: Resumen de energía total aportada al sistema de secadores híbridos para las 4 pruebas reportadas.

Prueba	Condición	Tambiente °C	Energía de gas LP (kJ)		Energía solar (kJ)		Energía total entregada (kJ)
			Rampa	Op. normal	Rampa	Op. normal	
18/nov/2015	**Sin radiación solar**	22.4	12237	11588	Np*	Np	23825
19/nov/2015	**Sin radiación solar**	25.9	14735	10489	Np	Np	25224
19/nov/2015	**Con radiación solar**	30.7	10739	7243	1567	4611	24160
20/nov/2015	**Con radiación solar**	30.6	13986	7243	1313	4901	27443

*No procede

En general se puede observar que la energía total aportada por la combustión de gas es mayor que la energía total proveniente de la radiación solar cuando la prueba se hizo con radiación solar (es en promedio 3.2 veces mayor), que la energía aportada por el gas en la etapa de operación normal es similar a la etapa de rampa de calentamiento cuando la prueba se hizo sin condiciones solares, pero que ésta se reduce casi a la mitad cuando la prueba se hizo con aportación de radiación solar. La otra mitad es aportada precisamente por la radiación solar, haciendo que la energía total entregada al sistema sea similar en todas las pruebas.

También se puede observar que la mayor parte de la energía aportada por el Sol en las pruebas con radiación solar, se da en la etapa de operación normal que duró una hora, siendo 3.3 veces mayor que la energía aportada en la etapa de rampa de calentamiento, que tuvo una duración promedio de 18 minutos.

Energía disipada por parte del sistema de SSH

Los porcentajes de energía o calor disipado para cada una de las diferentes partes del sistema durante la etapa de operación normal, y respecto a la aportación total de energía suministrada por el gas, o la aportación de energía que logró quedar almacenada como energía interna en el agua a su paso por el calentador, y que denominamos energía o calor transportado por el agua, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Porcentajes de distribución por partes de la energía total aportada por el gas y de la energía que transporta el agua, para la etapa de operación normal. El dato entre paréntesis es la energía, en kJ, correspondiente a cada porcentaje.

Prueba	Condición	Energía de gas LP (kJ)	Energía de agua (kJ)	Respecto a energía de gas (%)			Respecto a energía de agua (%)	
				Secadores	Conexiones	Calentador	Secadores	Conexiones
18/nov/2015	**Sin radiación solar**	11588	3668	25.7 (2978)	6.0 (695)	68.3 (7915)	81.2 (2978)	18.8 (690)
19/nov/2015	**Sin radiación solar**	10489	3878	29.1 (3052)	7.9 (829)	63.0 (6608)	78.8 (3056)	21.2 (822)
19/nov/2015	**Con radiación solar**	7243	2879	20.6 (1492)	19.1 (1383)	60.3 (4368)	51.9 (1494)	48.1 (1385)
20/nov/2015	**Con radiación solar**	7243	2594	18.5 (1340)	17.3 (1253)	64.2 (4650)	51.8 (1344)	48.2 (1250)

Estos se obtienen del cociente entre el calor disipado y el calor aportado. Entre paréntesis se incluye el dato de energía, en kJ, correspondiente a cada porcentaje disipado, y se observa que aunque los porcentajes disipados en los secadores y conexiones son diferentes

dependiendo del valor al que están referidos, los valores de energía disipada son los mismos para cada parte mencionada. Se muestran sólo los datos de la etapa de operación normal, dado que esta será la etapa de mayor duración dentro de un proceso de secado real. Cabe mencionar que los datos presentados en dicha tabla son datos promedio de todo el período de tiempo utilizado en dicha etapa.

Respecto a la energía total aportada por el gas. Como se puede observar de la tabla 2 los porcentajes de energía disipados en los dos secadores respecto a la energía total aportada por el gas no son tan grandes: 27% en promedio para las pruebas hechas sin radiación solar y 20 % para las pruebas donde sí hubo incidencia de radiación solar. Esta disipación de calor en los secadores es la que se pretende ocurra en mayor medida, dado que es la energía que se transfiere al aire de secado y la que realmente se aprovecharía en el proceso de secado. Cabe mencionar que esta energía se disipa prácticamente por partes igual en cada uno de los dos secadores usados (A y B), como se mostrará más adelante. Los porcentajes promedio de pérdidas de calor en conexiones o instalación son de 7 y 18 %, para las mismas condiciones mencionadas. El resto de la energía se disipa en el propio calentador: 66 % en promedio cuando no se usa radiación solar y 62 % cuando sí se usa, lo que hace que éste sea poco eficiente. Se ha observado que cuando el número de secadores por sistema aumenta, se aprovecha de mejor manera la energía aportada por el gas, haciéndolo un poco más eficiente.

Los datos anteriores de calor disipado en los secadores indican que cuando el sistema opera bajo condiciones solares la transferencia de calor del agua de calentamiento hacia el aire de secado se dificulta o disminuye debido a que el aire dentro del secador, y en general todo el secador, se encuentra a una temperatura más elevada por la incidencia de la radiación solar, además de que la temperatura ambiente será mayor que la observada en las pruebas sin radiación solar, lo que también contribuye a una menor transferencia de calor, y provoca que el porcentaje promedio de calor disipado en esta condición donde se recibe radiación solar sea menor (7 % menos).

Por otra parte, los datos de calor disipado en el calentador se pueden utilizar para calcular la eficiencia promedio de calentador por diferencia entre el l00 % de la energía inicial aportada por el gas y el porcentaje total de energía disipada en el mismo calentador.

Haciendo estos cálculos se encuentra que los valores promedio de eficiencia del calentador están entre un 34 % (sin radiación solar) y 38 % (con radiación solar) de eficiencia, para la etapa de operación normal donde la temperatura promedio del agua de calentamiento es de 80 °C. Durante la rampa de calentamiento (datos no mostrados), las eficiencias promedio del calentador de gas son un poco mayores (51 % con radiación solar y 54 % sin radiación solar) debido principalmente a que la temperatura promedio del agua en esa etapa es más baja, y ayuda a que haya menos pérdidas de calor. El valor medio resultante de temperatura de todas las pruebas realizadas en esta etapa de calentamiento, considerado como un promedio entre la temperatura inicial del agua y la temperatura final de estabilización, es 58 °C. Este valor que está 22 °C por debajo de la temperatura de estabilización (80 °C). Cabe mencionar que dicha eficiencia de calentador es ligeramente mayor (3% en promedio) cuando los secadores operaron en condición solar, en cualquiera de las etapas de funcionamiento. La energía solar ayuda un poco a que se gaste menos cantidad de gas en el calentador y a que la energía que este proporciona se aproveche mejor.

El dato de eficiencia que proporciona el fabricante del calentador es de 82 % (DEPSA.com, 2016), pero se tiene que considerar la condición que él maneja: incrementar la temperatura del agua en 25 °C a partir de la temperatura ambiente (25 °C), lo que da una temperatura promedio de operación muy baja (38 °C), que contribuye a incrementar su eficiencia. Sabiendo que en la actualidad el uso de un calentador solar para agua en substitución de un calentador comercial doméstico es atractivo y rentable, aun con el aliciente de las altas eficiencias que ocurren en las condiciones de hogar mencionadas (bajas temperaturas de operación), resulta pertinente sugerir utilizar calentadores solares de agua en el sistema de SSH para que ayuden en el proceso de secado, donde el calentador de gas es mucho menos eficiente debido a las altas temperaturas de operación que ahí se manejan. Por eso, una de las ideas es que el calentador de gas se use sólo por las tardes para complementar el proceso de secado e incorporar calentadores solares al sistema de secadores solares híbridos, reduciendo a un mínimo el uso de combustibles fósiles. También se puede probar utilizar temperaturas más bajas en el fluido de trabajo, lo que ayudaría a mejorar su eficiencia, pero casi seguro incrementaría los tiempos de secado. Falta hacer pruebas al respecto.

Respecto a la energía total transportada por el agua. Considerando ahora los porcentajes de energía disipados en los secadores respecto a la energía almacenada y transportada por el agua que se utilizó como fluido de trabajo, se puede observar de la penúltima columna de la misma tabla 2 que estos valores son mucho más altos que los mostrados anteriormente: 80 % en promedio cuando el sistema operó en condición sin recibir radiación solar, y 52 % para cuando sí recibió dicha radiación solar. El resto, 20 y 48 % de manera respectiva, se disipa en las conexiones del sistema. Esto sin duda es bueno, pero se sigue observando el mismo fenómeno respecto a que el sistema es menos eficiente para disipar calor en los secadores cuando opera en condiciones solares, en parte por las razones ya explicadas respecto a que se dificulta que el agua disipe calor cuando el secador está a una temperatura alta por la incidencia de la radiación solar, y en parte porque se observó que la misma energía solar provoca que la temperatura del agua suba hasta 3 °C por encima de la temperatura de operación establecida (80 °C) generando una mayor pérdida de energía en la instalación. Aunque esta temperatura debió estar controlada por el control automático de temperatura, esto no ocurrió así y provocó el efecto mencionado. También hay que considerar que la cantidad de energía que trasporta el agua en esta condición es más pequeña que la transportada cuando no recibe radiación solar (ver columna 4 de tabla 2), y la consecuencia de dividir una cantidad que incrementó su valor (calor perdido en instalación) entre otra que lo disminuyó (calor transportado por agua), provoca que este valor o resultado se incremente sustancialmente. Todo esto sugiere que lo más pertinente para apoyar de mejor manera el proceso de secado va a ser el uso de calentadores solares en substitución del calentador, que además no es sustentable debido a la quema combustibles fósiles.

Presentación gráfica de resultados

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la prueba realizada sin recibir radiación solar del día 18 de septiembre de 2015, donde se puede apreciar la distribución o disipación del calor aportado por el gas LP (figura 3) y del transportado y almacenado por el agua a su paso por el calentador (figura 4), para cada una de las etapas de funcionamiento. Como se puede observar, aquí se reportan cantidades de energía mostradas entre paréntesis en la tabla 2, y no los porcentajes. El orden de las leyendas de arriba hacia abajo es el mismo que el de las gráficas de izquierda a derecha, empezando por la etapa de calentamiento y terminando con la etapa de operación normal. Los datos de la etapa de calentamiento no se presentan en ninguna tabla.

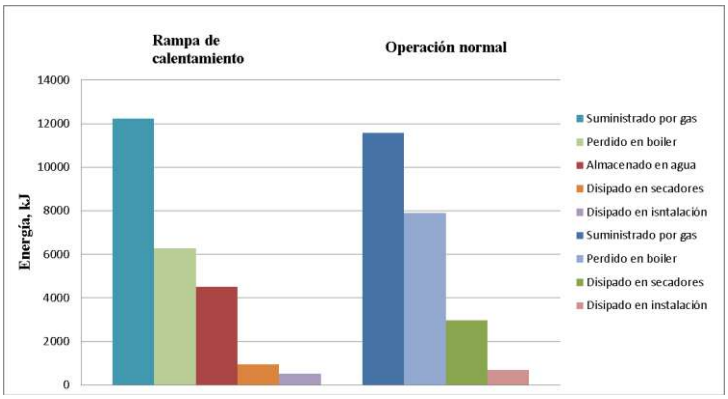


Figura 3. Distribución del calor aportado por la combustión del gas LP. Prueba sin radiación solar, 18/nov/2015.

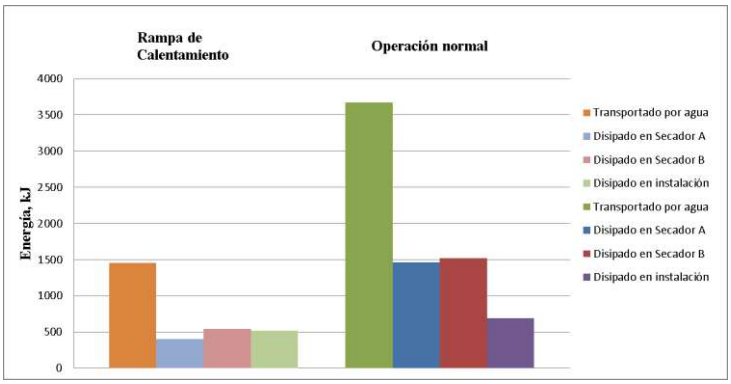


Figura 4. Disipación del calor que el agua gana y transporta a su paso por el calentador de gas. Prueba sin radiación solar, 18/nov/2015.

De la figura 3 se puede observar que durante la etapa o rampa de calentamiento mucha de la energía se utiliza para incrementar la temperatura del agua de calentamiento (tercera barra de izquierda a derecha de la etapa de calentamiento) que inicialmente se encuentra a temperatura ambiente y debe llegar hasta la temperatura de operación normal (80 °C), y queda almacenada como energía interna dentro del agua. Esto a su vez provoca que el calor que se pierde en el calentador de gas no sea tan alto (segunda barra de izquierda a derecha de la misma etapa), como si ocurre en la etapa de operación normal, y que se puede observar en la segunda barra de la etapa de operación normal.

También se observa que el calor disipado en los secadores para la etapa de operación normal está agrupado en una sola barra (tercera de esa etapa), pero su valor equivale a la suma de las dos barras que representan las pérdidas de calor en cada uno de los secadores cuando la pérdida se calcula en base a la energía transportada por el agua de calentamiento, y que se muestran en la figura 4 como secadores A y B.

Graficas similares se pueden obtener para las demás pruebas realizadas. Cuando la prueba utiliza radiación solar y el análisis se hace sobre la energía total aportada al sistema, la primera barra de esta gráfica se tendría que subdividir entre la energía aportada por el gas y la energía aportada por la radiación solar, pero todo lo demás sería similar dado que la suma de estas aportaciones es similar a la que se tiene cuando se usa sólo gas como fuente de energía (ver tabla 1).

CONCLUSIONES

La energía promedio disipada en los secadores en la etapa de operación normal, respecto a la energía total entregada por la combustión del gas LP, es poca (23.5 %, promedio de las pruebas con y sin radiación solar), comparada con la que en promedio se pierde en el calentador de gas (64 %, misma consideración), debido, entre otros factores, a que este opera con una temperatura alta (80°C), generando grandes pérdidas de calor.

Este porcentaje de disipación de calor en los secadores se incrementa mucho cuando el cálculo se hace respecto a la energía que transporta y almacena el agua de calentamiento, llegando a ser hasta de 80 % cuando no se recibe radiación solar.

La incidencia de la radiación solar en la etapa de operación normal hace que el calor perdido en los secadores disminuya (pasa de 80 a 52 %) debido a que el calentamiento generado por dicha incidencia dificulta la pérdida de calor del agua de calentamiento hacia el aire de secado, y a que el agua termina calentándose más de lo previsto, incrementando así sus pérdidas de calor.

La eficiencia del calentador de gas no mejora mucho (3 %) aun cuando el sistema opera con radiación solar en conjunto con la energía del gas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los alumnos Alonso Villalobos Echevarría y Sergio Garmendia Lemus por su participación en la caracterización de este sistema de secadores solares híbridos. También se agradece al Técnico Russell Segovia Ley por su valiosa colaboración y gran interés mostrados durante el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

Arellano G.V.M., Iglesias R.E. y García G.A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. Boletín IIE, Tendencias Tecnológicas. http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-30_12-52-09111174.pdf; (vi: 16 junio de 2016).

Benon B. y Fuller R.J. (2002). Natural convection solar dryer with biomass back-up heater. Solar Energy, Vol. 72, No. 1, p. 75-83.

Boughali S, Benmoussa H, Bouchekima B, Mennouche D, Bouguettaia H, Bechki D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar-electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. Solar Energy, Vol. 83, p. 2223-2232.

BRECTON, Ingeniería solar. Empresa Mexicana dedicada a la energía solar e ingenierías alternas. http://www.bretconenergiasolar.com/deshidratador.php; (vi: 16 junio de 2016).

Casimiro E.E. (1997). Uso de la energía geotérmica para la deshidratación de frutas y legumbres, experiencia en Los Azufres, Mich., México. Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía, Vol. 13, No.1, p. 57-59.

Chávez P.E. (2010). Secado solar de alimentos. Jornada Técnica sobre Assecatge Solar de Material Vegetal. https://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=d65214b8-a03b-428b-8a8d-382a57558aa3&groupId=10136; (vi: 16 junio de 2016).

DEPSA, Desarrollo de Productos S.A. de C.V. Kalotron. (2016). http://www.depsa.com.mx/pdf/depaso2.pdf; (vi: 24 de junio de 2016).

Delgado, E., Barriga, A., Peralta, J. y Aveiga, G. (2013). Utilización de energía solar e intercambiador enterrado como fuente de calor para cámaras de secado. Primer Congreso Internacional y Expocientífica, Guayaquil, Ecuador. http://iner.ec/congreso/images/documentos/Articulos/ISEREE2013_Delgado_Em%C3%A9rita.pdf; (vi: 16 junio de 2016).

Ekechukwu O.V. y Norton B. (1999). Review of Solar Energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology. Energy Conversion & Management 40, p. 615-655.

Gudiño A.D. (2007). Secador Solar Indirecto Tipo Charola para el Secado de Piña. Memorias de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar, Zacatecas, Zac., p. 489-494.

Gudiño A.D. y Calderón T.A. 2014. "Pineaple drying using a new solar hybrid dryer". 2013 ISES Solar World Congress. *Energy Procedia*, Vol. 57, Elsevier, p. 1642-1650. Este artículo tiene libre acceso y derechos de autor, y se puede visualizar en la siguiente liga: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214015227 .

López V.E.C. (2011). Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar-gas). Tesis de Maestría en Ciencias. IPN. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Oaxaca, México. http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/sites/default/files/pdf/tesis_erick_lopez_vidania.pdf; (vi: 16 junio de 2016).

Madhlopa A, Ngwalo G. (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass heater. Solar Energy, Vol. 81, No. 1, p. 449-462.

SAECSA, Energía Solar. Deshidratador solar SAECSA. http://saecsa.com/ y *http://saecsaenergiasolar.com/catalogo/deshidratador/*; (vi: 16 junio de 2016).

NOM-085-ECOL. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL. Contaminación atmosférica-Fuentes fijas. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4769948&fecha=02/12/1994; (vi: 25 junio 2016)

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

Desarrollo de un modelo matemático acoplado para el diseño y evaluación térmica del sistema de calentamiento solar híbrido de una alberca con cubierta semitransparente

Jorge M. Hincapié Zapata[1], Beatriz Cruz Muñoz[2]
[1]Profesional graduado de Ing. Física, Universidad Tecnológica de Pereira. Vereda La Julita, Pereira, Colombia
[2]Departamento de Física, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia
jorgemariohz55@hotmail.com, bcruz19@gmail.com

Rubén Dorantes Rodríguez[3] y Humberto González Bravo[3]
[3]Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, México, D.F. CP 02200, México.
Tel. 01(55) 53189539, rjdrodriguez@live.com.mx, hegb@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

Se presenta un modelo matemático en estado transitorio para diseñar y evaluar sistemas de calentamiento solar híbrido para albercas cubiertas con un material semitransparente. Tradicionalmente en este tipo de sistemas se usa un calentamiento directo del agua de la alberca, que pasa por el campo de calentadores solares. Sin embargo por recomendaciones del fabricante de calentadores solares se recomienda lo contrario para evitar daños al calentador solar por el cloro del agua. Por lo que se debe utilizar un calentamiento indirecto, utilizando dos sistemas: el primero que contiene el campo de calentadores solares, un tanque de almacenamiento térmico, bombas de agua, un sistema y un intercambiador de calor y el segundo sistema que contiene el agua de la alberca, auxiliar de calentamiento, bombas de agua y el mismo intercambiador de calor del primer sistema.
Para simular el comportamiento térmico de ambos sistemas se desarrolló un balance de energía en estado transitorio para cada sistema acoplados en el intercambiador de calor. Así el propósito de este trabajo fue realizar un análisis teórico del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal cerrada, cuando se usa un campo de colectores de tubos concéntricos evacuados. Para éste análisis se utilizaron datos meteorológicos reales y condiciones de trabajo necesarias y típicas para operar un sistema térmico común de calentamiento de agua en una alberca cerrada, que tiene un techo semitransparente de policarbonato. Se hizo énfasis en el cálculo de las perdidas por conducción a través de las paredes y suelo y las perdidas por reposición de agua debido al fenómeno de evaporación. Se desarrolló un algoritmo de cálculo de ambos modelos en una hoja de cálculo Excel, el cual permite simular el comportamiento térmico temporal del agua del tanque de almacenamiento y de la alberca.
El algoritmo permitió hacer un estudio de sensibilidad de las principales variables térmicas de los sistemas, como los coeficientes de absorción y emisividad de algunas superficies y del agua, el rendimiento térmico del intercambiador de calor, etc., para determinar las variables principales y secundarias.
Se muestran gráficos donde se puede ver la efectividad del modelo matemático, el cual permite diseñar y evaluar éste tipo de sistemas, además de ayudar a dimensionar el sistema auxiliar de calentamiento, para optimizar el área de calentamiento solar.

ABSTRACT

A mathematical model is presented in transient state to design and evaluate hybrid solar heating systems for pools covered with a semitransparent material. Traditionally in these systems direct heating of pool water, which passes through the field of solar heaters used. However by manufacturer's recommendations solar heaters otherwise it is recommended to avoid damage to the solar heater by chlorine water. As must use indirect heating, using two systems: the first containing the field of solar heaters a thermal storage tank, water pumps, a system and a heat exchanger and the second system containing water pool, auxiliary heating, water pumps and the same heat exchanger of the first system.
To simulate the thermal behavior of both systems an energy balance developed in transient state for each system coupled to the heat exchanger. So the purpose of this study was to perform a theoretical analysis of transient behavior of the water temperature in a closed municipal swimming pool, when a concentric collector evacuated tubes used. For this analysis real weather data and working conditions and typical necessary to operate a common thermal water heating system in a gated pool, which has a semi-transparent polycarbonate roof were used. Emphasis was placed on the calculation of the losses by conduction through the walls and floor and replacement of water losses due to evaporation phenomenon. a calculation algorithm of both models in an Excel spreadsheet, which allows to simulate the thermal behavior temporary water storage tank and the pool was developed.
The algorithm enabled a sensitivity study of the main thermal system variables, such as absorption coefficients and emissivity of some surfaces and water, the thermal efficiency of the heat exchanger, etc., to determine the primary and secondary variables.
graphics where you can see the effectiveness of the mathematical model, which allows you to design and evaluate these types of systems, and help size the auxiliary heating system to optimize solar heating area is.

Palabras claves: Calentamiento solar de albercas, tubos evacuados, modelo estado transitorio, estudio de sensibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo fue realizar un análisis teórico del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal cerrada, cuando es usado como medio de calefacción, un campo de colectores de tubos concéntricos evacuados no presurizados.

Para su desarrollo, se realizaron dos balances de energía acoplados en estado cuasi-dinámico: el primero, tomando como volumen de control un tanque de almacenamiento térmico conectado a los colectores de tubos concéntricos más un intercambiador de calor. El segundo, tomando como volumen de control la propia alberca conectada al intercambiador de calor. Para éste análisis se utilizaron datos meteorológicos reales y condiciones de trabajo necesarias y típicas para operar un sistema térmico común de calentamiento de agua en una alberca cerrada; bajo estas condiciones se logró llegar a un modelo físico-matemático, el cual describe el comportamiento térmico real del sistema completo. Se hizo énfasis en el cálculo de las perdidas por conducción a través de las paredes y suelo y las perdidas por reposición de agua debido al fenómeno de evaporación. Se desarrolló un algoritmo de cálculo de ambos modelos en una hoja de cálculo Excel, el cual permite simular el comportamiento térmico temporal del agua del tanque de almacenamiento y de la alberca con base en datos meteorológicos reales de la ciudad de Sogamoso.

Se muestran, además, gráficos donde se puede ver la evolución temporal de la temperatura promedio del agua de la alberca, con y sin cubierta térmica y evaluada para varios meses de años típicos, con el fin de conocer los alcances del campo de colectores solares instalado recientemente en la alberca de referencia.

2. METODOLOGÍA

Para este trabajo se realizó una revisión bibliográfica de los modelos utilizados para el diseño de sistemas de calentamiento solar de albercas y particularmente referente al tema de las pérdidas de calor por conducción a través de paredes y las pérdidas de calor por renovación de agua (estas debido a la cantidad de agua que sale del sistema), y posteriormente se tomaron relaciones para el cálculo de estas.

Se partió de un modelo físico-matemático base, el cual está fundamentado en un balance energético sobre un sistema termodinámico, para este caso la alberca, para determinar su comportamiento térmico en estado transitorio [1, 2, 5, 6].

La ecuación (1) se estableció de acuerdo a la primera ley de la termodinámica tomando como sistema termodinámico la alberca:

$$\Sigma Q_{int} \; - \; \Sigma Q_{per} \; = \frac{dU}{dt} \; [\mathrm{W}] \qquad (1)$$

Donde: $\sum Q_{int}$: Potencia total ganada (Q_{rad} + $Q_{útil}$) [W]; Q_{rad}: Potencia ganada por irradiación directa [W]; $Q_{útil}$: Potencia aportada por el campo de colectores [W]; $\sum Q_{per}$: es la suma de todas las pérdidas en el sistema [W]; $\frac{dU}{dt}$: es la razón de cambio en la energía interna del sistema. Reescribiendo la energía interna del sistema se tiene:

$$\Sigma Q_{int} - \Sigma Q_{per} \; = \frac{mC_p dT_a}{dt} \; [\mathrm{W}] \qquad (2)$$

Dónde: $\sum Q_{int}$: Potencia total ganada (Q_{rad} + Q_u) [W]; Q_{rad}: Potencia ganada por la radiación directa [W]; $Q_{útil}$: Potencia aportada por el campo de colectores [W]; $\sum Q_{per}$: Potencia total pérdida en el sistema [W]; T_o: Temperatura ambiente [^{o}C]; T_a: Temperatura promedio del agua de la alberca [^{o}C]; C_p: Calor especifico del agua [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}$]; m: Masa del agua [kg].

La ecuación (2) se caracterizó como una ecuación diferencial en T y su solución se llevó a cabo empleando el método numérico de diferencias finitas como se muestra en (3), donde:

$$\frac{\mathrm{dT_a}}{\mathrm{dt}} \approx \frac{\mathrm{T_{(j+1)} - T_j}}{\Delta \mathrm{t}} \qquad (3)$$

Tal que $T_{(j+1)}$ será la temperatura un instante j+1 superior a la temperatura T_j en el instante (j), siendo Δt el gradiente de tiempo entre ambas temperaturas. Las diversas entradas y salidas de potencia en el sistema van a depender directa o indirectamente de la temperatura en el sistema, por tanto, reorganizando la ecuación 2 tenemos:

$$\frac{\mathrm{dT_a}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{Q_{rad} + Q_{útil} - \Sigma Q_{per}}}{\mathrm{mC_p}} = \mathrm{F(T)} \qquad (4)$$

Ahora se tiene: $\mathrm{F(T)} = \frac{\mathrm{T_{(j+1)} - T_j}}{\Delta \mathrm{t}}$ (5)

Organizando, $\mathrm{T_{(j+1)}} = \mathrm{T_j} + \Delta \mathrm{t F(T)}$ (6)

La ecuación (6) permite calcular cómo será la evolución térmica del sistema termodinámico, partiendo de una temperatura inicial más un incremento de temperatura que se dará debido a F(T) en un intervalo de tiempo Δt. Sustituyendo F(T) obtenemos:

$$\mathrm{T_a^+} = \mathrm{T_a} + \left(\frac{\Delta \mathrm{t}}{\mathrm{mc_p}}\right)\left(\mathrm{Q_{rad} + Q_{util} - \sum Q_{per}}\right) \qquad (7)$$

Donde T_a^+ es la temperatura del agua en la alberca T_a pero un instante Δt después, para el cual $(Q_{rad} + Q_{útil} - \Sigma Q_{per})$ permanecen constantes.

Caso de estudio: un sistema de calentamiento solar acoplado a un sistema de calentamiento auxiliar con bombas de calor.

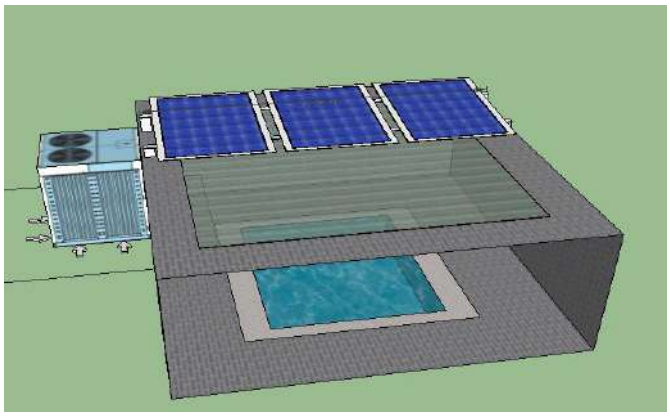


Figura 1. Alberca en recinto cerrado con sistema hibrido de calefacción (solar + bomba de calor).

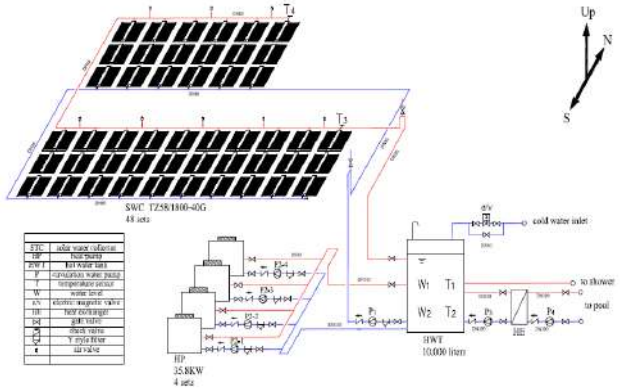


Figura 2. Diagrama básico del sistema de calentamiento hibrido, con dos subsistemas de control térmico acoplados.

El sistema que se estudió se encuentra dentro de un recinto cerrado cubierto con un material traslucido como se observa en la figura 1. Este sistema está compuesto por dos subsistemas: el primero, con un tanque de almacenamiento térmico, la bomba y la alberca, con el fin de alargar la durabilidad de los equipos el sistema en general fue diseñado para que el agua que circule a través de los colectores sea diferente al agua de la alberca, puesto que ésta contiene diversos químicos que pueden deteriorar el material del cual están hechos los colectores, por lo tanto, el aporte directo que realiza el sistema hibrido de calefacción actúa directamente sobre el tanque térmico (subsistema 1), el cual luego a través de un intercambiador de calor de placas paralelas, pasa a las bombas de calor y le aporta energía a la alberca (subsistema 2), tal y como se observa en la figura 2.

Adaptando la ecuación (7) al sistema en particular, tenemos que:

$$T_a^+ = T_a + \left(\frac{\Delta t}{mc_p}\right).\left(Q_{rad\ amortiguado} + Q_{util} + Q_{sistema\ auxiliar} - \sum Q_{per}\right) \quad (8)$$

Dónde:

T_a^+ : temperatura del agua calculada cada instante Δt; T_a: temperatura inicial del agua; Δt: intervalo de tiempo para el cual se hace el cálculo de T_a^+; m: masa total de agua que tiene la alberca; c_p: calor especifico del agua; $Q_{rad\ amortiguado}$: es la ganancia de calor por radiación directa; multiplicada por el coeficiente de transmisión óptico del techo, Q_{util}: son las ganancias de calor aportadas por los colectores, $Q_{sistema\ auxiliar}$: es el aporte energético del sistema auxiliar; $\sum Q_{per}$: son las diversas pérdidas que se presentan en el sistema.

Calculo de pérdidas y ganancias en los subsistemas 1 y 2.

Una vez desarrollada la ecuación que nos permite calcular la evolución temporal del agua en la alberca, se va a caracterizar cada una de las entradas y salidas de potencia que sufre el sistema.

Ganancias de calor por radiación directa

Estas ganancias hacen referencia a la ganancia de potencia que sufre la alberca solo por el hecho de estar expuesta directamente a los rayos del sol, donde la cantidad de energía que esta pueda obtener dependerá del coeficiente de absorción del agua; no obstante se debe tener en cuenta que el sistema que se estudió, se encuentra en un recinto cubierto con un material translucido (policarbonato azul rey) y la ecuación 9 muestra una expresión para calcular dicha ganancia:

$$Q_{rad} = \alpha\, I A_s\, \mu \ [\mathrm{W}] \quad (9)$$

Dónde: α: Coeficiente de absorción del agua; I: Irradiación solar $[\frac{W}{m^2}]$; A_s: Área superficial de la alberca [m^2]; μ: Coeficiente de transmisión del policarbonato (0.5 para policarbonato color azul rey).

Potencia útil suministrada por los calentadores solares

Estas ganancias de calor están ligadas directamente a la eficiencia del colector solar, cuyas características son suministradas por el fabricante del equipo y es la cantidad de energía que se transfiere al agua que circula a través del colector, denominado potencia útil. No obstante se debe tener aclarar que esta potencia útil es transmitida al tanque de almacenamiento del subsistema 1, el cual a su vez transmite esta energía al subsistema 2 a través del intercambiador de calor (figura 3). La expresión para calcular esta ganancia se muestra en la ecuación 10.

$$Q_{útil} = \eta I A_c £ \quad [W] \qquad (10)$$

Dónde:

η: Eficiencia térmica del colector (datos o curva del fabricante); A_c: Área total de colección del campo solar [m^2]; I: Irradiación solar [$\frac{W}{m^2}$]

£: Eficiencia térmica del intercambiador de calor (dato o curva del fabricante).

Sustituyendo η por la eficiencia dada por el fabricante, en la (ecuación 11) tenemos que:

$$Q_u = A_c \ I \ £ \left(\eta_o - \frac{a_1(T_a - T_o)}{I} - \frac{a_2(T_a - T_o)^2}{I}\right) \quad [W] \qquad (11)$$

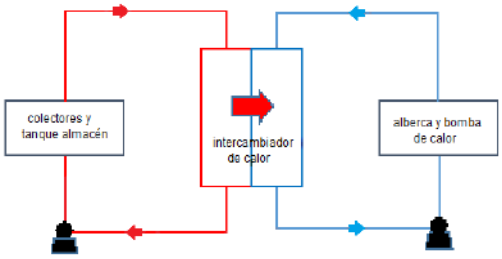


Figura 3. Los dos subsistemas 1 y 2 acoplados a través del intercambiador de calor, para calendar indirectamente la alberca. Fuente: elaboración propia.

Dónde: η_o = 0.76 es la eficiencia máxima del colector; a_1 =1.776 $\frac{W}{m2\ K}$); $a_{2.}$ = 0.004 W/m^2 K^2); T_a: Temperatura del agua de la alberca; T_0: Temperatura ambiente; A_c: es el área total de colección del campo solar [m^2]. I: es la Irradiación solar [$\frac{W}{m^2}$]. Por lo tanto es justamente a través de la eficiencia térmica del intercambiador de calor £, que se acoplan los dos subsistemas, ya que es a través de él que se transfiere calor al agua de la alberca proveniente del campo solar. Entonces la determinación de ésta eficiencia se puede realizar de dos maneras: una es suponiendo un valor promedio constante, como fue nuestro caso y una segunda es hacer un cálculo más preciso de su valor en función de las temperaturas y flujos de masa los dos fluidos de trabajo (caliente y frío) y de las curvas del intercambiador facilitadas por el fabricante.

Pérdidas de potencia en el sistema.

Las pérdidas a considerar en este trabajo son 5, tal y como se expresa en la ecuación 12:

$$\sum Q_{per} = Q_{evap} + Q_{conv} + Q_{emi} + Q_{cond} + Q_{rep} \quad (12)$$

Donde: Q_{evap} son las pérdidas por evaporación (W); Q_{conv} son las pérdidas por convección (W); Q_{emi} son las pérdidas por radiación (W); Q_{cond} son las pérdidas por conducción (W) y Q_{rep} son las pérdidas por reposición del agua evaporada.

Pérdidas por evaporación [1, 2, 3, 4]

Las pérdidas por evaporación que es la pérdida de energía en forma de calor latente de evaporación por la masa de agua evaporada. Estas pérdidas también están ligadas a la humedad relativa del ambiente, teniendo presente que a menor humedad relativa, mayor serán las pérdidas que se generan; una expresión para calcular estas pérdidas se muestra en la ecuación 13.

$$Q_{evap} = A_s \ h_{evap}(P_a - P_o) \quad [W] \qquad (13)$$

Dónde:

P_a : Presión de saturación a temperatura de la alberca [P_a]; P_o: Presión parcial de vapor de agua en el aire [P_a]. A_s: Área superficial de la alberca [m^2]; h_{evap} : coeficiente de evaporación [$\frac{W}{m^2 P_a}$]. Las pérdidas por evaporación implican, además hacer perder calor a la alberca, se está perdiendo masa en forma de agua al ambiente debido a este fenómeno físico, que ocasiona una disminución circunstancial en el volumen total del sistema, y esto a su vez, genera de manera indirecta otra pérdida en el sistema debido a la reposición de agua. Una expresión para calcular la razón de evaporización [1, 2], está dada por la ecuación 14 como sigue:

$$\dot{m} = \frac{q_{ew}}{h_w} = \frac{h_e(p_a - \phi p_o)}{h_w} \quad [\frac{Kg}{s}] \qquad (14)$$

Dónde: $\dot{m}$: Razón de evaporización [$\frac{K_g}{s}$]; q_{ew}: Flujo de calor evaporado [$\frac{W}{m^2}$]; h_w : Calor latente de vaporización del agua [$\frac{J}{kg}$]; h_e: Coeficiente de transferencia de calor por evaporación [$\frac{W}{m^2} P_a$]; P_o: Presión parcial del vapor a la temperatura del agua [P_a]; P_a: Presión parcial del vapor de agua en el aire [P_a]; ø : humedad relativa.

Pérdidas por convección [1, 3, 4]

Las pérdidas por convección se generan debido al movimiento del aire que está circulando a través de la superficie de la alberca, el cual toma calor sensible de la alberca, posteriormente el aire al ser menos denso comienza a subir y es remplazado por aire frio el cual toma nuevamente calor, generando un ciclo de pérdida. La ecuación 15, muestra una forma de calcular estas pérdidas.

$$Q_{conv} = A_s \ h_{ca}(T_a - T_o) \quad [W] \qquad (15)$$

Dónde: A_S: Área superficial de la alberca [m^2]; h_{ca}: Coeficiente de transferencia de calor por convección $[\frac{W}{m^2\ ^oC}]$ con valores de: 4,4 $[\frac{W}{m^2\ ^oC}]$ para velocidad del viento (v) menor a 5 $[\frac{km}{h}]$ o 1,39 v ^{0,8} $[\frac{W}{m^2\ ^oC}]$ para (v) mayor a 5 $[\frac{km}{h}]$; T_a: Temperatura de la alberca [^{o}C]; T_o : Temperatura ambiente [^{o}C]

Pérdidas por radiación [1, 5, 6]

La alberca en su conjunto emite radiación en forma de calor al espacio exterior principalmente. Para el cálculo de estas pérdidas se cita la ley de Stefan-Boltzmann como se muestra en la ecuación 16.

$$Q_{emi} = A_s \left[\sigma\, \xi \left(T_a{}^4 - T_o{}^4\right)\right] \quad [W] \qquad (16)$$

Dónde: A_S: Área superficial de la alberca [m^2]; ξ: Coeficiente de emisividad del agua; σ : Constante de Stefan-Boltzman [5,66x10^{-8} $\frac{W}{m^2k^4}$] T_a : Temperatura de la alberca [^{o}C]; T_o: Temperatura ambiente [^{o}C].

Pérdidas por conducción a través de las paredes [5]

Las pérdidas por conducción a través de las paredes se dan debido a la diferencia de temperaturas que hay entre el agua y las superficies en contacto con estas. Estas pérdidas dependen de la arquitectura y de los materiales con los cuales está construida la alberca. Una expresión para calcular estas pérdidas se muestra en la ecuación 17.

$$Q_{cond} = s_{cerr}\, K\, (T_a - T_{paredes}) \quad [W] \quad (17)$$

Dónde: S_{cerr}: Superficie de cerramiento o área de contacto con el agua [m^2]; K: Coeficiente de transmisión en las paredes [$\frac{W}{m^2\ ^oC}$]; T_a: Temperatura de agua [^{o}C]; $T_{paredes}$: Temperatura de las paredes [^{o}C]

Pérdidas por reposición [6]

Las pérdidas por reposición, hacen referencia a la cantidad de agua que se debe reponer debido por evaporación. Estas pérdidas son repuestas con agua de la red, que usualmente está a una temperatura inferior a la temperatura que se encuentra la alberca, por lo tanto, esta evaporación roba energía al resto de la alberca provocando que esta se enfríe. Una expresión para calcular estas pérdidas se puede apreciar en la ecuación 18.

$$Q_{rep} = \dot{m}\, C_p \left(T_a - T_{orep}\right) \quad [W] \qquad (18)$$

Donde: m: Razón de evaporación $[\frac{kg}{s}]$; C_p: Calor especifico del agua $[\frac{k_j}{k_g\, K}]$; T_a : temperatura del agua de la alberca [°C]; T_{orep}: temperatura del agua de la red, [°C]

Una vez determinadas, se calcularon las diferentes ganancias y pérdidas que presenta el sistema, se sustituyó en la ecuación (7) obteniendo (19), que es la ecuación que permite calcular la evolución temporal del agua de la alberca T_a.

$$T_a^+ = T_a + \left(\frac{\Delta t}{mc_p}\right)\left(Q_{rad} + Q_{util} - (Q_{evap} + Q_{conv} + Q_{emi} + Q_{cond} + Q_{rep}\right) \qquad (19)$$

Para la evaluación numérica de la ecuación (19), se realizó un algoritmo en una hoja de cálculo de Excel. Para realizarla se utilizó una base de datos meteorológicos la cual fue suministrada por la red Hidroclimatológica del departamento de Risaralda, Colombia, particularmente de la estación El Lago, así como los datos de una alberca semiolimpica, de dimensiones 25 x 13 m, con una profundidad de 1.60 m, como se presenta en la tabla 1. El resultado de este ejemplo se presenta en la figura 4, donde se puede apreciar la variación temporal de la temperatura del agua de la alberca (color naranja) y de la variación de la temperatura del aire ambiente (color azul). Se puede apreciar que con el área de colección de 356 m^2 fue suficiente para alcanzar una temperatura de confort del agua de la alberca (27-29°C), lo que permite apreciar el valor del modelo para diseñar un área de colección adecuada.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Constante de Estefan Boltzman	5,67x10^{-08}	$W/m^2.K^4$
Volumen de la alberca	542,7	m^3
Área de colección (Ac)	356	m^2
Área superficial de la alberca (A_s)	271,36	m^2
Calor latente de vaporización (h_w)	2260	kJ/kg
Coeficiente de transmisión de paredes (K)	1,5	$W/(m^2.\ ^0C)$

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Calor especifico del agua (Cp)	4186	$J/kg\,.K$
Coeficiente de transferencia de calor por convección (h_{ca})	4,4	$W/(m^2.\ ^0C)$
Coeficiente de vaporización (h_{evap})	0,064	$W/m^2\,.P_a$
Densidad del agua	1000	kg/m^3
Δt	300	seg
Superficie, paredes y piso (S_{cerr})	416,16	m^2

Tabla 1. Valores numéricos de algunas variables empleados para el ejemplo de aplicación.

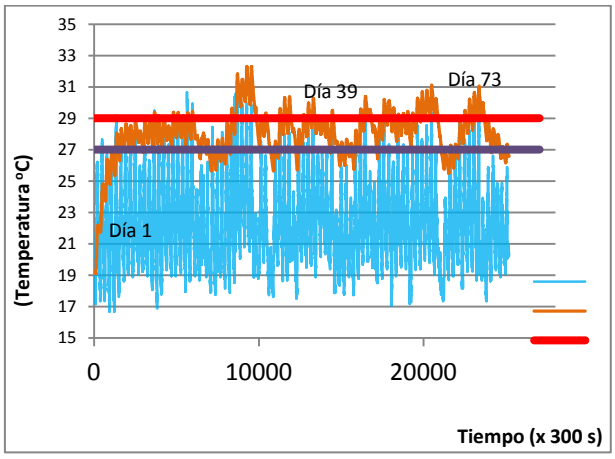


Figura 4. Ejemplo de aplicación del modelo físico matemático para una área de colección de 356 m^2.

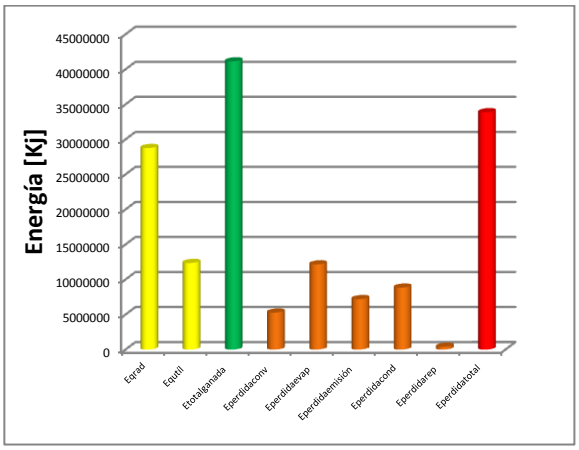


Figura 5. Distribución energética de ganancias y pérdidas de calor para un día típico.

Finalmente la figura 5 muestra un balance de energía de ganancias y pérdidas de calor del sistema termodinámico, donde se aprecia que las ganancias por irradiación directa, aún que se consideró una alberca con una cubierta semitransparente, son muy importantes y mayores que las que puede aportar el campo solar, mientras que las pérdidas por evaporación y convección son las más importantes, aunque cabe destacar que en este ejemplo se consideró el caso de una alberca con cubierta y cerrada, por lo que las pérdidas por evaporación disminuyen de manera importante.

3. Conclusiones

- El modelo físico-matemático acoplado que se presentó para diseñar el campo solar de calentamiento de una alberca cubierta y con calentamiento solar indirecto e híbrido, presentó resultados muy satisfactorios y representa una herramienta de fácil uso.
- El acoplamiento de los dos subsistemas de calentamiento, el solar y el de bombas de calor, se realizó a través del intercambiador de calor, cuya eficiencia térmica es fundamental para el buen desempeño de ambos subsistemas.
- A pesar de que la alberca ejemplo que se utilizó tenía una cubierta semitransparente, las ganancias de calor por radiación directa resultaron ser las más importantes, lo que refuerza la importancia de utilizar este tipo de cubiertas en lugar de las cubiertas opacas.

4. Referencias

[1] Georgina García Pacheco. EVALUACIÓN TÉRMICA E HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE LA ALBERCA DE LA PRIMARIA EJERCITO MEXICANO. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Física. Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. México DF, julio de 2013.

[2] Jorge M. Hincapié Zapata, Beatriz Cruz Muñoz, Rubén Dorantes Rodríguez y Humberto González Bravo. Estudio teórico del comportamiento térmico de una alberca calentada con energía solar en Sogamoso, Colombia. Memorias de la 39 Semana Nacional de Energía Solar, Campeche, Campeche, octubre 2015.

[3] Ernany Sartory. A CRITICAL REVIEW ON EQUATIONS EMPLOYED FOR THE CALCULATION OF THE EVAPORATION RATE FROM FREE WATER SURFACES. Universidad Federal da Paraíba. Silvino Lópes 425/404, 58039-190 Joao Pessoa PB, Brazil. April 1999.

[4] Ernany Sartory. CONVECTION COEFFICIENT EQUATIONS FOR FORCED AIR FLOW OVER FLAT SURFACES. Universidade Federal da Paraíba. Silvino Lópes 425/404, 58039-190 Joao Pessoa PB, Brazil. December 2005.

[5] Iñaki Goñi Echevers, Miguel Ángel Pascual Buisan. CLIMATIZACIÓN DE UNA ALBERCA CUBIERTA EN PAMPLONA. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Tesis para la obtención de Ingeniero Técnico Industrial Mecánico. Pamplona, Febrero de 2013.

[6] Gerson Campoamor Camacho. PROYECTO DE CLIMATIZACIÓN DE UNA ALBERCA SEMI-OLÍMPICA CUBIERTA. Tesis previa a la obtención del título de ingeniería técnica Industrial. Universidad Carlos III de Madrid. Junio 2013.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por el Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magneto Opticas de Nuevos Materiales (GIMM), del Laboratorio de Refrigeración, Fenómenos de Transporte y Energías Renovables de la UAM-A y del proyecto CEMIESOL.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MEXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

ANÁLISIS TÉRMICO DE UN RECUPERADOR DE CALOR OPERANDO EN ESTUFAS DE LEÑA

Vicente Flores, Marcos Bedolla, Francisco Hernández
Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México, Tel: 01 241 41 72010, **e-mail: f117u2@yahoo.com**

Javier Gutiérrez
División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Acapulco, Av. Instituto Tecnológico S/N, Crucero de Cayaco, Acapulco Gro. 39905, México.
e-mail: javiguta12@hotmail.com

RESUMEN

En México 1 de cada 7 (14.4%) cocinan con leña o carbón en estufas con eficiencia entre 5% para fogones abiertos y hasta 30% para aquellas estufas que en su construcción consideran conocimientos técnicos en la selección de materiales, proceso de combustión, transferencia de energía, flujo de fluidos y geometría de la estufa, de lo anterior se deduce que, un alto porcentaje de energía disponible se arroja a la atmosfera a través de los gases de combustión. Por lo anterior, en este trabajo se evalúa el desempeño térmico de un sistema de recuperación de energía de los gases de desecho en chimeneas de estufas de leña. El sistema está compuesto por un intercambiador de flujo cruzado Gas-Agua, diseñado y construido para tal propósito, deposito térmico de 80 l y bomba y tubería hidráulica. El sistema se instala en el ducto de escape de los gases de combustión (chimenea), lo más próximo a la fuente de calor. El sistema opera con flujos de gases de combustión entre 0.0052 y 0.0073 kg/s y temperatura entre 140 y 270°C, un flujo interno de agua que recupera la energía se controla a 0.11 kg/s. De esta formar, se logra recuperar energía para provocar un gradiente térmico a 80 litros de agua, entre 40 y 48°C en un tiempo de 60 minutos, bajo estas condiciones de operación, la energía recuperada corresponde a valores entre 6905 y 7554 kJ y eficiencias entre 58 y 66%.

ABSTRACT

In Mexico 1 of every 7 (14.4%) cooked with wood or coal in stoves with efficiency between 5% for stoves open and up to 30% for those that in its construction consider technical expertise in the selection of materials, combustion process, transfer of energy, flow of fluids and geometry of the stove, it follows from the foregoing that, a high percentage of available energy is thrown into the atmosphere through the combustion gases. Therefore, this paper assesses the thermal performance of a system of energy recovery from waste gases in fireplaces wood stoves. The system is composed of a heat exchanger of the cross flow Gas-water, designed and built for this purpose, deposit 80 l thermal and pump and hydraulic line. The system is installed in the exhaust duct of the combustion gases (fireplace), as close to the source of heat. The system operates with flue gas streams between 0.0052 and 0.0073 kg/s and temperature between 140 and 270°C, an internal flow of water that recovers the energy is controlled to 0.11 kg/s. Of this form, is achieved recover energy to cause a thermal gradient to 80 liters of water, between 40 and 48°C in a time of 60 minutes, under these operation conditions, the recovered energy corresponds to values between 6905 and 7554 kJ and efficiencies between 58 and 66%.

Palabras claves: análisis, recuperador de calor, estufa de leña.

INTRODUCCIÓN

En el sector industrial, comercial y en los hogares existen procesos que requieren energía térmica, la cual es derivada de la combustión, por mencionar en el primer caso; papeleras, cerámicas, alimenticias, la industria textil; en el segundo caso, rosticerías, panificadoras, tintorerías y en el tercer caso en los hogares que usan estufas de leña o gas. La leña cumple una función muy importante en el consumo domestico de energía a nivel rural y forma parte de procesos de producción social que fortalecen tanto la organización comunitaria como la vida familiar. En México es utilizada por 23 millones de habitantes, primordialmente en la cocción de alimentos, calefacción e iluminación. Para su uso se resuelven problemáticas cotidianas mediante tecnologías diversas: la mayoría utiliza fogones abiertos que consisten en tres piedras apoyadas en el suelo alrededor del fuego, así como fogones tradicionales en herradura o en forma de U y tecnologías mejoradas, más limpias y eficientes. De acuerdo con INEGI (2010), cerca de 16.4 millones de personas disponen de la leña como único combustible para cocinar, el restante la usan en combinación con el gas L.P, 5 toneladas es el consumo de leña anual por familia.

En la mayoría de los países en desarrollo la leña es la mejor fuente de energía, para las viviendas principalmente para cocinar a pesar de las implicaciones en la salud que esta fuente de energía pueden, potencialmente involucrar, especialmente cuando se quema en el interior. Se estima que cerca de 2.5 billones de personas en el mundo dependen de la biomasa como su principal fuente de energía para cocinar sus alimentos IEA (2006) considerando la biomasa como leña, carbón y residuos agrícolas. En áreas rurales de países en desarrollo cada habitante consume en promedio anual 640 kg de leña. El uso de leña en los hogares también tiene un impacto negativo para sus usuarios por la degradación del aire interno UNEP (2006). La biomasa, utilizada tradicionalmente para la cocción de alimentos y calefacción de espacios en zonas rurales de los países en desarrollo representa aproximadamente el 8.5% del total de energía total, los usuarios en países desarrollados es de 3% y en los países en desarrollo es del 22%.

Desde hace más de 30 años han difundido en México al igual que en otras partes del mundo-estufas mejoradas, también llamadas "estufas eficientes o ecológicas", todas ellas hacen uso más eficiente de la leña con una mejor combustión y en general cuentan con chimenea que expulsa los gases al exterior de la cocina. Siendo la chimenea el elemento adicional, considerado actualmente en la mayoría de las estufas de leña y de otra fuente de energía para cocinar, para calefacción de espacios y calentamiento de agua para uso domestico, lo cual ha permitido monitorear parámetros termofísicos de las gases de la combustión y poder evaluar el contenido energético que arrastran y que finalmente se deposita en el ambiente.

En el caso de las viviendas en México 1 de cada 7 (14.4%) cocinan con leña o carbón en estufas con eficiencia entre 5% para fogones abiertos y hasta 30% para aquellas estufas que en su construcción consideran conocimientos técnicos en la selección de materiales, transferencia de energía, flujo de fluidos y geometría de la estufa. Para el mejor caso significa que cerca del 70% de la energía entregada por la leña se deposita en el ambiente a través de los gases de la combustión. Mukunda et al., (19884), han estimado la eficiencia de combustión promedio de 15% para la leña y 25% para el carbón respectivamente.

En esta dirección y con el propósito de hacer más eficientes las estufas de leña y reducir la contaminación térmica se presenta en este trabajo una propuesta de captura y manejo de la energía contenida en los gases derivado de la combustión en estufas de leña, así como su evaluación térmica del dispositivo empleado para tal propósito

MARCO TEORICO

El flujo másico en la zona para los gases se emplea la ecuación:

$$\dot{m}_{gas} = \frac{B \cdot V_{gas} \cdot \rho_{gas} \cdot (\overline{T}_{gas} + 273.15)}{273.15} \tag{1}$$

La cantidad de calor a transferir en la zona para los gases mediante la ecuación:

$$Q = \dot{m}_{gas} \cdot c_{p,gas}(T_{gas,ent} - T_{gas,sal}) \tag{2}$$

Flujo másico y calor transferido al fluido que absorbe la energía retirada al gas.

Para determinar el flujo másico en el conducto de la chimenea para el fluido que absorbe la energía retirada a los gases se emplea la ecuación:

$$\dot{m}_{agua} = \frac{B \cdot V_{agua} \cdot \rho_{agua} \cdot (\overline{T}_{agua} + 273.15)}{273.15} \tag{3}$$

La cantidad de calor a transferir al fluido que absorbe la energía de los gases:

$$Q = \dot{m}_{agua} \cdot c_{p,agua}(T_{agua,sal} - T_{agua,ent}) \tag{4}$$

Temperatura del fluido a la salida del recuperador de energía.

Como la cantidad de calor que se transfiere en la zona para los gases es igual a la cantidad de calor que se transfiere en la zona para el fluido (balance de energía) para condiciones estables, se tiene la ecuación:

$$\dot{m}_{gas} \cdot c_{p,gas}(T_{gas,ent} - T_{gas,sal}) = \dot{m}_{agua} \cdot c_{p,agua}(T_{agua,sal} - T_{agua,ent}) \tag{5}$$

Al despejar la temperatura del aire a la salida del recuperador, se obtiene:

$$T_{agua-sal} = T_{agua-ent} + \left[\frac{\left(\dot{m}_{gas}\, C_{p-gas}(T_{gas-ent} - T_{gas-sal})\right)}{\left(\dot{m}_{agua}\, C_{p-agua}\right)}\right] \tag{6}$$

Siendo:

T : temperatura
ṁ : flujo másico
C_p : calor especifico
ρ : densidad del fluido
V: volumen del fluido
B : volumen de combustible

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para cumplir el propósito que se describe en este trabajo se construyó un sistema de recuperación de calor integrando un intercambiador de calor de flujo cruzado con tres lechos de tubos, cada lecho cuenta con 4 tubos con aletas rectangulares figura 1, previamente evaluadas de forma experimental. El intercambiador de calor, figura 2, se coloca dentro de un gabinete metálico figura 3, mediante el cual se instala en la chimenea de las estufas de leña. A la instalación se agrega el sistema de circulación forzada de agua y deposito térmico de almacenamiento.

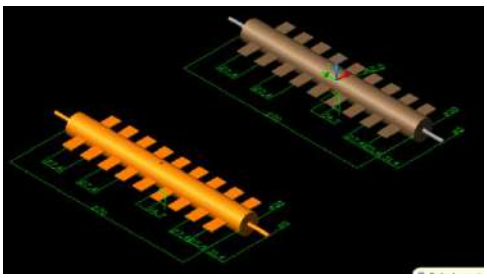


Figura 1. Tubos con aletas rectangulares

Figura 2. Intercambiador de calor de flujo cruzado

Figura 3.-Instalación del recuperador de calor en chimenea de estufa de leña

Las pruebas experimentales se realizaron a una distancia de 1.6 m de distancia con referencia al hogar de la estufa de leña, durante un tiempo de 60 minutos empleando en promedio 1.5 kg de leña de la región (madera de pino). El agua a calentar dispuesta en un depósito térmico fue de 50 litros. El sistema operó como intercambiador de calor de flujo cruzado, donde los gases de la combustión ceden energía y el agua en circulación forzada con flujo másico de 0.07 kg/s gana energía. Los puntos de medición de temperatura del agua se localizaron en la parte inferior y superior del depósito térmico, empleando termopares tipo k, para el registro de la temperatura ambiente y humedad relativa se hizo mediante un termohigrómetro y la velocidad de los gases a través de la chimenea mediante un anemómetro portátil y caudalímetro para el fluido líquido.

RESULTADOS Y ANALISIS

Para los resultados presentados en este trabajo se agrega leña a la estufa en un tiempo promedio de 35 minutos y 20 minutos se mantiene la combustión con flama constante, durante la combustión la velocidad de los gases de desecho oscila entre 0.74 m/s y 0.8 m/s, con temperatura de 270°C. Etapa de máximo contenido de energía. Posteriormente hay un descenso de la velocidad a 0.57 m/s con temperatura alrededor de 167 °C, etapa media de la combustión, donde la flama comienza a ser esporádica. En la última etapa antes de quedar solo los residuos de la combustión sin la presencia de flama, la velocidad es de 0.45 m/s con temperatura promedio de 108°C. Lo anterior corresponde a las características térmicas de los gases de combustión con lo cual se estima la energía disponible a recuperar. Las características que corresponden al fluido en condiciones de absorber energía son: agua con temperatura a 15°C, se hace fluir a través del recuperador de calor con flujo másico de 0.07 kg/s. El aumento en la temperatura del agua para un tiempo promedio de uso de la estufa

de acuerdo a las costumbres de usuario (de 45 a 80 minutos) se grafica en la figura 4. Los resultados de un ensayo semejante en cuanto a las características de gas caliente, pero aumentando el flujo másico del fluido frio a 0.12 kg/s, se grafican en la figura 5; se observa en relación a la figura 4, una disminución en el nivel de la temperatura del agua en el depósito térmico para el mismo tiempo de operación del sistema. En ambas gráficas el valor de la temperatura continua en aumento hasta detenerse en 78°C, sin embargo el tiempo de pruebas se limito a 60 minutos, tiempo promedio mínimo de uso de una estufa de leña UNEP (2006).

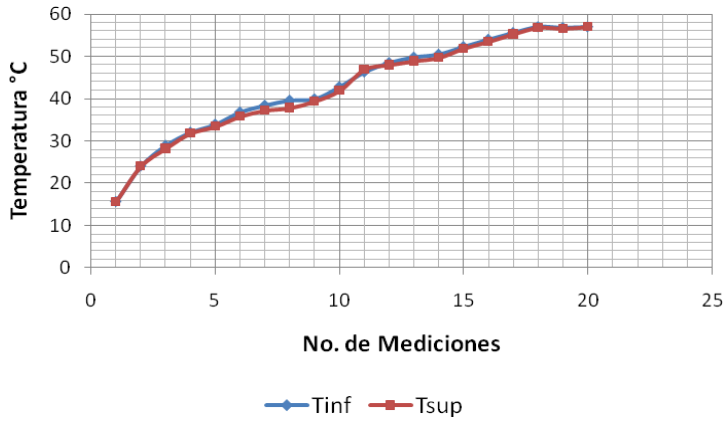


Figura 4.- Evolución de la temperatura del agua en el depósito, $\dot{m}_{H2O}$ = 0.07kg/s, T_{amb} =23°C

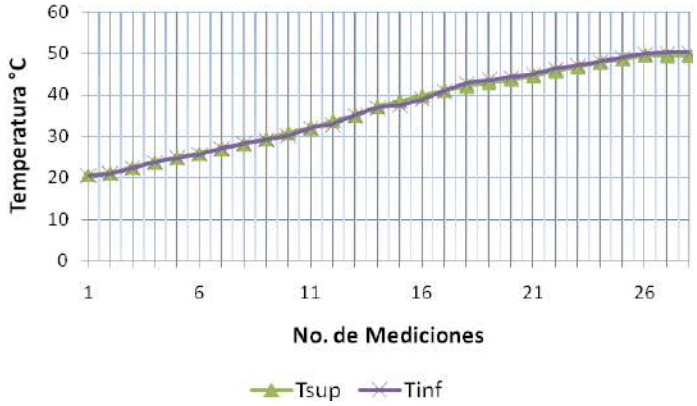


Figura 5.- Evolución de la temperatura del agua en el depósito, $\dot{m}_{H2O}$ = 0.12kg/s, T_{amb}= 15°C

De las diferentes pruebas realizadas predominaron tres valores de flujo másico de los gases a través de la chimenea, derivado de la altura de la chimenea, 3m para el caso de estudio, se reflejaba la influencia de la velocidad del viento en la velocidad de los gases de escape. El viento al pasar en la parte superior de la chimenea genera un vacio en el ducto de de esta, acelerando a salir a los gases de la combustión. En el cuadro 1 se indican los valores predominantes de la velocidad del viento para tres ensayos experimentales, los valores promedio del flujo másico de los gases, la energía disponible, la energía recuperada y la eficiencia térmica del recuperador de calor.

Tabla 1.-Datos del comportamiento térmico del sistema de recuperación

V [m/s]	$\dot{m}$ [kg/s]	E_D [kJ]	E_R [kJ]	η_R [%]
1.5	0.006032	10396.23	6905.18	66.42
1.8	0.00728	11613.23	7145.45	61.52
2.2	0.00926	12873.56	7554.32	58.68

Siendo:
V: velocidad del agua que fluye en el interior de los tubos del recuperador
M: flujo másico de los gases a través del recuperador
E_D Energía disponible en los gases de la combustión
E_R : Energía recuperada
n_R : Eficiencia del recuperador de energía

Se muestra en el cuadro1 que existe una influencia del flujo másico en el desempeño del recuperador de calor, crece el flujo másico proporcional a la energía disponible y disminuye el desempeño del recuperador. El aumento de la velocidad del viento provoca un mayor tiro a través del ducto de la estufa de leña, esto mejora el proceso de combustión y aumenta la energía disponible. Aunque la energía recuperada crece al aumentar el flujo másico, pero no en la proporción en la que aumenta la energía disponible, por lo que la eficiencia térmica del recuperador disminuye.

CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de un intercambiador de calor de flujo cruzado como recuperador de calor, se plantea capturar la energía disponible en los gases de desecho derivados de la combustión en estufas de leña, se instaló y experimento el comportamiento térmico del recuperador de calor, lo último forzado un flujo de agua desde el recuperador de calor hasta un deposito térmico. Se mostró en los resultados, que el desempeño térmico del sistema es dependiente del flujo másico de los gases que a su vez son influenciados por el tiro natural provocado por la velocidad del viento, si la chimenea es de mayor altura, mayor velocidad del gas de la combustión. La eficiencia máxima fue de 66.42% y conforme el flujo aumenta, es decir la energía disponible crece, en mayor proporción a la energía útil, la eficiencia disminuye, por lo que la propuesta para mejorar el desempeño del recuperador es operar el sistema con atención en el control de los flujos, tanto el de gas derivado de la combustión (fluido caliente) como el de agua (fluido frio), tomando en consideración la posible saturación del fluido tanto del que cede energía, como del que absorbe. La aplicación de tecnologías para la recuperación de energía además de hacer uso eficiente de la leña nos permite mejorar procesos térmicos dentro del hogar, como la calefacción de espacios y de agua para aseo personal, además de crear la cultura de Proteger y conservar los recursos naturales, mediante la reducción del consumo de leña en las viviendas y Reducir la emisión de gases calientes a la atmosfera, mediante el consumo eficiente de leña, con el propósito de aminorar el efecto del cambio climático.

REFERENCIAS

Instituto Nacional de Estadistica y Geografia INEGI (2010), www.inegi.org.mx
International Energy Agency (IEA, 2006), www.iea.org.
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP 2006), www.unep.org/spanish.
Mukunda et al., (2003); UNDP/ESMAP,
Bernard F. Kolanowski, BSME (2008), Small-Scale Cogeneration Hand Book, 3rd Edition, The Fairmont Press, USA. 2008
Reyes R., Nelson H., Navarro F. (2015), Constantino Retes. The firewood dilemma: Human health in a broader context of well-being in Chile. Energy for Sustainable Development 28 75-78
Perry R. H. y Green D. W. (2010), Manual del Ingeniero Químico, 4ta edición, Volumen IV, Mc Graw Hill, Madrid España.
Kraus B. (2008), Heat Transfer Handbook . Ed. Wiley.
Avallone E. A., Baumeister T. Marks (2000), Manual de Ingeniero Mecánico. Ed McGraw Hill.
ASHRAE Handbook (1993). pp 34.3, Equipment, USA.
ASTEM, ANSI, DIN. NOM (norma oficial mexicana).
Streeter V. L. (1998), Mecánica de Fluidos. Editorial Mc Graw Hill.
Young M. (2002), Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Editorial Noriega, Limusa.
Mott, R. L.(1999), Mecánica de Fluidos. Editorial Prentice Hall.
Franzini J. B. (2001), Mecánica de Fluidos con Aplicación en Ingeniería. Editorial Mc Graw Hill.

XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"

DISEÑO TÉRMICO EN ESTADO TRANSITORIO DEL CAMPO SOLAR DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN PARA SAN LUIS POTOSI

Mauricio Maciel Pérez[1]
[1]Estudiante de Ing. en Energía, Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo. Avenida Universidad 3000, Lomas de Universidad, CP 59103 Sahuayo de Morelos, Michoacán. Teléfono: 01(353) 532 0762

Humberto González Bravo[2], **Rubén Dorantes Rodríguez**[2] **y Miguel Ángel Gutiérrez Limón**[2]
[2]Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, México, D.F. CP 02200, México. Tel. 01(55) 53189539, rjdrodriguez@live.com.mx, hegb@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto presentar el desarrollo de un modelo matemático para la simulación de un campo de calentamiento solar de canal parabólico acoplado a un sistema de refrigeración térmico por absorción. El modelo matemático se basa en la discretización de las ecuaciones de balance de energía en intervalos de tiempo de 10 minutos, el uso de bases de datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), correlaciones empíricas de transferencia de calor y datos experimentales para la caracterización del campo solar de canal parabólico (CSCP). Los resultados obtenidos con el modelo y su comparación con las corridas experimentales del CSCP sin carga de refrigeración fueron utilizados como base de validación. Como resultados se presentan las relaciones de volumen de tanque de almacenamiento respecto al área de captación para alcanzar una estabilidad térmica necesaria para la operación continua de un sistema de refrigeración con carga constante.

ABSTRACT

This work aims to present the development of a mathematical model for the simulation of a solar heating field coupled to a system parabolic trough thermal absorption cooling. The mathematical model is based on the discretization of the equations of energy balance at time intervals of 10 minutes, using meteorological databases provided by the National Meteorological Service (SMN), empirical correlations of heat transfer and experimental data for the characterization of parabolic trough solar field (CSCP). The results obtained with the model and its comparison with the experimental runs without cooling load CSCP were used as the basis for validation. As results relations storage tank volume relative to the catchment area are presented to achieve necessary thermal stability for the continuous operation of a cooling system with constant load.

Palabras clave: Refrigeración solar, absorción, Calentamiento en Estado transitorio, modelos de simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo presenta la caracterización térmica de un campo de calentadores solares de canal parabólico de media temperatura, para aplicaciones de enfriamiento. El sistema de calentamiento solar cuenta con un arreglo de colectores solares parabólicos conectados en serie como se muestra en la figura 1, y cada colector mide 3 metros de largo, por lo que se tiene una fila de alrededor de 30 metros cuya superficie de captación es de 30m^2. Con ayuda de dispositivos de instrumentación se obtuvieron datos del comportamiento térmico del colector y sus condiciones de flujo.

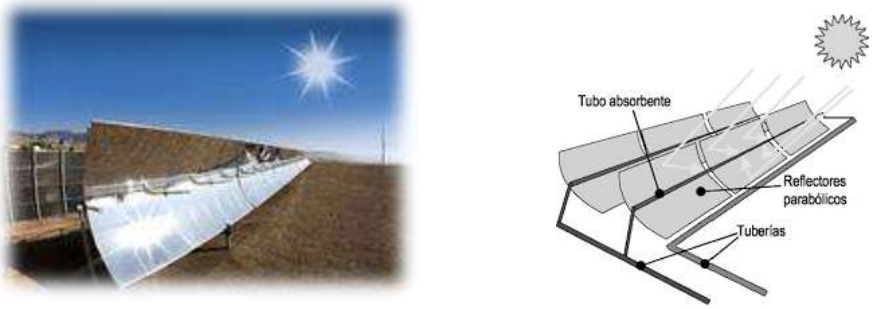


Figura1. Arreglo en serie de colectores solares de canal parabólico.

Procedimiento para obtener el rendimiento térmico del colector solar de canal parabólico.

En México no existen normas para la caracterización de colectores solares de tipo canal parabólico, por lo que se adaptó el protocolo presente en la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005, donde muestra el procedimiento para calcular el rendimiento térmico de colectores solares para calentamiento de agua. De acuerdo con esta norma el rendimiento térmico de un colector solar operando bajo condiciones estables puede ser descrito con la siguiente relación:

$$\eta = \frac{Energía\ entregada\ por\ el\ colector}{Energía\ solar\ incidente\ sobre\ el\ colector} = \frac{\dot{m}Cp(T_{salida} - T_{entrada})}{A_c G} \qquad (1)$$

Dónde: η = Eficiencia térmica del colector; $\dot{m}$: Flujo másico del fluido térmico que circula por el colector (Kg/s); T_e: Temperatura de entrada del fluido térmico en el colector (ºC); T_s: Temperatura de salida del fluido térmico en el colector (ºC); Cp= calor específico del fluido (J/kg K); G = Irradiación global incidente en el colector (W/m^2) y A_c: Área de captación solar (m^2). Si se grafica la eficiencia en función de $(\frac{T_e - T_a}{G})$, donde T_a es la temperatura ambiente, se obtiene una línea cuadrática, que se denomina la curva d eficiencia del colector solar.

Caracterización del colector de canal parabólico.

A partir de los datos experimentales que fueron proporcionados, se procedió a caracterizar el arreglo de colectores de canal parabólico y obtener la curva de comportamiento térmico del mismo. La base de datos proporcionada consta de mediciones para 7 días del año 2014, 3 días con condiciones climatológicas favorables (día soleado y despejado) y 4 días con condiciones no óptimas para la captación solar (cielo nublado). Se recopilaron datos cada 60 segundos y se utilizó aceite térmico como fluido de trabajo. De acuerdo con los datos proporcionados, se obtuvo una curva característica, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = -7{,}7127\ [(Te - Ta)/G]^2 - 0{,}6408\ (Te - Ta)/G + 0{,}8995 \qquad (2)$$

donde η es la eficiencia térmica del grupo de colectores de canal parabólico, Te y Ta son las temperaturas de entrada del fluido térmico al colector y del ambiente, respectivamente y G la irradiación solar.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA SOLAR DE ENFRIAMIENTO

Balance energético del sistema.

La simulación matemática del sistema solar de enfriamiento, está basado en el modelo de la figura 2, donde el campo de calentadores solares está acoplado a un tanque de almacenamiento térmico y este mismo tanque suministra el fluido caliente para la máquina de refrigeración, produciendo agua helada para enfriamiento. Realizando un balance de energía en el acumulador térmico, podemos determinar el comportamiento del sistema en estado transitorio. En la figura 3 se representa el volumen de control, donde Q_{util} es la potencia térmica aportada por el colector solar, Q_p el flujo de calor como pérdidas hacia los alrededores y Q_{Ref} la potencia térmica entregada al sistema de refrigeración. Dentro del tanque tenemos un fluido térmico, donde m es su masa, Cp su calor específico y T_s la temperatura promedio del aceite.

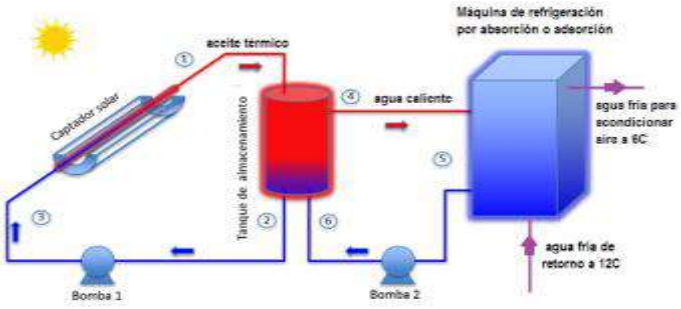


Figura 2. Esquema de operación del sistema de refrigeración solar con acumulador térmico

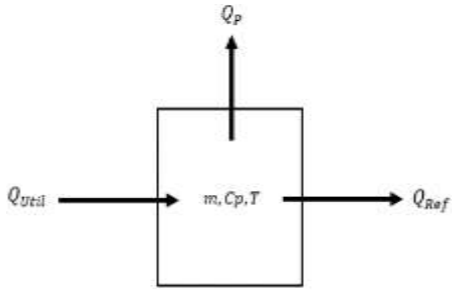


Figura 3. Balance de energía en el acumulador térmico.

Este balance de energía se basa en la primera Ley de la Termodinámica, la cual establece que la energía interna de un sistema cambia dependiendo de la energía que entra y sale de éste y se establece como :

$$Q_{Util} - Q_P - Q_{Ref} = mCp\ \frac{dT_f}{dt} \qquad (3)$$

Donde: Q_{Util}: Potencia térmica aportada por el colector solar (W); Q_{Util}: Potencia térmica aportada por el colector solar (W); Q_P: Potencial total pérdida por el sistema hacia los alrededores (W); Q_{Ref}: Potencia térmica entregada al sistema de refrigeración (W); m : Masa del fluido térmico (Kg); Cp: Calor específico del fluido térmico (kJ/Kg°C); T_f : Temperatura promedio del fluido térmico almacenado en el tanque

(°C) y t: tiempo(s). La ecuación 3 es una ecuación diferencial que depende únicamente de la variable T_f, usando el método simple de integración de Euler se deriva esta temperatura aproximándola por diferencias finitas, es decir:

$$\frac{Q_{Util}-Q_P-Q_{Ref}}{mCp} = f(T) = \frac{dT_f}{dt} \quad (4) \qquad \text{y} \qquad f(T) = \frac{T_{j+1}-T_j}{\Delta t} \quad (5)$$

Donde $T_{(j+1)}$ es la temperatura en un instante j+1, y T_j es la temperatura en el instante anterior j, siendo Δt el gradiente de tiempo entre ambas temperaturas. La entrada y salida de potencia dependen de la temperatura del sistema, por lo tanto el lado izquierdo de la ecuación 4 puede reescribirse en función de T_f, como se muestra. Organizando términos obtenemos:

$$T_f^+ = T_f + \frac{\Delta t}{mCp}(Q_{Util} - Q_P - Q_{Ref}) \quad (6)$$

Donde T_f es la temperatura del fluido térmico y T_f^+ la temperatura del mismo pero un instante Δt después para el cual $(Q_{Util} - Q_P - Q_{Ref})$ permanecen constantes. La ecuación 6 nos permite calcular la evolución térmica del sistema, donde la temperatura en un cierto instante es calculada a partir de la temperatura en el instante anterior más el incremento de temperatura dado por la expresión $f(T)$ en el intervalo de tiempo Δt.

Potencia útil suministrada por el colector solar (Q_{Util}).

La potencia útil se obtiene al realizar un balance entre la energía incidente (en forma de radiación solar) y las pérdidas térmicas. Esta potencia útil es la energía que el colector aporta al fluido térmico que irá hacia el tanque y se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{Util} = \eta G A_c \qquad (7)$$

Donde: Q_{Util}: Potencia térmica aportada por el colector solar (W); η: Eficiencia térmica del colector; G: Irradiación solar global (W/m^2) y A_c: Área total de captación del colecto solar (m^2).

Calor perdido hacia los alrededores del tanque.

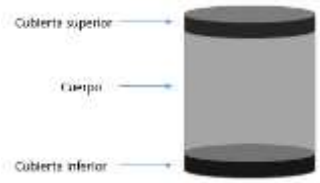
La ecuación que determina el flujo de calor hacia los alrededores viene expresada como:

$$Q_P = U_s A_s (T_s - T_a) \qquad (8)$$

Donde Q_P: Potencia térmica total pérdida en el taque (W); U_s: Coeficiente global de pérdidas (W/m^2 ^oC); A_s: Área del tanque expuesta a la trasferencia de calor; T_s: Temperatura del fluido almacenado (ºC); T_a: Temperatura del fluido externo que retira calor (ºC). Aplicando el concepto de circuito térmico equivalente, la tasa de energía perdida puede rescribirse como.

$$Q_p = \frac{(T_s-T_a)}{R_T} \qquad (9)$$

Donde R_T es la resistencia térmica total correspondiente a la resistencia asociada con el paso de calor a través del tanque. La resistencia térmica de un cuerpo depende de la geometría del medio. Para el análisis se consideró al tanque como un cilindro que cuenta con dos cubiertas planas circulares como se muestra en la figura 5.



En cada uno de los elementos se resuelve el flujo de calor, por lo tanto la ecuación que determina la pérdida total de potencia en el tanque se expresa como:

$$Q_p = \frac{(T_s-T_a)}{R_{cpo}} + \frac{(T_s-T_a)}{R_{cs}} + \frac{(T_s-T_a)}{R_{ci}} \qquad (10)$$

donde R_{cpo}: Resistencia térmica del cuerpo del tanque (ºC/W); R_{cs}: Resistencia térmica de la cubierta superior (ºC/W);: Resistencia térmica de la cubierta inferior (ºC/W).

En cada componente se transfiere calor desde el aceite térmico almacenado hasta el aire que circula sobre la superficie. Se transfiere primeramente por conducción a través del tanque y del aislante, para finalmente ser disipado por el aire circundante mediante convección. Para los efectos de la convección interna en el fluido térmico, se establece una hipótesis simplificativa, donde se considera que el coeficiente interno de transferencia de calor por convección es lo suficientemente elevado como para no desacelerar el proceso de transferencia de calor y por lo tanto la temperatura de la superficie interna del tanque es prácticamente igual a la temperatura promedio del aceite térmico T_s. De esta manera, la red R_{ci} de resistencias para cada componente y su correspondiente ecuación quedan expresados de la siguiente manera:

$$R_{componente} = R_{tanque} + R_{aislante} + R_{aire} \qquad (11)$$

$$R_{cpo} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_{cpo}} \qquad (12)$$

Donde r_1: radio interno del tanque (m); r_2: radio externo del tanque (m); r_3: radio externo del aislante (m) L: Longuitud del tanque (m); k_1: Conductividad térmica del tanque (W/mºC); k_2: Conductividad térmica del aislante (W/mºC); h_{cpo}: Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m^2 ºC).

$$R_c = \frac{L_1}{\pi r_2^2 k_1} + \frac{L_2}{\pi r_2^2 k_2} + \frac{1}{\pi r_3^2 h_c} \qquad (13)$$

Para el cual L_1: Espesor de la cubierta (m); L_2: Espesor del aislante (m); h_c: Coeficiente convectivo de trasferencia de calor para la cubierta. Aunque la resistencia térmica para ambas cubiertas del tanque se calcula de la misma manera, el coeficiente convectivo h_c puede variar en relación al tipo de convección externa predominante.

Convección externa predominante.

Cuando una superficie se expone a flujo externo, el problema involucra tanto convección natural como forzada. La importancia relativa de cada modo de transferencia de calor se determina por el valor del coeficiente Gr/Re^2, donde Gr: es el número de Grashof para la convección natural y Re: el número de Reynolds para la convección forzada. Si el $Gr/Re^2 \gg 1$, las fuerzas de inercia son despreciables y los efectos de la convección natural dominantes. En cambio si $Gr/Re^2 \ll 1$, las fuerzas de flotabilidad son despreciables y se considera que la convección forzada predomina. Para el caso donde $Gr/Re^2 \approx 1$, tanto las fuerzas de inercia como de flotabilidad se presentan por igual y debe de considerarse los efectos de ambas convecciones, en este caso el flujo recibe el nombre de convección mixta.

Coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La ecuación que determina este coeficiente convectivo, se expresa como:

$$h = \frac{Nuk_a}{L_c} \qquad (14)$$

Donde k_a: Conductividad térmica del aire (W/mºC) y Nu: Número de Nusselt, el cual representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. En el número de Nusselt para la convección forzada participan dos números adimensionales: Re (número de Reynolds) y Pr (número de Prandtl). En la convección natural intervienen Pr y Ra(número de Rayleight) $= GrPr$. Las correlaciones y ecuaciones utilizadas para cada componente y cada caso de convección predominante se muestran en la tabla 1.

Donde Re: Numero de Reynolds; V: Velocidad del aire (m/s); L_c: Longitud característica de la geometría (m); υ: viscosidad cinemática del aire (m^2/s); Gr: Número de Grashof; g: aceleración gravitacional (m/s^2); β: coeficiente de expansión volumétrica ($1/ ^oC$); T_s: Temperatura de la superficie expuesta a convección (ºC); T_a: Temperatura del aire (ºC); Pr: Número de Prandtl; ρ: Densidad del aire (Kg/m^3); C_p: Calor especifico del aire (Kj/KgºC); Nu_f: Numero de Reynolds para la convección forzada; Nu_n: Numero de Reynolds para la convección natural; Nu_m: Numero de Reynolds para la convección mixta; Ra: Numero de Rayleight. * Se aplica signo positivo cuando el calor proviene de la parte superior (cubierta inferior) y negativo cuando el calor proviene de la parte inferior (cubierta superior).

Tabla 1. Correlaciones para el Número de Nusselt.

$Re = \frac{VL_c}{\upsilon}$	$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_a)L_c^3}{\upsilon^2}$	$Pr = \frac{\upsilon\rho C_p}{\upsilon^2}$	
	Cuerpo	Cubierta superior	Cubierta inferior
Convección forzada	$\mathrm{Nu_f} = 0.3 + \frac{0.62\mathrm{Re}^{1/2}\mathrm{Pr}^{1/3}}{\left[1+\left(\frac{0.4}{\mathrm{Pr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}}\left[1+\left(\frac{\mathrm{Re}}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$	$\mathrm{Nu_f} = 0.664\mathrm{Re}^{0.5}\mathrm{Pr}^{1/3}$ $\mathrm{Re} < 5\mathrm{x}10^5$ $\mathrm{Nu_f} = 0.037\mathrm{Re}^{0.8}\mathrm{Pr}^{1/3}$ $\mathrm{Re} > 5\mathrm{x}10^5$	
Convección natural	$Nu_n = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right]^2$	$\mathrm{Nu_n} = 0.15\mathrm{Ra}^{1/3}$	$\mathrm{Nu_n} = 0.27\mathrm{Ra}^{1/4}$
Convección mixta	$\mathrm{Nu_m} = [\mathrm{Nu_f^3} + \mathrm{Nu_n^3}]^{\frac{1}{3}}$	$\mathrm{Nu_m} = [\mathrm{Nu_f}^{7/2} \pm \mathrm{Nu_n}^{7/2}]^{2/7}$ *	

3. ALGORITMO DE SOLUCIÓN.

El modelo físico-matemático se desarrolló en una hoja de cálculo donde se programó la ecuación 3.7 para determinar la evolución temporal de la temperatura del aceite en el tanque térmico. El algoritmo calcula una temperatura cada 10 minutos (600 segundos) que es la frecuencia con la que se presentan los datos meteorológicos. El sistema entrega potencia a la refrigeración en los lapsos en de tiempo en los que la temperatura del aceite resulta superior a la temperatura mínima de operación del equipo de refrigeración. Cuando no es suficientemente elevada la temperatura, regresa al colector para seguir calentándose hasta ganar energía suficiente para ello y las únicas pérdidas de energía que se consideran son las que se disipan al ambiente. Los pasos que sigue el programa se describen a continuación:

1.- Se declaran las características de los componentes que forman el sistema y la potencia de refrigeración.

2.- Se establece una temperatura inicial para el tanque T_s a partir de la cual utilizando datos meteorológicos se calculan las pérdidas y ganancias de energía en el sistema.

3.- Se calcula una nueva temperatura para el tanque T_s^+ la cual pasará a ser la temperatura inicial en el siguiente lapso de tiempo.

4.- El ciclo se repite hasta recorrer toda la base de datos meteorológica.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO.

Se simuló la evolución temporal de la temperatura en el tanque para dos de los días reportados en la base de datos, se utilizaron las mismas dimensiones de los equipos que integran el sistema solar y las características del aceite utilizado como fluido de trabajo, estos datos son: Volumen de tanque: 0.11 m3, Espesor del aislante: 0.0254m; Área de captación solar: 34 m^2; Densidad del aceite térmico: 866 Kg/m^3; Calor especifico del aceite térmico: 2,763 J/KgºC. En las figuras 6 y 7 se comparan los valores entre la simulación (línea naranja) y los datos medidos experimentalmente (línea azul). Cada punto de la gráfica representa un intervalo de tiempo de 1 hora (3600 segundos). La figura 3.3. muestra el resultado de la simulación para todo un año típico de San Luis Potosí.

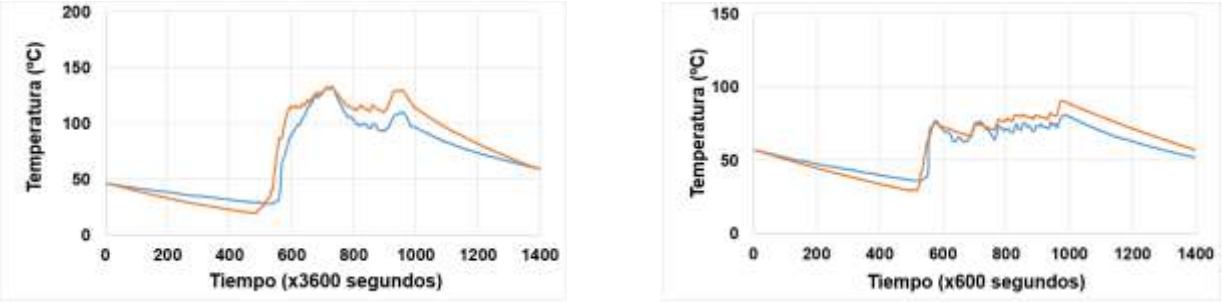


Figura 6 y 7. Validación del modelo para dos días de la base de datos experimentales

5. RESULTADOS.

Dado que en México no se cuenta con equipos comerciales de enfriamiento por medios térmicos solares, que los equipos de refrigeración comerciales manejan potencias por arriba de los 17.5 kW y que sus costos son muy elevados, se buscaron las opciones más económicamente viables. En México se comercializa un refrigerador domestico por absorción de muy baja capacidad marca DOMETIC de 250w, que opera con NH3/H2/H20 y que requiere de una fuente de calor de gas butano, propano o su mezcla (gas LP). No obstante, mediante unas pequeñas modificaciones, es posible trabajarlo con aceite térmico. Según lo estudiado, este equipo requiere temperaturas por arriba de los 140ºC para poder operar. Se simuló el sistema solar para abastecer a 10 equipos de este modelo para una posible aplicación a un conjunto de viviendas.

Se probaron distintos volúmenes de tanque hasta encontrar el tamaño que permite al conjunto de refrigeradores operar la mayor parte de año únicamente con aporte solar. En la tabla 1 se muestra los valores obtenidos para cada volumen de tanque considerando un espesor de aislamiento de 3 pulgadas (0.0762m). De igual manera se simulo el comportamiento térmico del sistema para un año típico de San Luis Potosí con los equipos de refrigeración acoplados y el volumen de tanque optimizado a 1m^3, el resultado se muestra en la figura 8, donde la línea azul representa la temperatura de operación de los equipos de refrigeración y la naranja la temperatura del fluido térmico almacenado en el tanque.

Tabla 2. Fracción del año en el que el sistema de refrigeración funciona para distintos volúmenes de almacenamiento

Volumen de tanque [m^3]	Fraccion anual abastecida [%]
0,3	49
0,5	61
0,8	66
1	**69**
1,5	71

En la tabla 2 es posible observarla variación de la fracción anual abastecida con respecto al volumen de tanque de almacenamiento ocupado. Esta fracción indica el porcentaje del tiempo total que el refrigerador permanecerá encendido a lo largo del año para las condiciones simuladas. Como puede observarse al incrementar de 1 a 1.5m^3 la fracción prácticamente permanece constante por lo que un volumen entre 0.8 y 1m^3 pueden ser volúmenes optimizados. Considerando un volumen de 1m^3 el comportamiento suministrando carga a 10 refrigeradores durante 1 año, se muestra en la figura 8.

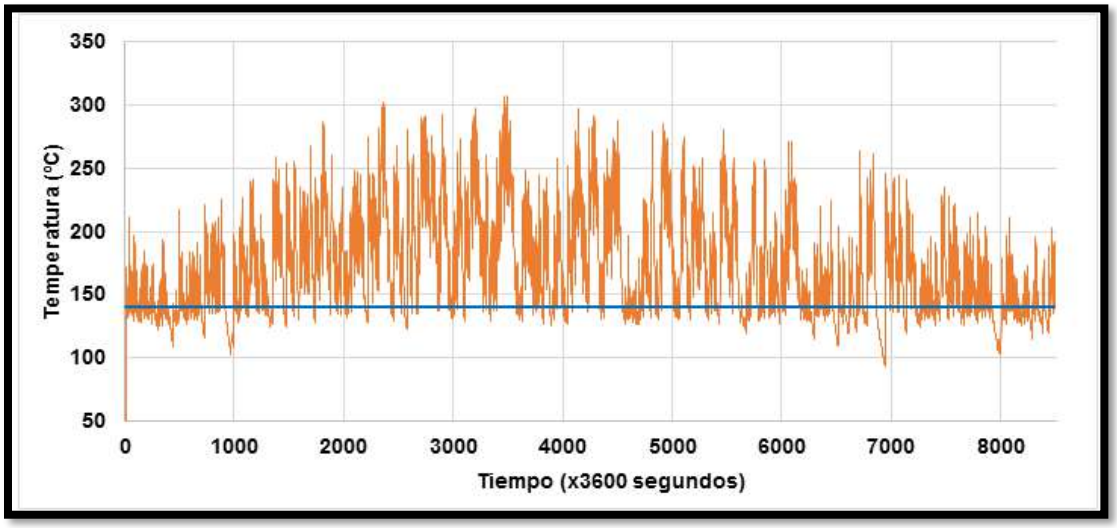


Figura 8. Comportamiento del tanque de almacenamiento térmico para un año típico de San Luis Potosí.

Como puede observarse la mayor parte del tiempo el sistema suministra energía para el funcionamiento de los refrigeradores térmicos con temperaturas por encima de la propuesta de 140ºC. No obstante, es posible observar oscilaciones que van hasta los 300ºC y descienden por debajo de los 140ºC. Esto puede corregirse si se aumenta el volumen de almacenamiento, sin embargo, el aumento de volumen implica sistemas de mayor tamaño y por ende, mayor costo. Como en muchos casos una solución puede encontrarse en el uso de sistemas auxiliares que amortigüen las variaciones de las condiciones de irradiancia o los cambios en las necesidades de calor. Es indispensable observar que el aceite térmico hierve o se descompone cuando supera sus límites de temperatura, por lo que resulta necesario observar las indicaciones establecidas por el proveedor.

6. CONCLUSIONES.

- Se desarrolló un modelo físico matemático que permite simular de manera muy aproximada el comportamiento térmico de un sistema solar. El modelo puede ser utilizado para diferentes modelos de captadores siempre y cuando se conozca su curva de eficiencia. Es una herramienta útil para el dimensionamiento de sistemas térmicos versátil pues permite simular diferentes condiciones de demanda de energía, energía captada, fluidos de trabajo y condiciones ambiente.
- Respecto al sistema simulado fue posible observar que no alcanza en la totalidad del año la temperatura requerida por el subsistema de refrigeración. No obstante, se buscó que pudiera mantenerse a más del 60% del año con energía solar. Tal complicación, así como las variaciones tan grandes en la temperatura de almacenamiento, pueden ser eliminadas mediante el uso de un sistema auxiliar a base de gas.
- El volumen óptimo de almacenamiento para este sistema es de 1m^3, el cual brinda potencia al equipo de refrigeración en un 69% del año solo con aporte solar. Como recomendaciones, el tanque debe permanecer resguardado y con el mejor aislamiento térmico posible para evitar al máximo la energía perdida.

7. REFERENCIAS:

1. Hincapié J. (2015). Estudio teórico experimental del comportamiento térmico de una piscina calentada con energía solar. Tesis de Ing. Física. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2015.
2. Diario Oficial de la Federacion (14 de Octubre del 2005). Norma Oficial Mexicana NMX-ES-001-NORMEX-2005.Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores para calentamiento de agua- Métodos de Prueba y Etiquetado.
3. Duffie J.A. and Beckman W.A. (2013). Solar Engineering of Solar Processes. Wiley Interscience, New York, USA.
4. Cengel Y.A and Ghajar J.A. (2011). Transferencia de calor y masa. McGraw-Hill Companies, Ciudad de México, México.
5. Incropera F. and DeWitt D. (2006). Fundamentals of heat and mas transfer.
6. García G (2013). Evaluación térmica e hidráulica del sistema de calentamiento solar de la alberca Ejercito Mexicano. Proyecto Terminal de Ing. Física, Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por el Laboratorio de Refrigeración, Fenómenos de Transporte y Energías Renovables de la UAM-A y del proyecto P13 del CEMIESOL, así como del Programa Delfín de la SEP.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

DISEÑO TÉRMICO DE UN SISTEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AIRE EN EL INVERNADERO DE ARBORICULTURA DE LA UAM AZCAPOTZALCO

Daniel Bernardo Casahonda, Jesús Casarrubias Nava, Humberto González Bravo y Rubén Dorantes Rodríguez

[3]Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, México, D.F. CP 02200, México. Tel. 01(55) 53189539. dcasa_bravo@hotmail.com, om21m@hotmail.com, hegb@correo.azc.uam.mx, rjdrodriguez@live.com.mx

RESUMEN

El objeto de este trabajo, consistió en analizar el comportamiento del invernadero de arboricultura de la UAM Azcapotzalco, con el fin de controlar la temperatura en su interior. Según datos experimentales entregados por los usuarios, se encontró que en determinadas épocas del año las temperaturas internas alcanzaron los 39°C, provocando la propagación de plagas como son la telaraña, araña roja, mosca blanca, etc., perjudicando las especies cultivadas.

Haciendo uso de la metodología de la ASHRAE se determinó la carga térmica en el invernadero. Posteriormente y utilizando el modelo de cálculo de cargas se analizaron diferentes alternativas, tales como el uso de sistemas convencionales de enfriamiento y extractores, hasta el uso de sistemas pasivos tales como parasoles y mallado de control solar. Dadas las bajas temperaturas al exterior, se concluyó que el uso de sistemas pasivos o de bajo consumo energético, es completamente viable para el control de la temperatura en el invernadero.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the behavior of a UAM Azcapotzalco´s arboriculture greenhouse, in order to control the inside temperature. According to experimental data provided by users, internal temperatures of 39 ° C were found at certain season of year, causing the spread of pests such as spider webs, spider mites, whiteflies, etc., harming the crops.

Using the ASHRAE methodology, the thermal load of the greenhouse was determined. Subsequently, using the load calculation model different alternatives, such as the use of conventional cooling and exhaust systems were analyzed, also the use of passive systems such as sunshades and solar control meshing. Given the low outside temperatures, it was concluded that the use of passive or low energy consumption alternatives, are entirely feasible to control the temperature in the greenhouse.

Palabras claves: Invernadero, acondicionamiento de aire, diseño térmico

1. INTRODUCCIÓN

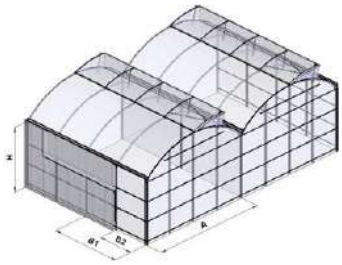
El uso de invernaderos ha permitido cambios importantes para la producción agrícola. Actualmente, se construyen todo tipo de invernaderos algunos con diseños aerodinámicos e innovadores, buscando el mismo fin, que es mantener un ambiente controlado para brindar las condiciones necesarias, para un desarrollo adecuado de los productos cultivados.

De acuerdo a la norma NMX-E255-CNCP-2008 para la construcción de invernaderos, un invernadero es una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslucida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior [4].

Los invernaderos además de permitir el cultivo de especies en lugares cuyas condiciones no son propicias para su desarrollo, han auxliado los cultivos en cualquier temporada del año incrementando la producción agrícola. Diferentes diseños han sido desarrollados con el fin de aprovechar en algunos casos las corrientes de aire para ventilar, en otras para el aprovechamiento de la luz solar (ver figura 1). De la correcta selección del tipo de invernadero, dependerá la facilidad en el manejo de las condiciones internas al invernadero. Normalmente, una temperatura adecuada para el manejo general de diferentes plantas, oscila entre los 12 y 28ºC. El caso de la humedad maneja rangos elevados y de manera general es poco necesario su control. No obstante, es necesario remarcar que un inadecuado manejo de la humedad puede ser un factor que propicie el desarrollo de plagas.

Diferentes tecnologías han sido empleadas para que aunadas al diseño de los invernaderos, permitan el control de las condiciones internas de la temperatura como principal variable. Algunos trabajos mencionan el desarrollo de sistemas de calentamiento termohidrónicos [1], el uso de sistemas multiniveles con paredes retractiles para el control de temperatura [2], otros el uso de resistencias eléctricas y focos incandescentes para calentar y extractores para enfriar, controlados mediante tarjetas arduino [3].

En este trabajo se analizará la posibilidad de mejora para el control de la temperatura dentro del invernadero de arboricultura de la UAM Azcapotzalco. La razón de este trabajo se fundamenta en la evidente necesidad de control térmico presentada por los usuarios, al referir que en temporadas de calor es posible alcanzar temperaturas internas de hasta 50ºC.



a) Invenadero tipo Asimétrico

b) Invenadero tipo capilla

c) Invenadero tipo túnel

Figura 1 Diferentes tipos de invernadero

2. METODOLOGÍA.

DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO DE ARBORICULTURA

El invernadero que analizamos en este proyecto se encuentra ubicado en la azotea del edificio W cuerpo A, de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. En este invernadero se cultivan diferentes tipos de árboles y plantas con motivos primordialmente de investigación. El invernadero es del tipo asimétrico, constituido principalmente de vidrio, pequeñas bardas perimetrales de ladrillo y estructura tubular de acero (ver figura 2).

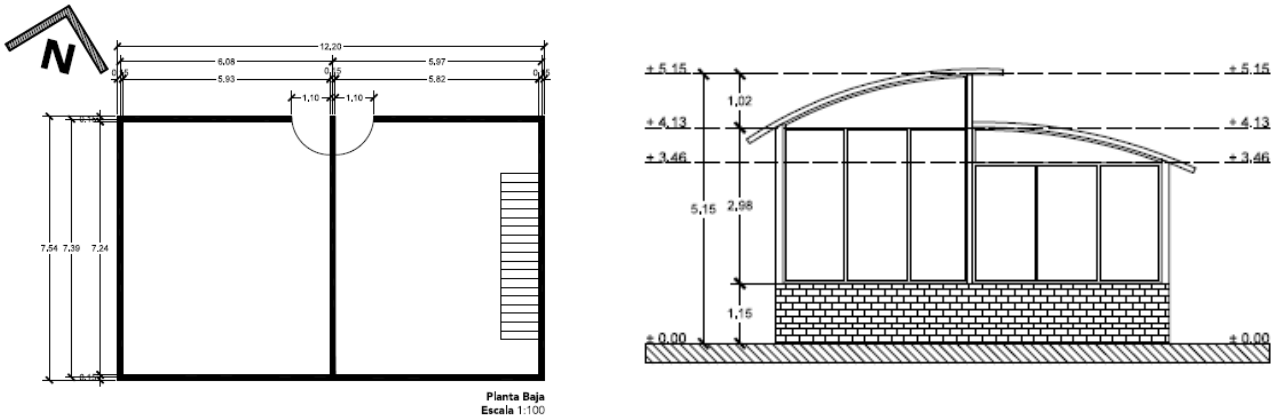


Figura 2 Vista de planta y lateral del laboratorio de arboricultura (cotas en metros)

Resulta importante remarcar que este invernadero se encuentra ubicado entre otros dos invernaderos en sus costados este y oeste pertenecientes a diferentes laboratorios. Actualmente cuenta con 4 extractores axiales de la marca S&P Modelo HCM-225 N, con una capacidad máxima de 695 m3/h, utilizados regularmente para la extracción de aire en sanitarios. Se ha probado en ocasiones el uso de malla sombra para el control solar, sin embargo la temperatura interna aún no ha podido controlarse.
A continuación se presenta inicialmente el procedimiento de calculó de la carga térmica que recibe el invernadero en sus condiciones originales.

CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DEL INVERNADERO EN SU ESTADO ACTUAL

Para el cálculo de la carga de calor se separaron las fuentes térmicas de la siguiente manera:

- Ganancia por estructuras (Paredes, techo y envolvente)
- Ganancia por equipos
- Ganancia por personas

Ganancia de calor por estructuras

Inicialmente es necesario calcular la superficie de cada sección y conocer los materiales. En la tabla 1 se resume la información encontrada para el invernadero. Es posible apreciar que la mayor superficie libre es la del techo, que a la par es la que mayor horas de sol recibe, admitiendo la gran parte del calor. Las paredes este y oeste cuentan con superficies también son gran tamaño, y sumadas pueden alcanzar una ganancia de calor mayor a la del techo, calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U\ A\ DTCE_e \qquad (1)$$

Donde: Q = ganancia de calor por el exterior a través de paredes, techo o vidrio (W). U= coeficiente de transferencia de calor (W/m^2K). A= área de la pared, techo o vidrio (m^2). $DTCE_e$= diferencia de temperatura para la carga de enfiremiento (K).

Para el cálculo del área es necesario considerar las dimensiones del recinto. Los valores de U considerados, son valores experimentales encontrados en la bibliografía y los utilizados se presentan en la tabla 2.

Tabla 1 Cálculo de superficies en el invernadero de arboricultura

PARED ESTE	MATERIAL	ANCHO (m)	ALTURA (m)	ÁREA (m2)	ÁREA FINAL(m2)	AREA FINAL (ft2)
	Ladrillo	7.24	1.15	8.33	8.33	89.62
	Ventanas altas	3.62	4	14.48		
	Ventanas bajas	3.62	2.98	10.79	25.27	271.98
PARED OESTE						
	Ladrillo	7.24	1.15	8.33	8.33	89.62
	Ventanas altas	3.62	4	14.48		
	Ventanas bajas	3.62	2.98	10.79	25.27	271.98
PARED SUR						
	Ladrillo	5.93	1.15	6.82	6.82	73.40
	Ventana	5.93	2.98	17.67	17.67	190.21
PARED NORTE						
	Ladrillo	5.93	3.46	20.52	20.52	220.85
TECHO						
	Vidrio	5.93	7.24	42.93	42.93	462.13

Tabla 2 Valores experimentales para los materiales considerados

MATERIAL	U (BTU/h ft^2 °F)
Vidrio vertical	1.04
Ladrillo	0.415
Puerta	0.58
Piso de concreto	0.59
Vidrio horizontal	0.83

La DTCE$_e$ considera la temperatura entre el recinto y el medio ambiente y toma en cuenta el efecto de almacenamiento térmico o inercia. Igualmente los valores de la DTCE se obtuvieron de la bibliografía que contienen una lista de valores de DTCE para algunas formas de construcción de paredes y techos. Estos valores se basan en una temperatura de diseño interior de 25°C y una temperatura exterior, promedio diario, de 30°C. Por lo anterior, los valores de DTCE se deben corregir respecto a las temperaturas reales con la siguiente ecuación:

$$DTCEe = [(DTCE_e + LM) \times K + (78 - t_R) + (t_0 - 85)] \times f \quad (2)$$

Donde: DTCE$_e$ = valor corregido de DTCE en °F. DTCE = temperturas halladas en la literatura. LM corrección para latitud, color y mes. K= corrección debido al color de la superficie. tR= temperatura del reciento en °F. t_0 = tempertura de diseño exterior promedio. F= factor de corrección para ventilación del cielo raso. Los valores de K se pueden tomar de la siguiente manera: K=1 para superficies oscuras o áreas industriales. K=0.5 para techos de color. K= 0.65 para paredes de color claro. Los valores de f= 0.75 para ventiladores de entre piso (techo falso). En los demás casos se utilizó un valor de f = 1.0

Los valores obtenidos para la ganancia térmica debida a este rubro se resumen en la tabla 3.

Tabla 3 Ganancia térmica debida a muros, techos y vidrios por conducción y convección.

PARED ESTE	DTCE (°F)	LM	K	f	DTCE CORREGIDA (°F)	Q(BTU/h)	Q(W)
Ladrillo	32	-1	0.65	1	4.15	154.35	45.24
Vidrio	13	0	1	1	-3	-848.57	-248.72
PARED OESTE					-16		
Ladrillo	11	-1	0.65	1	-9.5	-353.33	-103.56
Vidrio	13	0	1	1	-3	-848.57	-248.72
PARED SUR					-16		
Ladrillo	16	-3	0.65	1	-7.55	-229.99	-67.41
Vidrio	13	0	1	1	-3	-593.47	-173.94
PARED NORTE					-16		
Ladrillo	9	-2	1	1	-9	-824.88	-241.77
TECHO					-16		
	13	0	1	1	-3	-1150.70	-337.27
						TOTAL	-1376.15

Como es posible observar, el resultado de Q total es negativo debido a que el interior regularmente se encuentra más caliente que el exterior, de modo que se pierde calor en el recinto. De esta manera, el mismo invernadero permite que no se alcancen temperaturas superiores a los 50ºC tal como se observó en la simulación realizada y por datos proporcionados por los usuarios. Para el caso de las ganancias por radiación solar directa en los vidrios la ganancia neta de calor a través se puede determinar de la siguiente manera:

$$Q = FGCS \times A \times CS \times FCE_M \quad (3)$$

Donde: Q = ganancia de calor neta por rqdiación a través de superficies transparentes (BTU/h). FGCS = factor de ganancia máxima de calor solar (BTU/h-ft^2). A = área del vidrio (ft^2). CS = coeficiente de sombra. FCE = factor de carga de enfriamiento para el material.

El valor de FGCS se obtiene de datos de la literatura, considerando la orientación, mes y latitud del lugar acondicionado. El coeficiente de sombra es un valor adimensional que muestra la cantidad proporcional máxima de calor tomando en cuenta diferentes tipos de vidrio igualmente obtenido de la literatura.
El FCE considera el almacenamiento de calor causado por la radiación solar; los valores que debe tomar este factor aparecen en la literatura, se debe hacer notar que hay listas para construcciones ligeras (L), medianas (M) y pesadas (P). Al final de la tabla 4 se enlista

como se utiliza cada uno de estos tipos de construcción. En esta tabla podemos observar que la mayor ganancia se da por las paredes este y oeste debido a que los factores FGCS y FCE son mayores que para el techo según la latitud del lugar.

Tabla 4. Ganancia de calor por radiación a través de vidrios.

PARED ESTE	FGCS (BTU/h-ft2)	A (ft2)	CS	FCE	Q (BTU/h)	Q(W)
	246.85	271.98	1	0.32	21484.10	6296.99
PARED OESTE						
	246.85	271.98	1	0.4	26855.13	7871.24
PARED SUR						
	43	190.21	1	0.58	4743.92	1390.44
PARED NORTE						
	0	0	0	0	0.00	0.00
TECHO						
	43	462.13	1	0.5	9935.78	2912.18
				TOTAL	**63018.92**	**18470.85**

Ganancia de calor por equipos

El invernadero cuenta con 6 luminarias de 40W cada una, que incluyendo el balastro con 25% extra de la potencia, se obtiene una ganancia de 300W.

Por otra parte, se cuenta con 4 extractores de 40W de la marca S&P modelo HCM-225 N obteniendo una potencia total de 160W.

Ganancia de calor por personas

Las personas son una variable importante a considerar durante el cálculo de la carga térmica. La cantidad de calor que una persona disipa depende de la actividad que esté realizando. En la literatura es posible obtener una lista de valores para algunas actividades típicas [Pita]. La cantidad de calor aportada por las personas debe ser considerada en dos partes, la de calor sensible y la de calor latente. Algo del calor sensible se puede absorber por el efecto de almacenamiento de calor, pero no el calor latente [Pita]. La suma de estas dos será la ganancia total calculada como:

$$Q = q_S \times n \times FCE_P \qquad (4)$$

$$Q_l = q_l \times n \qquad (5)$$

Dónde: Q_S y Q_l = ganancias de calor sensible y latente (W), respectivamente. q_S y q_l = ganancias de calor sensible y latente por persona, respectivamente (W/persona). n = número de personas. FCE_P = factor de carga de enfriamiento para las personas.

El factor FCE involucra el almacenamiento de calor, en este caso se aplicado a las personas; si el sistema de acondicionamiento de aire se apaga durante la noche, no se debe incluir almacenamiento de calor y entonces FCE=1.0, en la literatura se encuentra una lista del valor de FCE para las personas y en la tabla 5 un ejemplo numérico.

Tabla 5 Ganancia de calor aportada por personas

NUMERO PERSON	Calor sensible (BTU/h)	Calor latente (BTU/h)	FCE	Qs (BTU/h)	Ql (BTU/h)	Qs (W)	Ql (W)
4	315	325	0.58	730.8	1300	214.19748	381.03
				TOTAL (BTU/h)	2030.8	TOTAL(W)	595.22748

.

Debido a que normalmente en este invernadero no está constantemente ocupado por personas, y que estas no llegan a realizar un trabajo físico fuerte, la ganancia es muy pequeña comparada respecto a la ganancia que se obtuvo por radiación. En suma las ganancias de calor se calculan alrededor de 18.16kW, de las que el 88% corresponden a las ganancias de calor por radiación en los vidrios. Por otra parte se calculan las pérdidas de calor debidas a infiltraciones en ventanas o ventilas.

Pérdidas de calor

Dado que el ambiente exterior se encuentra a una temperatura menor que el invernadero, también existen pérdidas de calor. El invernadero estudiado cuenta con entradas de aire natural mediante una ventila (louver) que se encuentra en la puerta en la pared norte, o cuando abrimos las ventanas. Para este caso las ventanas abiertas no se consideraron como una pérdida de calor, debido a que estas en la mayor parte del tiempo están cerradas. Las infiltraciones por aberturas tampoco se consideraron, pues los marcos de puertas y ventanas se encuentran totalmente sellados. También existen para este caso las pérdidas que se llevan gracias a los extractores.

$$Q = m \times c_p \times (T_{ext} - T_{int}) \qquad (6)$$

Donde: Q = es la pérdida de calor por infiltración (kW). M = flujo másico (kg/s). Cp = calor específico del aire (kJ(kg K). Text = temperatura del aire exterior del recinto (°C). Tint = temperatura del aire interior del recinto (°C).

Dado que el caudal por extractor es de 695m^3/h, el flujo másico total por 4 extractores, es de 3,347kg/h permitiendo un total de casi 14 renovaciones por hora, extrayendo 4.68kW de energía térmica. Para el caso de puertas y ventanas se calculó la velocidad de entrada del aire mediante un termo anemómetro de hilo caliente en diferentes horarios y se consideró una velocidad promedio estimada en 0.5m/s, el ancho de la ventila de 0.8m y la altura de 0.69m. Por lo anterior, el caudal calculado fue de 496m^3/h y un flujo másico de 598kg/h, permitiendo una disipación de calor de 0.84kW. Con ello la diferencia entre las ganancias y las pérdidas permiten obtener una carga térmica total de 12kW o 3.43Toneladas de Refrigeración. Gráficamente es posible observar el balance de energía en la figura 3.

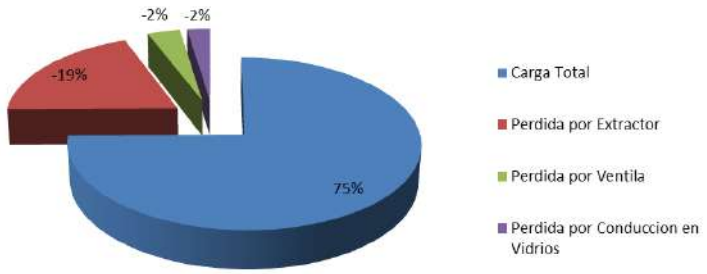


Figura 3. Balance de energía (cargas térmicas) en el invernadero.

Considerando que el invernadero estudiado se encuentra ubicado entre otros dos de características similares, se estima un aumento en la carga de 0.4 TR, dado que la temperatura de estos también supera los 30ºC, dado que cuenta~~n~~ con malla sombra obteniendo una carga de 3.8TR. Con ello se analizaron diferentes propuestas para el control de la temperatura mediante el uso de sistemas pasivos o activos de bajo consumo de energía.

3. PROPUESTAS
PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA INTERNA

Las propuestas analizadas fueron las siguientes:

1. Película en vidrios de pared sur y techo.
2. Malla sombra en el techo.
3. Para sol en el sur.
4. Malla sombra en el techo y pared sur con parasol.
5. Malla Sombra en el techo, película en paredes este y oeste, y para sol al sur.

Para el primer caso y utilizando un coeficiente de sombra de 0.7 y los 4 extractores actuales, la carga calculada fue de 3.22TR. En el segundo caso, en el que solo es ocupada la malla sombra, se determinó que la carga térmica prácticamente permanece constante puesto que la radiación no se elimina por la malla sombra, y termina por calentar el espacio por encima de la mallasombra. Si la pérdida de calor por convección o por la salida de aire debida a los extractores es mayor a la energía recibida, una cantidad de la energía se pierde estimando que la carga disminuye a 3.39TR. Para el caso del uso de parasoles, la carga térmica disminuyó a 3.31TR. Al utilizar malla sombra y parasol de lado sur la carga térmica se estima de 3.23 TR. Al utilizar la suma de cada una de estrategias, la carga aún es de 2.83TR

De lo anterior se concluye que con los sistemas pasivos propuestos no es posible disminuir es mas de 1TR la carga térmica, por lo que se decidió analizar el uso de extractores de mayor capacidad. Haciendo uso del modelo de cálculo de cargas se seleccionó un nuevo extractor para aplicaciones comerciales e industriales y con un flujo adecuado de la temperatura del aire en el invernadero. El extractor seleccionado es de la marca S&P modelo TTB-500 con un caudal de 8,500 m^3/h resultando una carga de 0.43TR, permitiendo manejar temperaturas entre 25°C y 30°C. Finalmente, se realizó un análisis económico que consistió en comparar el manejo de la carga de dicho invernadero mediante el uso de un mini Split y los extractores propuestos con una malla sombra.

4. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LAS PROPUESTAS DE ACODICIONAMIENTO

En este caso se evalúan dos alternativas mutuamente exclusivas. La primera de ellas consiste en el uso de un Mini-Split de 4TR de la Marca York modelo YHFFYC060BBA-BX, con una demanda de potencia de aproximadamente 5,000 W. La segunda alternativa consiste en el uso de películas con protección solar en los vidrios Sur y Techo y colocando ~~con~~ un extractor industrial de la marca S&P modelo TTB-500. Para el caso de los vidrios este y oeste no se contempla la película protectora, pues el invernadero evaluado se encuentra entre otros dos que le protegen en esos extremos mediante el uso de malla sombras. Esta última característica, no permite que la radiación incida en los ventanales de este y oeste. No obstante, la alta temperatura que alcanzan los invernaderos de los costados induce una carga al invernadero evaluado, por conducción de calor.

- Sistema: Mini-Split

Costo del Mini Split: $34,800. Costo de Extractor: $6,995. Costo de Película de Control Solar: $220/m2 ~~por m2~~ . Área a cubrir con películas de control solar 61m2. Costo de película de control solar: $13,420.00. Demanda de potencia eléctrica: 5,000 [W]. Factor de tiempo de encendido: 0.6. Horas de Uso: 9 [horas]. Consumo: 27,000 Wh. Precio 1kWh= $0.75. Consumo de energía eléctrica por día: 27 kWh. Consumo de energía eléctrica por año:(27kWh/día)(365dias)= 9,855 kWh. Costo por día= (27kWh) ($0.75)= $20.25/día. Costo anual por uso= ($20.25) (365)=$7,391.25/año

- Sistema: Extractores + Micas

Demanda de potencia eléctrica: 590W. Horas de Uso: 9 horas. Consumo: 5,310Wh. Precio 1kWh= $0.75. Factor de tiempo de encendido: 1. Consumo de energía eléctrica por día: 5.31kWh. Consumo de energía eléctrica por año:(5.31kWh/día)(365dias)= 1,938.15kWh. Costo por día= (5.31kWh)($0.75)= $3.98/día. Costo anual= ($20.25)(365)=$1,453.61/año. Ahorro de Energía Eléctrica Mini Split Vs. Extractor Industrial . Ahorro = costo Mini-Split - costo Extractores + Micas. Ahorro= $7,391.25/año - $1,453.61/año. Ahorro (año)= 5,937.64 pesos. Periodo de recuperación de la Inversión: (6,995+13,420) / (5,937)=3.44 años

5. CONCLUSIONES

- Se analizaron diferentes alternativas con el fin de proponer y evaluar técnica y económicamente ~~como económico~~ una alternativa para el control de la temperatura y la humedad interna del invernadero de arboricultura de la UAM-A.
- El invernadero instalado en la UAM es de tipo Inacral, que permite un buen aprovechamiento de la luz solar, útil para climas fríos~~.~~ y que es un invernadero adecuado a la aplicación, pero el lado sur debió ser considerado para la construcción del muro que actualmente está del lado norte. Esto pudo evitar el problema de calentamiento que enfrenta, dado al ventanal ubicado en el costado sur.
- El invernadero requiere de un sistema de acondicionamiento de aire de 4TR para poder mantener el invernadero a 25°C, pero consideramos que es posible manejar la carga térmica utilizando sistemas pasivos ~~o~~ de "bajo" consumo de energía.
- Los extractores con los que actualmente cuenta el invernadero, resultan insuficientes y no son adecuados para ésta aplicación. y no lograron controlar la carga térmica en los días cálidos.
- En el lado sur fue evaluado el uso de parasoles y se descartó finalmente dado el alto costo. Así, se decidió utilizar películas de control solar en la parte sur y en el techo, ya que estas películas reflejan gran cantidad del espectro UV y no permiten el ingreso de calor por radiación. En los costados este y oeste del invernadero no se consideró película dado que existen unos invernaderos en los costados con malla sombra instalada. Sin embargo, dado que el invernadero a controlar tendría menor temperatura que sus costados, agregan carga por conducción al sistema. Se sugiere que en paralelo, los invernaderos contiguos también se les aplique la película protectora.
- El caso de malla sombra resulta una alternativa viable, cuando el costo de instalación de película protectora implique un costo mayor. La desventaja observada es que el ingreso de energía es pleno y solo detiene su paso a niveles inferiores del invernadero.
- Otra posible solución sea el uso de malla sombra en techo y película protectora al sur con un extractor industrial de ¾ de HP. Para esta última alternativa se encontró que el periodo de recuperación de la inversión fue de 3.4 años al compararse con un sistema de acondicionamiento de aire de 4TR.

6. REFERENCIAS

[1] Duffie J.A. and Beckman W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes, p. 137. Wiley Interscience, New York, USA.

[2] Mandal N.K. and Mandal T. (1994). Analysis of a steam generating system using linear concentrator, Energy, Vol 14, No. 9, p. 999-1003.

[3] Ray R. (1981). Nonlinear dynamics model of a solar steam generator, Solar Energy, Vol. 26, No. 4, p. 297-306.

[4] Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos.(NMX-E-255-CNCP-2008). Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, A.C.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido por el proyecto P-13 del CEMIESOL-CONACYT.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SECADO DE NOPAL PARA ELABORACIÓN DE PALANQUETA

Adolfo G. Finck-Pastrana
Laboratorio de Energía Térmica Solar,
Departamento de Física y Matemáticas,
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México.
Prol. Paseo de la Reforma #880, Lomas de Santa Fé,
C.P. 01219, México, D.F. MÉXICO.
Tel.: (52)(55)(5950-4085), Fax.: (52)(55)(5950-4284).
e-mail: adolfo.finck@ibero.mx

RESUMEN.

El agua contenida en los alimentos permite la proliferación de microrganismos y el desarrollo de reacciones químicas que los deterioran. Cuando se requiere conservar los alimentos por algún tiempo, una alternativa es secarlos o deshidratarlos removiendo el agua contenida en ellos. Hay varios métodos para lograrlo, el más simple es exponer los alimentos a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad. Existen diversos tipos de secadores solares para lograr un tratamiento adecuado del producto. Los dos elementos básicos de un secador solar son el colector donde la radiación solar calienta el aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire caliente que pasa a través de ella. Estos elementos pueden diseñarse para que se integren al equipo en distintas formas. En un Secador Solar Indirecto como el utilizado en este trabajo, los dos elementos están separados, el aire es calentado en el colector de modo que la radiación solar no incide sobre el producto colocado dentro de la cámara de secado que es opaca, en este tipo de secadores el control del proceso de secado es más simple. Tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara de secado es opaca, este sistema permite secar en forma conveniente productos como el Nopal (Opuntia Lasiacantha) que se pueden dañar por una exposición directa al sol. Se presenta la limpieza y cortado de la penca de Nopal, así como su proceso de fermentación y lavado previos al secado solar. Se obtienen curvas de secado de Humedad Base Seca vs. tiempo (X vs. t) y de Velocidad de Secado vs. Humedad Base Seca ($\Delta X/\Delta t$ vs. X) para Nopal (*Opuntia Lasiacanta*). Se presenta el proceso de preparación del nopal seco y el proceso de elaboración de la palanqueta hasta su presentación final. Se considera que este tipo de secador ofrece varias ventajas respecto al secador común de gabinete, entre ellas la rapidez de secado y la protección del producto de la radiación solar directa.

ABSTRACT.

The water contained in foods allows the proliferation of microorganisms and the development of chemical reactions that deteriorate. When required to preserve food for some time, an alternative is dry or dehydrate removing the water contained in them. There are several methods to achieve this, the simplest is to expose food to an air stream with certain conditions of temperature, humidity and speed. There are several types of solar dryers for proper treatment of the product. The two basic elements of a solar dryer are manifold where solar radiation heats the air and the drying chamber where the product is dried by the hot air passing through it. These elements can be designed to integrate the team in different ways. In a solar dryer Indirect as used in this work, the two elements are separated, the air is heated in the collector so that solar radiation has no impact on the product placed inside the drying chamber is opaque, in this type control driers drying process is simpler. Having a separate drying chamber collectors facilitates product handling and loading and unloading tasks. Since the drying chamber is opaque, this system allows convenient as dry products such as Nopal (Opuntia Lasiacantha) that may be damaged by direct sunlight. cleaning and cutting the stalk Nopal and its fermentation process solar drying and pre-wash is presented. Drying curves vs. Dry Basis Moisture obtained time (X vs. t) and drying rate vs. Moisture Base Seca (ΔX / Δt vs. X) for Nopal (Opuntia Lasiacanta). the process of preparing the dry nopal and the process of drafting the crowbar is presented to the final presentation. It is considered that this type of dryer offers several advantages over the common dryer cabinet, including fast drying and protection from direct solar radiation.

INTRODUCCIÓN.

El NOPAL (*Opuntia Lasiacantha*) es una especie de las opuntias, de la familia de las cactáceas o chumberas. Su nombre original es Tenochtitlán que significa "fruta de la piedra y de Nuchtli", los aztecas lo utilizaron bajo el nombre de nopalli, tomado por los españoles para finalmente saber su nombre actual.

Es un arbusto de unos 5 m de altura, con tallo ramificado de color verde y planos, el tronco está formado por pencas aplanadas, cubiertas de espinas y pequeños pelos removibles que facilitan el consumo humano, también consta de flores que varían de amarillo al rojo, tiene frutos de color verde, rojo o purpura, llamadas tunas las cuales también son aptas para el consumo humano. Su habitad es en clima seco, sémico y templado, se cultiva en zonas áridas y semiáridas, se encuentra asociado con matorrales xerófilos y bosques de encino y pino. No requiere de mucha agua para su cultivo, por lo que es una buena fuente de ingresos para muchos agricultores que no cuentan con los recursos necesarios y viven en zonas áridas o semiáridas. Se dice que tiene un papel ecológico importante, ya que detiene la degradación del suelo deforestado, o sea, convierte tierras improductivas en productivas. Existen cerca de mil 600 especies en 122 géneros de las cactáceas, de la cual proviene el nopal.

En México la ingesta anual per cápita de nopal es de 6.4 kilos. El uso del nopal se remonta a la época prehispánica. Se cultiva en varios estados del centro del país como Morelos, Tlaxcala, Distrito Federal y el Estado de México.

Dentro de los beneficios con los que cuenta, encontramos los siguientes:

Obesidad: jugo de nopal con naranja o alguna otra fruta. Esto se fundamenta en que gracias a la gran cantidad de fibra que tiene esta planta, ayuda a retardar el tiempo en que se absorben los nutrimentos y entran a la sangre y por lo tanto facilita su eliminación. También, las fibras insolubles que contiene, crean una sensación de saciedad, haciendo que disminuya el hambre de las personas y ayudan a una buena digestión. Así mismo, las proteínas vegetales promueven la movilización de líquidos en el torrente sanguíneo disminuyéndose la celulitis y la retención de líquidos.

Diabetes e Hiperglucemia: incrementa los niveles y la sensibilidad a la insulina logrando con esto estabilizar y regular el nivel de azúcar en la sangre. Como hipoglucemiante, se ha comprobado científicamente el poder del nopal, es decir, como un efectivo tratamiento para la prevención de la diabetes. Se han llevado a cabo investigaciones en el Instituto Politécnico Nacional, donde se documenta que el nopal disminuye las concentraciones de glucosa en sangre. Esto se ha visto solamente en personas que son resistentes a la insulina, o sea en pacientes con diabetes tipo II, pero para las personas que tienen diabetes tipo I (que no producen insulina), el consumo de nopal no sustituye las inyecciones de ésta. En estos estudios se ha demostrado que la ingestión de nopal antes de cada alimento, durante 10 días, provoca la disminución del peso corporal y reduce las concentraciones de glucosa, colesterol y triglicéridos en sangre.

Colesterol: Por su alto contenido de aminoácidos, fibra y niacina, el nopal regula el colesterol malo en la sangre, en personas con colesterol elevado se ha demostrado que, el consumo del nopal ayuda a eliminarlo evitando que se absorba gran parte de este y así no se acumula en venas y arterias. Los aminoácidos, la fibra y la niacina contenida en el nopal previenen que el exceso de azúcar en la sangre se convierta en grasa, mientras que por otro lado, actúa metabolizando la grasa y los ácidos grasos reduciendo así el colesterol. El contenido de LDL (lipoproteína de baja densidad) en el nopal se cree que es la principal causa de que el colesterol sea expulsado del cuerpo, ya que las LDL actúan a nivel del hígado removiendo y retirando el colesterol que el cuerpo tiene en exceso. Al mismo tiempo se ha visto que esta cantidad de LDL no afecta a las HDL (lipoproteínas de alta densidad) o colesterol “bueno”. El nopal tiene una cantidad suficiente de aminoácidos y fibra, incluyendo los antioxidante, vitaminas C y A, los cuales, previenen la posibilidad de daños en las paredes de los vasos sanguíneos, así como también la formación de plaquetas de grasa, y es así como también tiene un poder preventivo en relación a la aterosclerosis, (es una enfermedad de evolución crónica, caracterizada por la formación de placas de tejido fibroso y elementos lipoídicos con el concurso de la adherencia plaquetaria en el endotelio de las arterias).

Propiedad de antibiótico: Los nopales tienen antibióticos naturales, esta propiedad está relacionada con el metabolismo ácido crasuláceo (CAM) de las plantas, el cual, en las cactáceas inhibe o suspende el crecimiento de varias especies bacterianas. De ahí que tanto el consumo del nopal como la aplicación de cataplasmas de pencas de nopal tengan efectos benéficos en heridas e infecciones de la piel.

Cáncer. En un experimento realizado con ratones con tumores cancerígenos, se administraron extractos acuosos de Opuntia máxima (sustancia que se encuentra en el nopal) y se encontró la prolongación del periodo de latencia de dichos tumores malignos. No curó el cáncer pero lo detuvo. Aún no se sabe la causa, pero se están realizando varios estudios al respecto.

Desórdenes gastrointestinales y digestión. Las fibras vegetales y los mucílagos controlan el exceso de ácidos gástricos y protegen la mucosa gastrointestinal previniendo así, las úlceras gástricas y todo ese tipo de afecciones, aunque la parte más recomendada para estos males es la raíz cocida y mezcla con la guayaba.

El nopal, se ha caracterizado por otorgar sus múltiples beneficios, es considerado como una fuente de vitaminas por el alto grado de contenido de estas, contiene vitaminas A, Complejo B, C, minerales: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Hierro y fibras en lignina, celulosa, hemicelulosa, pectina, y mucílagos que en conjunto con los 17 aminoácidos ayudan a eliminar toxinas. Las toxinas ambientales provocadas por el alcohol y el humo del cigarro que inhiben el sistema inmunológico del cuerpo, son eliminadas por el nopal. También limpia el colon ya que contiene fibras dietéticas solubles e insolubles. Las fibras dietéticas insolubles, absorben agua y aceleran el paso de los alimentos por el tracto digestivo y contribuyen a regular el movimiento intestinal, además, la presencia de las fibras insolubles en el colon ayudan a diluir la concentración de cancerígenos que pudieran estar presentes.

Figura #01.- Penca del Nopal en el arbusto.

Figura #02.- Arbusto de Nopal.

Figura #03.- Pencas de Nopal separadas del arbusto.

Figura #04.- Pencas de Nopal limpias y libres de espinas.

Como alimento se usa como forraje, pero igualmente se comercializan las pencas tiernas como verdura, éstas se pueden preparar en escabeche, se cocinan caldos y sopas, en ensaladas o en guisados, en platos fuertes, como antojitos, en salsas, bebidas, postres, mermeladas y un sinfín de usos alimenticios que se le puede dar a esta planta tan rica en propiedades. El único problema de esto es que a muchas personas les es un poco desagradable el mucílago o baba, ya que al hacer el licuado se queda ahí. El polvo de nopal o nopal deshidratado, ha venido a ofrecer una solución para este inconveniente. Para evitar la baba del nopal se congela o se cuela, se recomienda también ajo, bicarbonato, cáscara de tomate, hoja de maíz, jugo de limón, ceniza o piedra volcánica en agua.

En México el nopal tiene un significado muy especial, por el papel simbólico del asentamiento de los aztecas en el Lago de Texcoco, dando lugar a su imperio Tenochtitlan (te, piedra y nochtli-nopal).

Los aztecas lo usaban para muchos usos medicinales: para las fiebres bebían el jugo, el mucílago o baba del nopal la utilizaron para curar labios partidos, manos y pies, la pulpa curaba la diarrea, las espinas para la limpieza de infecciones, la fruta era usada para el exceso de bilis, empleaban las pencas del nopal como apósito caliente para aliviar inflamaciones y la raíz para el tratamiento de hernia, hígado irritado, úlceras estomacales y erisipela, las semillas para aminorar el flujo menstrual, otros usos menos frecuentes eran para las afecciones de los pulmones y como auxiliar en el parto. Actualmente es parte de nuestro escudo nacional y todavía tiene usos medicinales y alimenticios muy variados.

El Secado Solar.

El agua contenida en los alimentos permite la proliferación de microorganismos y/o el desarrollo de reacciones químicas que los deterioran. Cuando es necesario conservar los alimentos por algún tiempo, una alternativa es secarlos o deshidratarlos; es decir, remover el agua contenida en ellos.

Existen varios métodos para lograrlo, el más simple es exponer los alimentos a una corriente de aire, con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad.

El contenido de humedad en un producto se expresa en relación a su masa total o a su masa seca (esto es, la masa que se obtiene descontando la masa de agua evaporable que contiene). Así se definen:

Contenido de Humedad en Base Húmeda (bh):

$$M = \frac{m - m_s}{m}$$

Contenido de Humedad en Base Seca (bs):

$$X = \frac{m - m_s}{m_s}$$

donde:

m: masa total del producto.
m_s: masa seca del producto.

El contenido de humedad (bh) se expresa en porcentaje, mientras que el contenido de humedad (bs) es proporcional al agua contenida en el producto. Se muestra la relación entre los valores de **X** y los de **M**; puede apreciarse que estos prácticamente coinciden para bajos contenidos de humedad.

M %	**X**	**M %**	**X**	**M %**	**X**
0	0.000	10	0.111	20	0.250
1	0.010	11	0.123	30	0.428
2	0.020	12	0.136	40	0.666
3	0.030	13	0.149	50	1.000
4	0.041	14	0.162	60	1.500
5	0.052	15	0.176	70	2.330
6	0.063	16	0.190	80	4.000
7	0.075	17	0.204	90	9.000
8	0.086	18	0.219	95	19.00
9	0.098	19	0.234	100	∞

Figura #05.- Relación entre los Contenidos de Humedad en Base Húmeda y Seca.

$$X = \frac{M}{1 - M} \qquad M = \frac{X}{1 + X}$$

Existen diversos métodos para medir el contenido de humedad de un producto.

Los métodos indirectos usan la dependencia de una propiedad del producto (conductividad eléctrica o su constante dieléctrica) de su contenido de humedad, resultando generalmente en una medición rápida, pero requiriendo un equipo especializado.

La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa del producto y la masa seca correspondiente. Para esto último se suele eliminar, aplicando calor, el agua contenida en él, cuidando de no evaporar al mismo tiempo otras sustancias del producto.

El contenido de humedad definido anteriormente no está directamente relacionado con los factores que intervienen en el proceso de deterioro de un producto.

El jamón con un contenido de humedad (bh) entre 35% y 40% no permite el crecimiento del moho penicillium; pero ese moho si crece en la harina de trigo con un contenido de humedad entre 18% y 20%.

Esto se debe a que el agua no se encuentra en la misma forma en cada alimento; en unos casos está relativamente libre, en otros está muy ligada a la estructura del producto y no está disponible para los procesos de deterioro.

El proceso de secado de un alimento es muy delicado, ya que si no se realiza con todas las precauciones se pueden presentar alteraciones físico-químicas, como son: la pérdida de sustancias nutritivas, de textura y forma, de sustancias volátiles, de capacidad de rehidratación, la decoloración, la caramelización, etc.

Las características de tales alteraciones dependen de los parámetros del proceso de secado (velocidad, temperatura y humedad relativa del aire, exposición directa a la radiación solar u otras radiaciones, etc.) y de las propiedades del alimentos que está siendo secado, por ejemplo:

- En los alimentos deshidratados se puede destruir parcialmente por oxidación las vitaminas A y C.
- La radiación solar directa puede ocasionar pérdida de vitamina C en las frutas y hortalizas.
- Las altas temperaturas disminuyen el valor biológico de las proteínas; sin embargo, el secado a bajas temperaturas puede aumentar su digestibilidad.
- Las altas temperaturas también pueden descomponer la tiamina y aumentar la oxidación de grasas.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

En este proyecto el secado de Nopal se realiza con un Secador Solar Indirecto donde se tiene la capacidad y opción de dirigir el flujo de aire caliente proveniente del calentador solar hacia el interior de la cámara de secado determinando la zona preferencial a la cual se desea dirigir el agente secante.

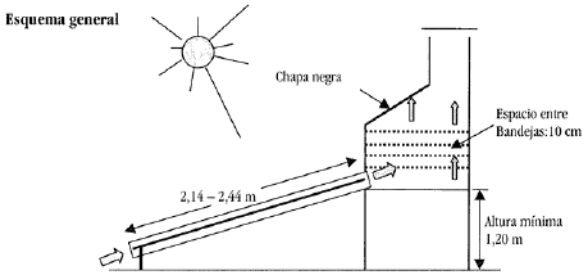


Figura #06.- ***Secador Solar Indirecto:*** Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incidirá sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado es opaca. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional en que el sol (captado a través de un banco de colectores) actúa de fuente energética.

El control del proceso es más simple (especialmente en el caso de secadores con circulación de aire forzada). Tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara de secado es opaca, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder calidad de aspecto por una exposición directa al sol.

Al separar la función colección de energía solar de la de secado, el tamaño del equipo y sus costos crecen. Una segunda desventaja menos aparente es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos. Los colectores solares trabajarán en un punto de menor eficiencia de su curva característica, lo cual conduce a mayores áreas de captación de energía. Para productos a granel principalmente granos en silos si se contempla el secado solar, el sistema a emplear es un secador indirecto.

La cámara de secado se construyó con madera de triplay de ½" de espesor y dimensiones de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 55 cm de altura. Tiene cuatro charolas de malla de nylon, lo que permite una masa de secado inicial de aproximadamente 2 kg.

Figura #07.- Cámara de secado abierta, se aprecian las cuatro charolas contenedoras.

Figura #08.- Secador Solar Indirecto con Flujo de Dirección Variable.

El calentador solar de aire, agente secante utilizado, también se construyó en su estructura con madera de triplay de 1” de espesor, tanto en la base como en los costados, con dimensiones de 140 cm de largo por 60 cm de ancho.

El elemento principal es un serpentín de lámina de cobre pintado de negro mate, colocado en el interior de la estructura, aislado en la base y en los cuatro costados con lana de fibra de vidrio. Cuenta con trece canales de 10 x 10 x 10 cm, lo que supone una longitud final de 5 m en el recorrido del aire para calentarse, dando un flujo de 0.01 m^3/s a una rapidez conservadora de 1 m/s en convección natural.

La conexión entre el calentador solar de aire y la cámara de secado se realiza por medio de una manguera de neopreno de muy baja conductividad térmica en su pared.

Como en todo Secador Solar Indirecto, el aire a temperatura ambiente entra al sistema por la base del serpentín y eleva su temperatura en su recorrido por convección natural hacia la parte superior del mismo, esta es la función del calentador solar de aire.

Enseguida se conduce el aire caliente hacia la base de la cámara de secado utilizando la entrada preferencial según el tipo de producto que se deseé secar y la rapidez a la cual se requiera todo proceso, de hecho, la zona por la cual deba entrar el aire caliente a la cámara se puede cambiar en cualquier momento del proceso de secado según se necesite, esto es, si el proceso está en su inicio donde la humedad del producto está en la superficie del mismo o muy cerca de ella, es recomendable que el flujo entre a la cámara de modo que pueda extraer la mayor cantidad de humedad, mientras que si el proceso se encuentra en una etapa mas avanzada, es preferible un flujo mas lento, pero a mayor temperatura.

La cámara de secado tiene varias propiedades que se pueden utilizar según el producto, la cantidad del mismo y la etapa de secado en que se encuentre.

Cuenta con tres posibles entradas de aire, una al frente y dos a un costado, lo que permite dirigir el flujo hacia diferentes zonas de las charolas. También cuenta con tres posibles salidas del flujo, una al frente y dos en la parte posterior, en particular una de ellas, tal vez la mas utilizada, en contraposición diagonal de la entrada lateral principal.

METODOLOGÍA.

Para el secado de nopal utilizando el secador solar indirecto se realizan los siguientes pasos:

- Cortar el nopal en sentido transversal a la penca de modo de obtener segmentos de 1 cm de ancho aproximadamente.
- Fermentar estos segmentos en agua por un periodo de 24 hrs.
- Lavar con agua.
- Colocar los segmentos sobre las charolas del secador solar.
- Permitir el secado.
- Medición de la pérdida de masa de una muestra del producto en función del tiempo transcurrido.
- Determinación de la cantidad de masa seca (m_s) del producto.
- Comportamiento de la pérdida de Humedad Base Seca [$X=(m-m_s)/m_s$] del producto en función del tiempo.
- Determinación de la velocidad de secado [$V=(m_s/A)(\Delta X/\Delta t)$] del producto.
- Comportamiento de la velocidad de secado del producto en función de la pérdida de Humedad Base Seca.

Figura #08.- Cortado transversal de la penca del nopal.

Figura #10.- Colocación en agua de los segmentos para su fermentación.

Figura #11.- Proceso de fermentación de los segmentos de nopal.

Figura #12.- Colocación de los segmentos de Nopal sobre una de las charolas de secado.

Figura #13.- Colocación de las charolas con el Nopal dentro de la cámara de secado.

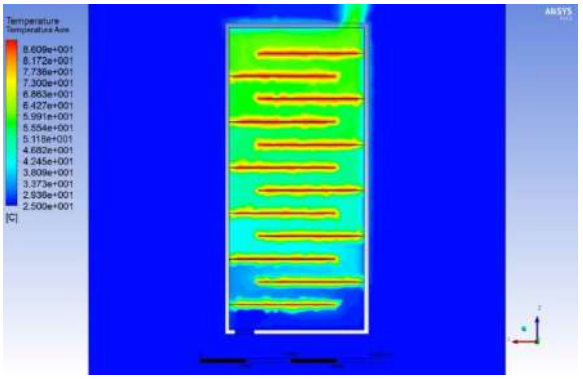


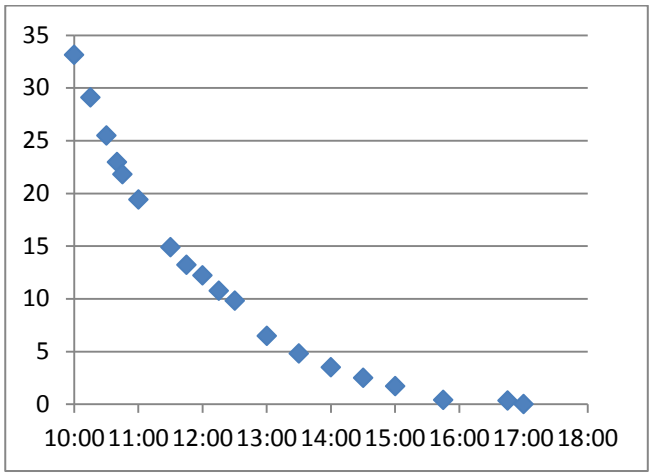
Figura #14.- Perfil de temperaturas del aire agente secante a lo largo del serpentín calentador solar.

Figura #15.- Medición de la pérdida de masa de una muestra del producto.

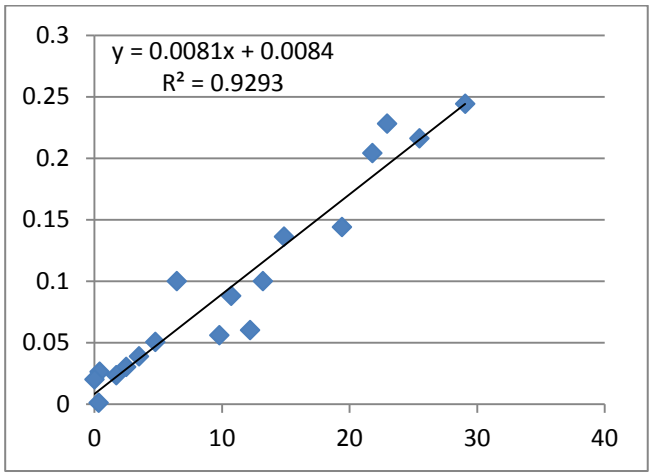
Figura #16.- Proceso de Secado concluido.

Se tomaron las medidas de pérdida de masa de una muestra del producto de 51.2 grs colocada sobre una superficie de 100 cm^2 aproximadamente, terminando con una Masa Seca (m_s) de 1.5 grs, lo que permite determinar al final del proceso que el contenido inicial de Humedad Base Seca del Nopal “Opuntia Lasiacantha” es de X=33.13 y una velocidad media de secado de V=0.132 grs/cm^2 hr.

RESULTADOS.



Gráfica #01.- Pérdida de Humedad Base Seca del producto en función del tiempo.



Gráfica #02.- Comportamiento de la velocidad de secado del producto en función de la humedad base seca.

La mayoría de las versiones en torno al origen de la palanqueta hablan de un pasado prehispánico relacionado directamente con la celebración del maíz que, a su vez, estaba ligada con la abundancia y la alegría. Por ello, se deduce que la palabra "palanqueta" se deriva del vocablo "papaquilizihuitl" y sus derivados: papaquili, papaquiltia, etc.: diversión, festejar, felicidad.

En sus orígenes, la palanqueta era elaborada de maíz tostado y molido, que se mezclaba con miel de abeja. Se cree que la mezcla cultural entre las raíces originarias de México y las tradiciones culinarias del viejo continente dieron como resultado el dulce como lo conocemos hoy en día: la miel de abeja cambió por azúcar o jarabe de piloncillo; el maíz tostado cambió por cacahuates, semillas o frutos y hasta amaranto, ahora lo haremos con Nopal.

Figura #17.- Mezcla de azúcar y piloncillo para elaboración del caramelo.

Figura #18.- Caramelo listo en hervor.

Figura #19.- Incorporación del Nopal Seco al caramelo.

Figura #20.- Vaciado de la mezcla completa en la charola.

Figura #21.- Corte y preparación final de la Palanqueta de Nopal.

CONCLUSIONES.

- El Secador Solar Indirecto utilizado en este proceso es el sistema más adecuado para el secado de Nopal debido a la protección del producto de la radiación solar directa.
- La capacidad de este Secador Solar Indirecto y la forma de colocar el producto en las charolas permite secar alrededor de un kilogramo de Nopal al día.
- Para el correcto secado del Nopal se requiere de un proceso de corte acertado así como de un inevitable proceso de fermentación y lavado.
- La velocidad de secado decrece de manera lineal desde un inicio sin presentarse claramente algún punto de humedad crítica que separe la zona de velocidad constante del resto.
- La incorporación del Nopal Seco a la mezcla tradicional de Palanqueta mantiene la apariencia del Nopal.
- La incorporación del Nopal Seco al caramelo permite un endurecimiento adecuado y rápido del mismo.
- El Nopal Seco en forma de dulce es una buena opción para su consumo.

REFERENCIAS.

1. Desrosier, Norman W., "Conservación de Alimentos", Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., 1989, México, D.F.
2. Cervantes, Mayán., “La grana cochinilla del nopal”, Editorial INAH, 2004, México.
3. Aragón Salgado, Nidia., “Respuesta postcosecha del nopal Opuntia ficus sometido a diferentes operaciones básicas”, Editorial ANDSA, 1990, México.
4. Lacerca, Alberto M., "Industrialización Casera de Frutas y Hortalizas", Editorial Albatros, 1987, Buenos Aires, República Argentina.
5. CYTED (Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), Subprograma VI.- Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía, “Ingeniería del Secado Solar”, Editores: R.Corvalán, M.Horn, R.Román, L.Saravia, 1983, Sudamérica.
6. Tecnologías Domésticas. PROFECO. http://www.profeco.gob.mx/tecnologias/confite/palanqueta.htm
7. http://www.yomuevoamexico.org.mx/content/%C2%A1siglos-de-alegr%C3%AD-conoce-la-historia-de-las-palanquetas

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR

P. Soto, L. A. Domínguez-Inzunza y W. Rivera

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, 62330, Temixco, Mor. México

Tel. 7772169498, e-mail: wrgf@ier.unam.mx

RESUMEN

En el presente artículo se reporta el diseño, la construcción y puesta en operación de un sistema de aire acondicionado solar de 5 kW de potencia operando con la mezcla amoniaco/nitrato de litio instalado en el Instituto Tecnológico de Culiacán (ITC). El sistema desarrollado es el resultado de un proyecto patrocinado por la Secretaría de Energía, CONACyT y la empresa Módulo Solar, realizado por el grupo de Refrigeración y Bombas de Calor del Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. El sistema consiste principalmente de un campo de 24 colectores solares tipo CPC en caja, una máquina de absorción de 5 kW, una torre de enfriamiento, un tanque de almacenamiento de agua caliente y una manejadora de aire. Los coeficientes de operación obtenidos han sido alrededor de 0.5 y se ha logrado mantener la temperatura del espacio a acondicionar entre los 23 °C y los 25° C con temperaturas del medio ambiente superiores a los 35 °C.

ABSTRACT

A solar air conditioning system of a cooling power of 5 kW operating with the ammonia/lithium nitrate system was designed and installed in the Instituto Tecnológico de Culiacán (ITC). The system was developed by the group of the Refrigeración y Bombas de Calor of the Instituto de Energías Renovables of the UNAM and it is the result of a project sponsored by the Secretaría de Energía, Conacyt and the Modulo Solar company. The system consists of a field of 24 CPC solar collectors, an absorption machine of 5 kW, a cooling tower, a hot water storage tank and an air handler. The obtained coefficients of performance have been around 0.5 maintaining room temperatures between 23 °C and 25 °C with ambient temperatures higher than 35 °C.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el 15% de la electricidad producida a nivel mundial es usada para refrigeración y aire acondicionado [1,2]. Con el propósito de reducir el consumo de energía eléctrica ocasionada por el uso de sistemas convencionales de compresión utilizados para estos fines, los sistemas de absorción han ganado un creciente interés en el campo de la investigación. Lo anterior aunado al hecho de que los sistemas de absorción pueden operar con energía solar térmica u otra fuente de calentamiento como lo puede ser calor de desecho industrial. Actualmente las mezclas más comunes son agua/bromuro de litio (H_2O/LiBr) y amoniaco/agua (NH_3/H_2O) aunque recientemente la mezcla amoniaco/nitrato de litio ($NH_3/LiNO_3$) está cobrando un fuerte interés debido a que elimina algunas de las desventajas que poseen las mezclas convencionales. Algunos de los trabajos más relevantes relacionados con el desarrollo de sistemas de enfriamiento operando con energía solar utilizando la mezcla amoniaco/nitrato de litio son los siguientes.

Best et al. [3] reportaron los coeficientes teóricos de operación (COP) de un sistema de absorción de una etapa operando a diferentes temperaturas. En su estudio encontraron que coeficientes de hasta 0.7 pueden ser alcanzados con este tipo de sistemas. Antonopoulos et al. [4] compararon el funcionamiento de un sistema de absorción operando con las mezclas $NH_3/LiNO_3$ y NH_3/NaSCN. Los autores encontraron que para calentamiento los mayores COP fueron obtenidos con la mezcla $NH_3/LiNO_3$, mientras que para enfriamiento la

mezcla $NH_3/LiNO_3$ alcanzaba mayores potencias de enfriamiento pero menores COP. Ayala et al. [5,6] simularon y evaluaron un sistema hibrido de absorción-compresión operando con la mezcla $NH_3/LiNO_3$. Los resultados mostraron que los COP del sistema hibrido pueden aumentar hasta 10% con respecto a los sistemas operando en forma independiente. Rivera [7] desarrolló un sistema de refrigeración para la producción de hielo utilizando exclusivamente energía solar. El sistema utiliza un colector tipo CPC para concentrar la energía del sol y producir el refrigerante, las temperaturas de generación variaron entre los 75 °C y 110 °C mientras que las temperaturas de evaporación variaron entre los -20 °C y -1 °C. Llamas et al. [8] desarrollaron un sistema de refrigeración por absorción de pequeña capacidad de funcionamiento, entre 5 y 10 kW, operando con la mezcla amoniaco-nitrato de litio. En dicho sistema el condensador y el absorbedor son enfriados por aire y el calor es suministrado por colector de tubos de vacío. Debido a la utilización de amoníaco como refrigerante el prototipo puede operar tanto como sistema de refrigeración o de aire acondicionado. El COP de diseño fue de 0.53 para un suministro de fuente de calor a 120 °C, una temperatura de condensación de 40 °C, produciendo agua fría a 0 °C. Rivera et al. [9] desarrollaron y evaluaron un novedoso sistema de refrigeración solar, para la producción de hielo, que opera con las mezclas amoniaco/nitrato de litio y amoniaco-nitrato de litio-agua. El sistema fue diseñado para producir hasta 8 kg de hielo al día, exclusivamente con energía solar y sin partes móviles. Las temperaturas obtenidas en el evaporador fueron alrededor de -8 °C, en un período de prueba de 8 horas. Los COP obtenidos con la mezcla ternaria resultaron ser hasta 24% más altos que con la mezcla binaria, que varían desde 0.066 hasta 0.093. Además, las temperaturas iniciales de generación fueron hasta 5.5 °C inferiores a la mezcla binaria, con presiones de trabajo máximas de 1.5 bar. Los autores expresan que los resultados obtenidos, demuestran ser una buena alternativa para la producción de hielo donde el suministro de electricidad no está disponible.

Como se puede ver de la revisión bibliográfica existen muy pocos trabajos publicados con el desarrollo de sistemas de absorción operando con la mezcla $NH_3/LiNO_3$, y solamente dos de ellos operando con energía solar. Uno de ellos para la producción de hielo operando en forma intermitente y el otro para aire acondicionado utilizando aire, ambos desarrollados en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. En el presente trabajo se presenta los resultados preliminares de la puesta en operación de un sistema de enfriamiento de 5 kW de potencia frigorífica desarrollado en el IER e instalado en el Instituto Tecnológico de Culiacán.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La figura 1 muestra el campo de colectores utilizado como fuente de calentamiento del sistema de aire acondicionado por absorción, junto con el laboratorio que se está acondicionando. El campo de colectores consiste de 24 colectores tipo CPC en caja con un área aproximada de 2 m^2 cada uno en un arreglo de 6 x 4.

Figura 1. Fotografía del sistema del campo de colectores solares y laboratorio acondicionado térmicamente.

La figura 2 muestra el sistema de absorción diseñado en el Instituto de Energías Renovables e instalado en el Instituto Tecnológico de Culiacán el cual fue diseñado con una capacidad de 5 kW de enfriamiento. La máquina está compuesta principalmente por un generador,

un absorbedor, un condensador, un evaporador y un economizador y utiliza la mezcla amoniaco/nitrato de litio. El laboratorio que se está acondicionando tiene un área aproximada de 35 m^2.

Figura 2. Máquina de absorción diseñada en el IER.

RESULTADOS

A continuación se presentan algunos de los resultados preliminares obtenidos de la evaluación experimental del equipo. La figura 3 muestra el perfil de temperaturas obtenidos de la operación del equipo. En esta figura se puede ver que la temperatura de generación seleccionada TG es de 100 °C. Las condiciones climáticas permitieron tener temperaturas de condensación de 24°C, la temperatura del agua al evaporador se mantuvo en el orden de los 12 °C y la temperatura del refrigerante al evaporador en 8 °C.

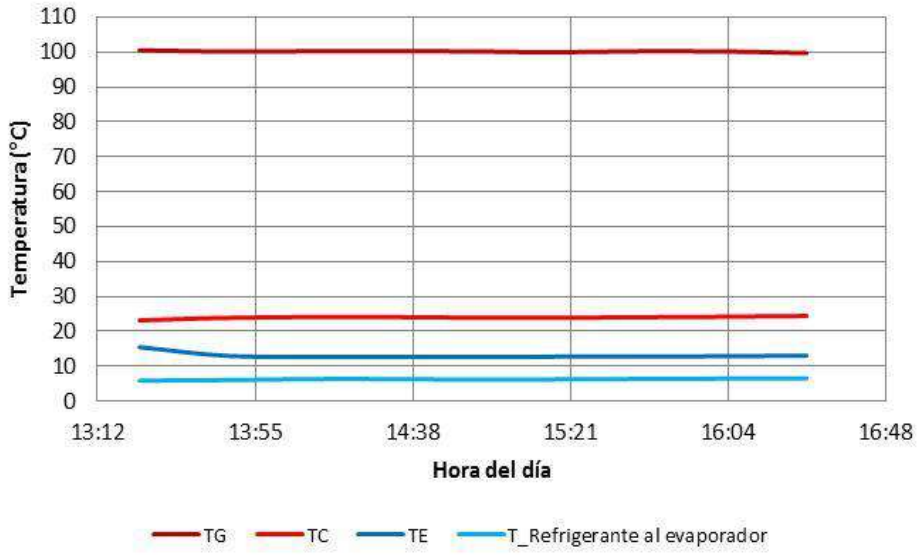


Figura 3. Perfil de temperaturas de operación para prueba del 20/04/2016

En la figura 4, se muestran los perfiles de temperaturas con el espacio enfriado. Se puede observar que la temperatura ambiente ronda los 36 °C con una temperatura de condensación de 24 °C y una temperatura de 22 °C en la habitación.

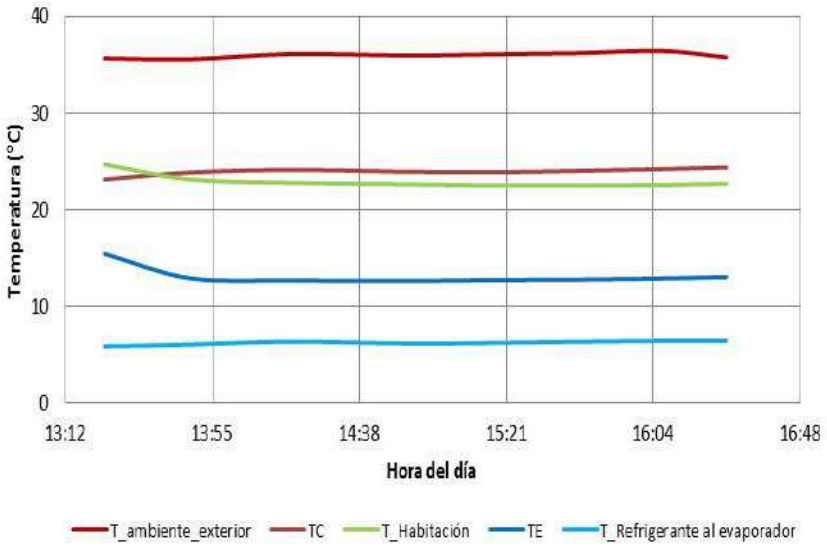


Figura 4. Perfil de temperaturas relacionadas con el espacio enfriado.

En la figura 5 se muestra que la potencia de enfriamiento es aproximadamente de 3.8 kW para un lapso de tiempo de aproximadamente 3 hrs. , mientras que la figura 6 muestra que el coeficiente de operación es alrededor de 0.5.

Figura 5. Potencia de enfriamiento.

Por su parte la figura 6 muestra que el coeficiente de operación es alrededor de 0.5 para el mismo periodo de tiempo.

Figura 6. Coeficiente de operación.

La figura 7 muestra las potencias de generación, las potencias de enfriamiento y el coeficiente de operación para las siete corridas experimentales realizadas a la fecha. Se puede observar que la potencia de generación entre los 5.8 kW y los 7.8 kW, mientras que la potencia de enfriamiento varió entre los 3 kW y 4 kW, por lo que el coeficiente de operación fue aproximadamente de 0.5.

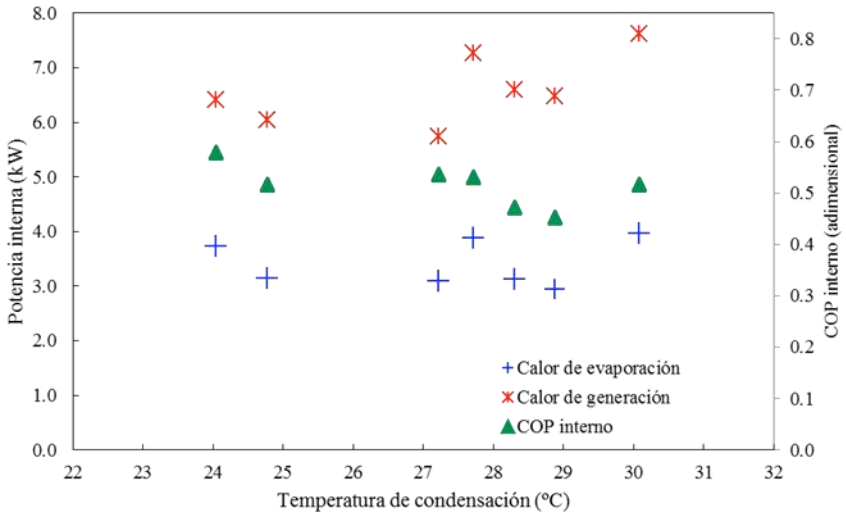


Figura 7. Potencias de generación, enfriamiento y coeficientes de operación.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se reporta la evaluación preliminar de un sistema de aire acondicionado solar desarrollado en el IER de la UNAM e instalado en el Instituto Tecnológico de Culiacán. Aunque a la fecha han sido pocas las corridas experimentales realizadas es claro que el sistema funciona ya que logra mantener el laboratorio que se está acondicionando a temperaturas entre los 23 °C y los 25 °C teniéndose temperaturas del medio ambiente superiores a los 35 °C. Aunque todavía no se han obtenido las potencias de enfriamiento de 5 kW de diseño para lo cual fue diseñado el equipo se espera que pronto se puedan alcanzar una vez que se realice un número mayor de corridas experimentales y se encuentre las mejores condiciones de operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos SENER-CONACyT 117914 y CONACyT 154301, así como a la empresa Módulo Solar por el apoyo económico otorgado para el desarrollo del presente estudio.

REFERENCIAS

[1] Secretaría de Energía SENER. Balance Nacional de Energía 2010. Primera edición 2011. (www.energia.gob.mx)
[2] Agencia Internacional de Energía (AIE). CO_2 Emissions from Fuel Combustion. International Energy Agency, Ed. 2011, Francia.
[3] R. Best , L. Porras, F. A. Holland, Thermodynamic design data for absorption heat pump systems operating on Ammonia-Lithium Nitrate-part one. Cooling, Heat Recovery Systems & CHP Vol. II, No. I, (1991) 49-61.
[4] K. A . Antonopoulos, E. D. Rogdakis, Performance of Solar-driven Ammonia-Lithium Nitrate and Ammonia-Sodium Thiocyanate absorption systems operating as coolers or heat pumps in Athens, Applied Thermal Engineering Vol. 16, No. 2, (1996) 127-147.
[5] R. Ayala, C. L. Heard, F. A. Holland, Ammonia/Lithium Nitrate absorption/compression refrigeration cycle. Part I. Simulation, Applied Thermal Engineering Vol. 17, No. 3, (1997) 223-233.
[6] R. Ayala, C. L. Heard, F. A. Holland, Ammonia/Lithium Nitrate absorption/compression refrigeration cycle. Part II. Experimental, Applied Thermal Engineering Vol. 18, No. 8, (1998) 661-670.
[7] Rivera C. O. Simulación, diseño y evaluación de un refrigerador solar intermitente usando un CPC como generador-absorbedor. Tesis de doctorado. Centro de Investigación en Energía. UNAM. 2006.
[8] Llamas S. U., Herrera J. V., Cuevas R., Gómez V.H., García-Valladares O., Cerezo J. y Best R. Development of a small capacity ammonia-lithium nitrate absorption refrigeration system. 2nd Int. Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona, Spain, pp. 470-475, (2007).
[9] W. Rivera, G. Moreno-Quintanar, C. O. Rivera, R. Best, F. Martínez, Evaluation of a solar intermittent refrigeration system for ice production operating with ammonia/lithium nitrate, Solar Energy 85 (2011) 38–45.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE CAPTADORES SOLARES PLANOS (SOLCOSI)

R. Pérez-Espinosa[a] **y O. García-Valladares**[b]

[a]Posgrado en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Centro, Temixco, Morelos, C.P 62580, México, **e-mail:** jrpee@ier.unam.mx

[b]Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Centro, Temixco, Morelos, C.P 62580, México, **e-mail:** ogv@ier.unam.mx

RESUMEN

Un simulador para captadores solares planos (SolCoSi) con el fin de evaluar su rendimiento térmico se ha llevado a cabo con éxito. El modelo discretiza el colector solar de placa plana en las direcciones axiales y longitudinales. Permite calcular la curva de eficiencia térmica, el modificador del ángulo de incidencia y la distribución de temperatura en el flujo de fluido y sólidos en un captador solar de placa plana. SolCoSi permite el análisis de diferentes configuraciones, condiciones de operación y fluidos de trabajo, junto con el análisis de diferentes componentes tales como superficies selectivas, múltiples cubiertas, diferentes aislamientos, cámaras de aire, aletas, tubos y materiales de aislamientos, aletas, tuberías, etc.

El modelo numérico ha sido validado frente a una amplia gama de datos experimentales (7 captadores solares de placa plana comerciales con 70 puntos de datos de eficiencia térmica) y comparado con un software libre (CoDePro). El uso de un análisis estadístico global, basada en regresiones lineales ponderados con un algoritmo de detección / rechazo de valores atípico en un 95% de nivel de confianza se ha utilizado para evaluar la predicción del modelo numérico. Relaciones lineales entre la eficiencia térmica (valor de referencia) y los datos de eficiencia térmica del modelo se han demostrado estadísticamente. El error medio obtenido es de ± 2.9%, lo que demuestra la buena capacidad del modelo desarrollado para predecir el comportamiento térmico de los colectores solares de placa plana. El modelo desarrollado estará disponible próximamente como software libre en el sitio web: http://solcosi.ier.unam.mx/

ABSTRACT

A Solar Collector Simulator (SolCoSi) to evaluate the thermal performance of flat plate solar collector has been successfully carried out. The model discretizes the flat plate solar collector in the axial and longitudinal directions and it can be used in order to evaluate the thermal efficiency curve, the incident angle modifier and the temperature distribution in fluid flow and solids. SolCoSi allows the analysis of different configurations, working conditions and heat transfer fluids together with different components such as selective surfaces, multiple glazing, different insulations, air gaps, fins, risers, and insulations materials, etc.

The numerical model has been validated against a wide range of experimental data (7 different commercial flat plate solar collectors with 70 thermal efficiency data points) and also compared with available free software (CoDePro). Using a comprehensive statistical analysis, based on weighted linear regressions with an outlier detection/rejection algorithm at 95% of confidence level, the prediction performance of the numerical model was evaluated. Linear relationships between thermal efficiency (predicted) and experimental thermal efficiency data were statistically demonstrated. Average deviation error of ±2.9% was consistently computed between numerical model and experimental data, which demonstrates the good capability of the model developed for predicting the performance of flat plate solar collectors. The model developed will be available as a free software in the website: http://solcosi.ier.unam.mx/

Palabras claves: Modelo matemático, eficiencia térmica, energía solar, análisis estadístico, sistemas de calentamiento de agua, software.

Nomenclatura

A_0	coeficiente de la curva de eficiencia
B_0	coeficiente de la curva de eficiencia [W/m^2 K]
C_0	coeficiente de la curva de eficiencia [W/m^2 K^2]
Cp	calor específico a presión constante [J/kg K]
dt	diferencial de tiempo [s]
dT	diferencial de temperatura [°C, K]
G	irradiancia solar [W/m^2]
h_f	coeficiente convectivo en el fluido [W/m^2 K]
m	número de cubiertas transparentes
n	número de temperaturas en el aislante inferior
N_{cv}	número de volúmenes de control longitudinales
q	flujo de calor [W/m^2]
T	temperatura [°C, K]

T^* temperatura supuesta [°C, K]
U_e coeficiente de pérdidas de calor [W/m^2 K]
w peso ponderado de los datos
x eficiencia térmica experimental
y eficiencia térmica calculada
Z coeficientes térmicos de transferencia de calor [W/m^2 K]

Subíndices
a ambiente
abs placa absorbera
cov cubierta transparente
exp experimental
fav promedio del fluido
gen generado
i i-ésimo elemento
in entrada
j j-ésimo elemento
k k-ésimo elemento
out salida
sim simulada

Letras griegas
α absortancia
γ reflectancia
δ espesor del volumen de control axial [m]
η eficiencia térmica
ρ densidad [kg/m^3]
ς criterio de convergencia
τ trasmitancia

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar ha sido un tema atractivo por diversas décadas debido a la crisis energética y la protección ambiental [1]. Hoy en día, la demanda para calentamiento y enfriamiento en edificaciones e industrias se estima alrededor del 40% del consumo final de energía. Debido a que el 70% de la demanda para calentamiento y enfriamiento depende de fuentes de energía fósil, se estima que estos consumos finales fueron los responsables del 30% de las emisiones de dióxido de carbono en el 2012 [2]. Uno de los sistemas de energías renovables son los calentadores solares de agua, los cuales tienen bajo costo y son tecnológicamente factibles comparados con otras fuentes de energía [3]. En el caso de los captadores solares de placa plana, la eficiencia térmica es el producto de diferentes aspectos por ejemplo: la geometría, la superficie selectiva, los materiales de la placa absorbedora, de la cubierta y de los aislantes térmicos, el fluido de transferencia de calor, las condiciones de operación, etc. Como parte de la evolución de esta tecnología diversos grupos de investigadores has realizado desarrollos experimentales o estudios numéricos con el fin de mejorar el comportamiento térmico de los captadores solares planos.

Para el caso de los modelos de simulación numérica, Duffie y Beckman (1991) [4] desarrollaron un modelo para captadores solares planos que ha sido ampliamente usado para diseño y predicción de estos sistemas. Actualmente existen diversos modelos propuestos en la literatura los cuales en general son una extensión del modelo propuesto por Duffie y Beckman [4]. Cadafalch (2009) [5] propuso un modelo unidimensional multicapa (método de volumen de control) el cual cada capa representa un componente del captador solar. Hamed et al. (2013) [6] presentó un modelo numérico simplificado basado en un análisis de balance de energía, el conjunto de las ecuaciones obtenidas son resueltas simultáneamente, los resultados numéricos son usados para estudiar el efecto de diversos parámetros en el rendimiento de los captadores solares bajo las condiciones ambientales de Gabes en Túnez. Deng et al. (2014) [7] presenta un modelo analítico en forma de expansión de series para predecir las características térmicas momentáneas de los captadores solares planos. Facâo (2015) [8] ha trabajado con la optimización de la distribución del flujo en los captadores solares planos con arreglos en largueros y cabezales. Soriga y Badescu (2016) [9] han estudiado el efecto de la inercia térmica en los captadores solares planos para diferentes regímenes radiativos. Adicionalmente, existen diversos softwares basados en el modelo de Duffie y Beckman [4] que predicen el comportamiento térmico de los captadores solares planos como por ejemplo: TRNSYS [10], T-Sol [11] y CoDePro [12].

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo numérico (SolCoSi de sus iniciales en inglés: Solar Collector Simulator) que sea capaz de predecir el comportamiento térmico (eficiencia térmica, factor modificador del ángulo de incidencia y distribución de temperaturas tanto en el fluido de transferencia de calor como en los sólidos) de los captadores solares con diferentes materiales bajo diferentes condiciones de operación y ambientales. El modelo combina el método multicapa propuesto por Cadafalch [5] agregando una discretización en la dirección longitudinal con el fin de considerar el perfil de temperaturas a lo largo de los largueros.

2. MODELO MATEMÁTICO

Para el modelo numérico propuesto se utilizó la ecuación de balance de energía como se muestra en la ecuación (1)

$$\rho C_p \delta dT / dt = q_{in} - q_{out} + q_{gen} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, Cp es el calor específico a presión constante, δ es el espesor de la capa (volumen de control), dT/dt representa la variación de la temperatura (T) contra el tiempo (t), q_{in} y q_{out} representan el flujo de calor entrante y saliente por unidad de área, y q_{gen} es el calor generado por unidad de área en el respectivo volumen de control.

Las ecuaciones de transferencia de calor que fueron usadas son basadas en el llamado modelo multicapa. Este modelo, para captadores solares planos, consiste generalmente en cinco principales componentes: el aislamiento inferior, la sección de aire entre al aislamiento y el absorbedor, la placa absorbedora, el aire entre el absorbedor y la cubierta transparente y la cubierta transparente. Sin embargo, un modelo más completo puede considerar más de una cubierta transparente o mayor número de capas en el aislamiento inferior, incrementando así el número de capas [5]. El modelo numérico SolCoSi desarrollado toma en cuenta las siguientes consideraciones: transferencia de calor unidimensional, discretización de volúmenes de control en las direcciones axial y longitudinal, condiciones de estado estacionario, propiedades termofísicas dependientes de la temperatura, transferencia de calor por conducción en las partes sólidas, transferencia de calor por convección en el aire, transferencia de calor en el fluido de los largueros, las pérdidas de calor en los bordes son evaluadas como pérdidas de calor en el absorbedor, el flujo total de masa se divide equitativamente en cada larguero, se considera la radiación térmica directa, difusa y reflejada del suelo, y se considera la dependencia angular en las propiedades ópticas de los materiales.

2.1 Balance de energía

La Figura 1 muestra las diferentes temperaturas, los coeficientes térmicos de transferencia de calor y los términos de generación de calor en cada capa en la dirección axial de un captador solar plano con n número de temperaturas en el aislante (n-2 nodos) y m número de cubiertas transparentes.

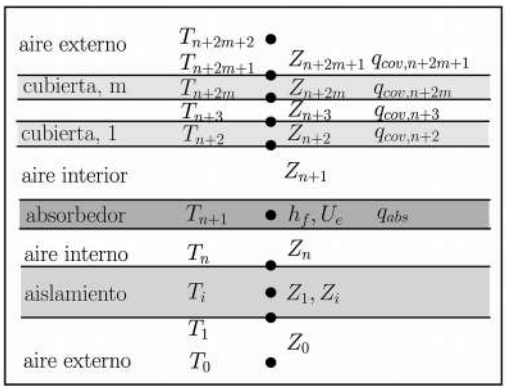


Fig. 1 Nodos y coeficientes usados para el balance de energía.

En la Figura 2 cada nodo representa una capa isotérmica horizontal, por lo cual se aplicó un balance de energía sobre cada nodo para obtener la temperatura de cada uno de ellos. La ecuación (2) muestra la forma general de la ecuación de energía aplicada a cada capa (volumen de control en la dirección axial) [5].

$$(Z_k + Z_{k-1})T_k = Z_k T_{k+1} + Z_{k-1} T_{k-1} + q_{g,k} \qquad (2)$$

Los valores de Z corresponden a los coeficientes térmicos de transferencia de calor en cada nodo en W/m^2 K y el valor de $q_{g,k}$ es el término de generación de calor en W/m^2, T_k es la temperatura en el nodo analizado, mientras que T_{k+1} y T_{k-1} corresponden a las temperaturas de los nodos vecinos. Una vez realizado el balance de energía en cada nodo se obtiene un sistema de ecuaciones lineales, mismo que es resuelto con el algoritmo de matriz tridiagonal (TDMA) [13].

En el modelo multicapa normalmente se considera que todas las capas longitudinales tienen la misma temperatura, y lo que se calcula es la temperatura promedio a lo largo del captador. Sin embargo, el fluido de transferencia de calor es más frío en la sección de entrada que en la de salida y esta variación de temperaturas no es necesariamente lineal, generando así un gradiente de temperaturas a lo largo del captador. Por esta razón, el modelo de SolCoSi también considera una discretización en la dirección longitudinal (a lo largo) del captador solar. El captador solar es dividido en pequeños captadores solares (volúmenes de control) con menor longitud que la longitud total pero con el mismo ancho y alto.

Las ecuaciones gobernantes discretizadas del flujo de fluido (continuidad, momentum y energía) son acopladas usando un método completamente implícito paso por paso en la dirección del flujo. A partir de los valores conocidos a la entrada y las condiciones en la frontera del absorbedor, se obtienen iterativamente los valores de las variables a la salida en cada volumen de control para las ecuaciones gobernantes discretizadas [14]. Los valores a la salida de cada volumen de control son usados como valores a la entrada del volumen de control subsecuente. La Figura 2 muestra la discretización de los volúmenes de control en la dirección del fluido de transferencia de calor (eje longitudinal). Para mayor detalle del modelo matemático ver Pérez-Espinosa y García-Valladares, 2016 [15].

2.2 Programación

El proceso de solución es obtenido con base en un algoritmo global (programado en lenguaje C) que resuelve el flujo de fluido dentro de los largueros con un algoritmo de volúmenes de control (a lo largo) y las diferentes capas en la dirección axial (a lo alto) de un captador solar con la resolución de las ecuaciones de energía y un análisis solar térmico. El diagrama de flujo del algoritmo numérico de SolCoSi se muestra en la Figura 3.

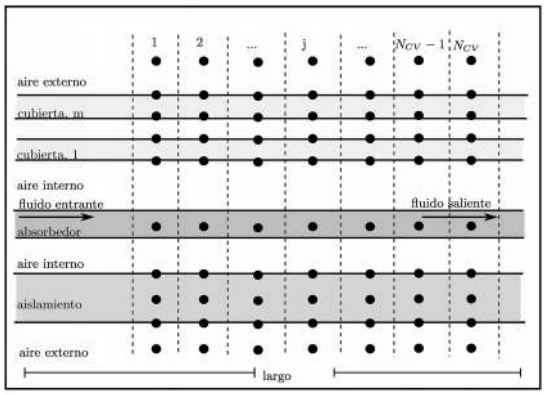


Fig. 2 Discretización a lo largo del captador solar plano.

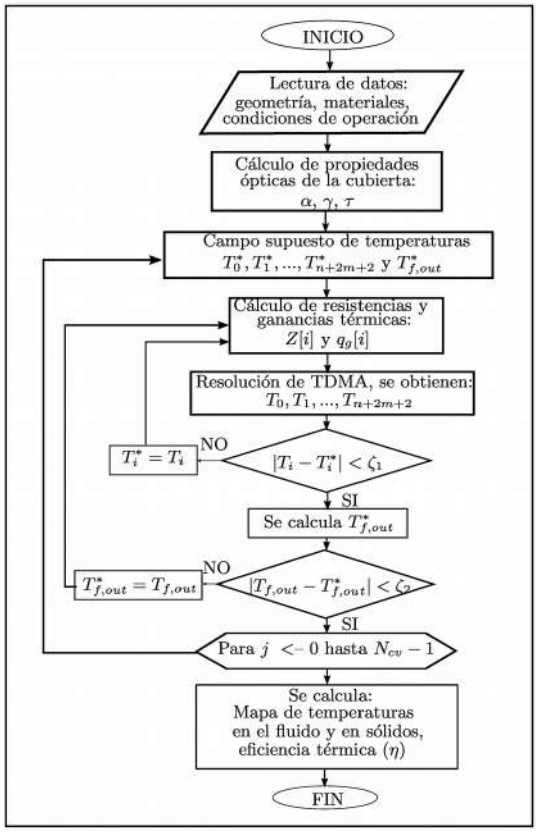


Fig. 3 Diagrama de flujo del algoritmo numérico de SolCoSi.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar SolCoSI se llevó a cabo una comparación con los datos experimentales de 7 captadores solares planos comerciales evaluados con base la norma internacional ISO-9806:2015 [16] en diferentes laboratorios acreditados alrededor del mundo. Los captadores solares incluyen diferentes geometrías, materiales y condiciones de prueba. Una comparación adicional se llevó a cabo con los mismos captadores solares con los resultados obtenidos usando CoDePro [12] (de sus siglas Collector Design Program, el cual es un software gratuito desarrollado para obtener las curvas de eficiencia térmica de captadores solares planos).

3.1 Eficiencia térmica

La Figura 4 muestra la comparación de la curva de eficiencia térmica obtenida con SolCoSi contra la obtenida experimentalmente y la obtenida con CoDePro de un captador solar nombrado como D. La Tabla 1 muestra los coeficientes (A_0, B_0 y C_0) de la regresión cuadrática $\eta=A_0+B_0(\Delta T/G)+C_0(\Delta T^2/G)$, con $\Delta T=T_{fav}-T_a$ para el caso de la norma europea EN-12975-2:2006 [17] y $\Delta T=T_{in}-T_a$ cuando se evalúa con la norma mexicana NMX-ES-001-NORMEX-2005 [18] obtenidos para cada curva. Para mayor información de la comparación con los captadores comerciales ver Pérez-Espinosa y García-Valladares, 2016 [15].

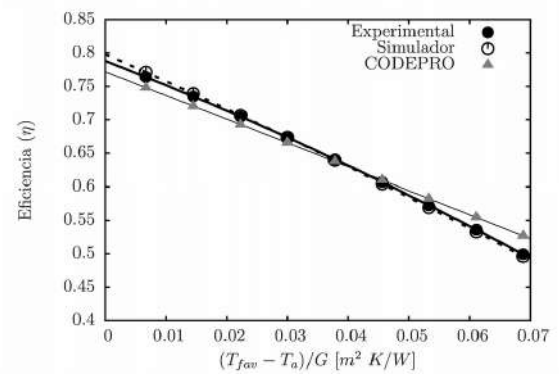


Fig. 4 Comparación de las curvas de eficiencia térmica.

Tabla 1. Coeficientes de la curva cuadrática de eficiencia térmica.

Modelo	A_0	B_0	C_0
Experimental	0.788	-3.522	-0.0100
SolCoSi	0.796	-4.156	-0.0063
CoDePro	0.772	-3.541	-0.0003

La Tabla 2 muestra el porcentaje de error de SolCoSi y CoDePro contra los datos experimentales de los 7 captadores solares. El signo en esta tabla indica si la eficiencia térmica fue sobrestimada (+) o subestimada (-).

Tabla 2. Desviación de valores numéricos contra experimentales.

		SolCoSi		CoDePro	
Captador solar	Puntos	%Max	%Min	%Max	%Min
A	8	2.63	1.51	7.33	3.54
B	8	2.43	1.28	7.54	4.63
C	8	-10.72	-5.76	-6.52	-4.04
D	16	-2.79	-1.67	2.15	1.74
E	8	4.12	3.32	-6.40	-6.38
F	14	-15.99	-5.83	-10.42	-5.18
G	8	-1.34	-1.07	-2.59	-1.73
Promedio absoluto		±5.71	±2.92	±6.14	±3.89

3.2 Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico se aplicó un algoritmo de detección/rechazo usando el software DODESSYS (de sus iniciales en inglés Discordant Outlier Detection ans Separation System) [20]. Después de este método dos datos obtenidos por SolCoSi fueron removidos mientras que ocho datos obtenidos por CoDePro tuvieron que ser removidos; el resto de los datos fueron ordenados en 27 grupos debido a que algunos datos presentan valores similares. Una vez obtenidos los grupos fue posible obtener un peso (w) para cada uno de acuerdo al método de mínimos cuadrados ponderados (WLS de sus siglas en inglés Weighted Least-Squeres) [21].

Los resultados numéricos obtenidos son gráficamente representados por los puntos en la Figura 5. Las ecuaciones lineales correspondientes a cada conjunto de puntos se obtuvieron usando el programa estadístico R [21]. Para mayor información del análisis estadístico ver Pérez-Espinosa y García-Valladares, 2016 [15].

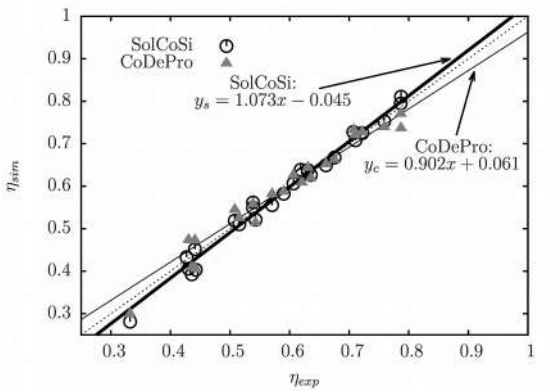


Fig. 5 Comparación de la eficiencia térmica experimental contra los valores numéricos.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló exitosamente un simulador para captadores solares (SolCoSi). El modelo discretiza un captador solar plano en las direcciones axial y longitudinal y puede ser usado para determinar la curva eficiencia térmica, el ángulo modificador incidente y la distribución de temperaturas en el fluido de transferencia de calor y en los sólidos de los captadores solares. SolCoSi permite el análisis de diferentes configuraciones, condiciones de trabajo y fluidos junto con diferentes componentes como superficies selectivas, cubierta múltiple, diferentes aislantes, espacios de aire, materiales y tamaños de aletas y largueros, etc.

Se llevó acabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos tras la simulación usando un amplio rango de datos de eficiencia térmica de 7 captadores solares comerciales certificados en diferentes laboratorios; la desviación media obtenida fue de ±2.9%. Gracias al análisis estadístico se pudo confirmar la buena relación lineal entre los datos experimentales y los predichos con SolCoSi.

El modelo numérico está basado en la aplicación de leyes físicas y ecuaciones empíricas generales, además de haber sido validado con un amplio rango de datos experimentales. Lo anterior le permite ser usado como una herramienta importante para el diseño y optimización de captadores solares planos. El modelo desarrollado se encontrará disponible como un software gratuito en inglés y español en el sitio web: http://solcosi.ier.unam.mx/.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por los siguientes proyectos: proyecto FORDECYT 190603 y proyecto CEMIE-Sol 12. También se agradece a Módulo Solar por la información técnica provista acerca de sus captadores solares planos comerciales.

REFERENCIAS

[1] Wang N., Zeng S., Zhou M., Wang S., (2015). Numerical study of flat plate solar collector with novel heat collecting components, International Communications in Heat and Mass Transfer 69, p. 18–22.

[2] I. E. A. (IEA), Energy technology perspectives 2015: Mobilising innovation to accelerate climate action (2015).

[3] IEA., Energy Use in the New Millennium: Trends in IEA Countries, OECD Publishing, (2007).

[4] Duffie J. A., Beckman W. A., (2013). Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons.

[5] Cadafalch J., (2009). A detailed numerical model for flat-plate solar thermal devices, Solar Energy 83 (12), p. 2157–2164.

[6] Hamed M., Fellah A., Brahim A. B., (2014). Parametric sensitivity studies on the performance of a flat plate solar collector in transient behavior, Energy Conversion and Management 78, p. 938–947. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.044.

[7] Deng J., Xu Y., Yang X., (2015). A dynamic thermal performance model for flat plate solar collectors based on the thermal inertia correction of the steady state test method, Renewable Energy 76, p. 679–686.

[8] Facäo J., (2015). Optimization of flow distribution in flat plate solar thermal collectors with riser and header arrangements, Solar Energy 120, p. 104–112.

[9] Soriga I., Badescu V., (2016). Thermal inertia of flat-plate solar collectors in different radiative regimes, Energy Conversion and Management 111, p. 27–37.

[10] Fiksel A., Thornton J., Klein S., Beckman W., (1995). Developments to the trnsys simulation program, Journal of Solar Energy Engineering 117 (2), p. 123–127.

[11] D. V. E. GmbH, (1999). T-sol 2.0 user manual .

[12] T. U. of Wisconsin, (2005). Collector Design Program, CoDePro, URL: http://sel.me.wisc.edu/codepro/new codepro.html.

[13] Patankar S., (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, CRC press.

[14] Garcıa-Valladares O., Perez-Segarra C., Oliva A., (2002). Numerical simulation of capillary-tube expansion devices behaviour with pure and mixed refrigerants considering metastable region. part i: mathematical formulation and numerical model, Applied thermal engineering 22 (4), p. 379–391.

[15] Pérez-Espinosa R., García-Valladares O., (2016). Numerical Simulation and Experimental Validation of the Thermal Performance of Flat Plate Solar Collectors, enviado a la revista Solar Energy.

[16] International standard ISO9806:2015 Solar energy - solar thermal collectors - test methods.

[17] Standard EN-12975-2:2006: Thermal solar systems and components. Solar collectors. Test methods.

[18] Norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 energía solar - rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua – métodos de prueba y etiquetado.

[19] Verma S. P., Díaz-González L., (2012). Application of the discordant outlier detection and separation system in the geosciences, International Geology Review 54 (5), p. 593–614.

[20] Verma S., Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en la geoquímica (geoquimiometría): México, DF, Universidad Nacional Autónoma de México.

[21] R. C. Team, (2013). R: A language and environment for statistical computing [internet]. vienna, austria: R foundation for statistical computing; Document freely available on the internet at: http://www. r-project. org.

40 AÑOS ANES Asociación Nacional de Energía Solar
XL Semana Nacional de Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"
ISES International Solar Energy Society

EVALUACIÓN DE LA POTENCIA TÉRMICA EN CONFIGURACIÓN SERIE-PARALELO DE COLECTORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO PARA ACONDICIONAMIENTOS DE ESPACIOS

Luis Santiago Jiménez Ávila[1], Rosenberg Javier Romero Domínguez[2,*]

[1] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencia Aplicadas (CIICAp). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad No. 101. Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, MEXICO. luis.jimenezavi@uaem.edu.mx
[2] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencia Aplicadas (CIICAp). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad No. 101. Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, MEXICO.* rosenberg@uaem.mx

RESUMEN

El presente trabajo muestra la evaluación de la configuración serie-paralelo para la potencia térmica de colectores solares de canal parabólico (CCPs) mediante las condiciones de irradiancia y temperatura ambiente del Valle de Cuernavaca. La evaluación de la configuración requiere de un ciclo termodinámico para acondicionamientos de espacios; con la finalidad de ahorrar energía y reducir el impacto al medio ambiente. Los resultados muestran la potencia térmica requerida por medio de un flujo másico constante de etilenglicol como fluido de transferencia de calor; así como sus propiedades termodinámicas con el fin de conocer el número de CCPs empleados por el ciclo termodinámico. Se concluyó que la configuración en serie-paralelo de CCPs para el acondicionamiento de espacios y la instrumentación requerida para el campo solar cubrieron las necesidades del proyecto, obteniendo así un ahorro energético y la disminución de CO_2 en la atmósfera, al emplear un sistema fototérmico autónomo asistido por energía solar.

ABSTRACT

This paper presents the evaluation of series-parallel configuration for thermal power parabolic trough solar collectors (CCPs) by irradiance conditions and ambient temperature Cuernavaca Valley. The assessment of configuration of a thermodynamic cycle required for conditioning of spaces; with the purpose of save energy and reduce the environmental impact. The results show the thermal power required by way of a constant mass flow of ethylene glycol as the heat transer fluid; as well as their thermodynamic properties so as know the number of CCPs employed by the thermodynamic cycle. It was concluded that the configuration serial-parallel CCPs for the space conditioning and instrumentation required for the solar field met the needs of the project, obtaining energy savings and reduction of CO_2 in the atmosphereby employing an autonomous photothermic system solar assisted.

Palabras claves: acondicionamiento, fototérmico, potencia, sistema, campo solar

INTRODUCCIÓN

La economía de un país se ve repercutida por las actividades productivas del hombre significando una demanda en el uso de la energía principalmente en el sector industrial, por ende, su crecimiento se ve reflejado en un contexto social, económico y ambiental.

Hoy en día, el consumo de la energía eléctrica es indispensable para cualquier actividad. México, al ser uno de los países en vías de desarrollo consume cada vez mayores cantidades de energía albergando un problema en la extracción y el uso ineficiente de los recursos no renovables como es el petróleo. Asimismo, las actividades productivas y la generación de la energía eléctrica para el consumo de las mismas tienen como consecuencia emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*) a la atmosfera ocasionando el aumento de la temperatura media de la corteza terrestre y por ende acelerando el cambio climático. Entre los GEI que aceleran el cambio climático se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrofluorocarbonos (HFC), solo por mencionar algunos. Por lo tanto, una de las medidas para mitigar el cambio climático es el uso energías renovables mediante el desarrollo de tecnologías emergentes [1].

Entre las alternativas para producir electricidad se encuentran las energías alternas, las cuales se consideran como fuentes de energías renovables y administradas adecuadamente pueden explotarse de manera ilimitada.

La principal fuente de energía renovable es el Sol. Así mismo, la cantidad de esta energía fuera de la atmósfera define la constante solar o también llamada irradiación, considerándose como la energía captada en el espacio fuera de la atmosfera por una superficie de un metro cuadrado por un segundo (W/m^2) [2].

Actualmente el uso más común de la energía térmica, es en el área térmica teniendo aplicación en calentamiento de agua. Es así que este trabajo de investigación se centra en la utilización de CCP para generación de calor que sea utilizable en un sistema de aire acondicionado autónomo sin el empleo del suministro eléctrico convencional. Kumar y Reddy mencionan que los CCP son una

prometedora fuente de energía de alta temperatura que ha experimentado un el crecimiento del mercado. Se emplean de manera eficiente para alta temperatura (300 a 400 °C) sin ninguna degradación seria en la eficiencia. Por otra parte, esta tecnología es considerada la tecnología térmica solar más establecida para la producción de energía [3, 4, 5].

La era moderna de la energía solar empezó a despegar por la crisis petrolera de 1973 incrementando la investigación y desarrollo de distintos tipos de captación y aprovechamiento de la energía solar. En las últimas décadas la tecnología a base de energía solar ha pasado la fase experimental y ha evolucionado hacia la industria ofreciendo un gran potencial al mundo en la producción de energía barata a largo plazo, renovable y sin producción de contaminantes en su operación. Así, la energía solar cada vez encuentra más aplicaciones sumamente prácticas y atractivas como es el acondicionamiento de espacios [6].

Kalogirou y Tripanagnostopoulos comentan que los sistemas térmicos de enfriamiento solar son utilizados para brindar confort en el sector residencial, comercial e industrial. Para aprovechar la energía térmica proveniente del Sol es necesario usar sistemas de captación solar mediante colectores. Estos sistemas de captación deben mantener una eficiencia térmica estable en el sistema de 60-80°C [7].

Entre las configuraciones para la instalación de estos sistemas se mencionan las de serie que son aquellas en donde las terminales están unidas por un solo circuito; mientras que las configuraciones en paralelo se definen por ser interconexiones por más de una ramificación a través del cual se traslada el fluido de trabajo [8].

Parte Experimental

Para la evaluación de la potencia térmica de un número de colectores solares de canal parabólico se realizaron las siguientes etapas para el diseño e instalación de sistemas fototérmicos, las cuales son:

- **Etapa 1. Adquisición de información meteorológica y operacional de CCPs.**

Se adquirieron datos climatológicos del Valle de Cuernavaca, las especificaciones de operación de los CCPs con base a su área de captación solar y el fluido de transferencia de calor circundante por el tubo de absorción.

- **Etapa 2. Interpretación de los datos obtenidos.**

Se realizó una evaluación teórica con los datos obtenidos mediante el software Excel con el fin de estimar las condiciones de operación del fluido de transferencia de calor.

- **Etapa 3. Calculo de las potencias térmicas para configuraciones en serie-paralelo.**

Se realizó la potencia térmica para un CCP, seguido de ello se realizó la potencia térmica total para una configuración en serie-paralelo con el fin de estimar el número de colectores solares para la potencia térmica demandada de 17.6 kW por el ciclo termodinámico.

- **Etapa 4. Análisis de la potencia obtenida.**

Se realizó la evaluación de las configuraciones serie-paralelo de CCPs con el fin de estimar su ahorro energético y por ende la disminución de CO_2 atmosférico durante su operación.

Resultados. En esta sección, se realiza la evaluación de la potencia térmica de CCP para acondicionamiento de espacios con una carga térmica de 17.5 kW. Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes resultados por etapa.

- **Etapa 1. Adquisición de información meteorológica y operacional de CCPs.**

Se obtuvieron datos de la estación meteorológica de la CONAGUA ubicada en Cuernavaca, Mor. Sin embargo, para el cálculo de la potencia térmica se utilizó una irradiancia de 800 W/m^2 debido a que la NMX-ES-001-NORMEX-2005 dice que para el procedimiento no se debe exponer el colector a una radiación menor de 700 W/m^2.

El clima es un factor de importancia en la operación del sistema. De acuerdo a CONAGUA, la temperatura máxima y mínima promedio en los últimos 10 años es 31 y 23°C, respectivamente. Asimismo, el registro de la humedad relativa del Valle de Cuernavaca cuenta con los valores entre 50 y 70%, con registros máximos en el mes de Septiembre debido a la temporada de lluvias.

Por otro lado, los CCPs usados en la operación tienen un área total de 5.25 m^2 de captación solar, y, el área transversal del tubo absorbedor por donde circunda el etilenglicol como fluido de trabajo es 0.002 m^2.

- **Etapa 2. Interpretación de los datos obtenidos.**

Para evaluar el número de CCPs necesarios para obtener una potencia térmica de 26.92 kW en el generador de un ciclo de absorción se interpretaron los datos obtenidos en la etapa 1 mediante la herramienta de Excel, en la figura 1 se muestran los datos de temperatura con respecto a su densidad a una [] del 50%. Cabe señalar que el punto de fusión y ebullición del etilenglicol es de -12 y 197°C, respectivamente.

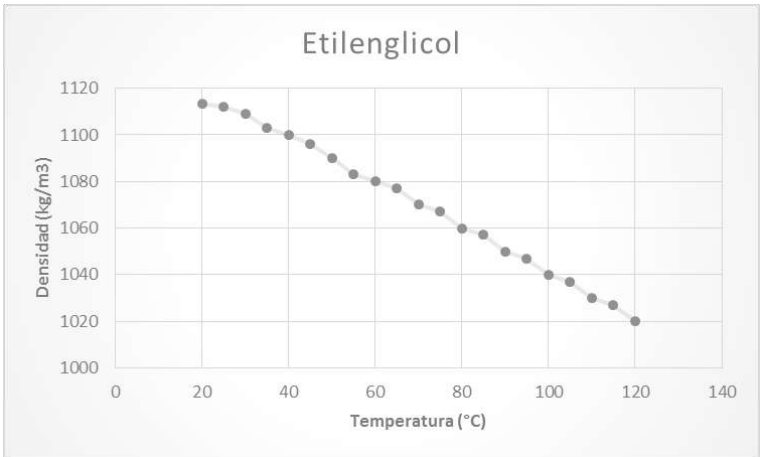


Figura 1. Comportamiento de la densidad con respecto a la temperatura

De acuerdo a la figura anterior, se observa que a mayor temperatura la densidad del etilenglicol desciende asintóticamente. Por lo tanto, el comportamiento que tiene la densidad en los colectores solares no será representativa debido a que no representa una diferencia notable debido a su punto de fusión y ebullición.

- **Etapa 3. Cálculo de las potencias térmicas para configuraciones en serie-paralelo.**

Para la evaluación del número de colectores necesarios para la potencia térmica establecida en la investigación se consideró los datos de la tabla 1 mediante una configuración en serie, debido a que el arreglo en paralelo no ofrecía la potencia térmica requerida para el sistema.

Tabla 1.Evaluación del número de CCPs en configuración en serie

Núm. colectores	Área (m2)	I (kW/m2)	Q_T (kW)	Potencia (kW)	m (kg/s)	Cp (kj/kg°C)	T_1 (°C)	T_1+1 (°C)	n	ΔT (°C)
1	5.25	0.80	3.4	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
2	5.25	0.80	3.3	6.7	0.115	3.74	32.9	40.4	0.78	7.5
3	5.25	0.80	3.1	9.8	0.115	3.74	40.4	47.7	0.74	7.2
4	5.25	0.80	3.0	12.8	0.115	3.74	47.7	54.6	0.71	6.9
5	5.25	0.80	2.8	15.6	0.115	3.74	54.6	61.2	0.68	6.6
6	5.25	0.80	2.7	18.3	0.115	3.74	61.2	67.5	0.65	6.3
7	5.25	0.80	2.6	20.9	0.115	3.74	67.5	73.5	0.62	6.0
8	5.25	0.80	2.5	23.4	0.115	3.74	73.5	79.2	0.59	5.8
9	5.25	0.80	2.4	25.8	0.115	3.74	79.2	84.7	0.57	5.5
10	5.25	0.80	2.3	28.1	0.115	3.74	84.7	90.0	0.54	5.3

De acuerdo a la potencia térmica demandada de 26.92 kW, el número necesario de CCPs con respecto a los datos obtenidos en la tabla 1 corresponden a 10. Con respecto a lo anterior, la potencia térmica se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Q_T = A * I * \eta \quad (1)$$

Donde:

Q_T Potencia térmica, (kW)
A Área, (m^2)
I Irradiancia solar, (kW/m^2)
η Eficiencia térmica

A continuación se muestra la evaluación del número de CCPs en configuración en paralelo correspondiente a la tabla 2.

Tabla 2.Evaluación del número de CCPs en configuración en paralelo

Núm. colectores	Área (m2)	I (kW/m2)	Potencia (kW)	m (kg/s)	Cp (kj/kg°C)	T_1 (°C)	T_1+1 (°C)	η	ΔT (°C)
1	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
2	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
3	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
4	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
5	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
6	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
7	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
8	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
9	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9
10	5.25	0.80	3.4	0.115	3.74	25.0	32.9	0.81	7.9

Con respeto a la tabla anterior, se observa que la temperatura y potencia obtenida en la salida de cada CCPs no es representativa de acuerdo a las necesidades del trabajo. Por ende, la alternativa adecuada para el sistema fototérmico es la utilización de una configuración en serie para la instalación del canal hidráulico.

- **Etapa 4. Análisis de la potencia obtenida.**

De acuerdo a los datos obtenidos en el Software Excel, se menciona que la potencia máxima dada por 10 colectores solares conectados en serie es de 28.1 kW, sin embargo, la potencia térmica limite necesaria para que el sistema de acondicionamiento de aire funcione de manera óptima es de 26.91 kW. La potencia térmica obtenida será la requerida para el generador (primer componente de un ciclo por absorción) de una maquina térmica.

De acuerdo al Programa de GEI México para la evaluación en la reducción de las emisiones de CO_2 con respecto a la potencia térmica demandada por el sistema se muestra en la tabla 2 el factor de emisión de CO_2 para diferentes tipos de combustibles.

Tabla 3. Modificación del factor de emisión de CO_2 de diferentes tipos de combustibles (SEMARNAT (Programa GEI México))

Combustible	Factor de emisión (kg de CO_2/kwh)
Carbón	0.34
Diésel	0.27
Combustóleo	0.28
Gas natural	0.20

Finalmente, se determinó la reducción de kg de CO_2 mediante la siguiente ecuación:

$$Emisiones = \sum consumo\ de\ combustibles * factor\ de\ emisiones \quad (2)$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Carbón……$Emisiones = 19.60\ kwh * 0.34\ \frac{\text{kg de } CO_2}{kwh} = 6.66\ kg\ de\ CO_2$

Diésel……..$Emisiones = 19.60\ kwh * 0.27\ \frac{\text{kg de } CO_2}{kwh} = 5.30\ kg\ de\ CO_2$

Combustóleo……..$Emisiones = 19.60\ kwh * 0.28\ \frac{\text{kg de } CO_2}{kwh} = 5.49\ kg\ de\ CO_2$

Gas natural…….$Emisiones = 19.60\ kwh * 0.20\ \frac{\text{kg de } CO_2}{kwh} = 3.92\ kg\ de\ CO_2$

Un ciclo de absorción accionado con energía solar fototérmica es una alternativa para la reducción en las emisiones de CO_2. Esto se aprecia de acuerdo a los resultados obtenidos de la ecuación 1. Cabe mencionar que los kg de CO_2 son valores representativos por una hora de operación del sistema fototérmico autónomo asistido por energía solar.

Conclusiones. De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye:

- La operación del sistema de aire acondicionado solar requiso un campo de 10 CCPs obteniendo una potencia térmica de 28.1 kW garantizando así la operación del ciclo termodinámico.
- El sistema fototérmico funcionó mediante una configuración en serie, debido a que se obtiene una mayor potencia y temperatura en comparación a una configuración en paralelo.
- La evaluación de la potencia térmica en configuraciones serie-paralelo para condicionamiento de espacios amplían las investigaciones en el uso eficiente de las energías renovables, logrando así promover la implementación de sistemas que estén enfocados en la sustitución de la energía convencional y apostando por nuevas tecnologías que aporten beneficios en diferentes procesos.
- De acuerdo al Programa de *GEI* y a los cálculos realizados en el presente trabajo de investigación; la energía solar térmica es una alternativa para la mitigación de *GEI* debido a que en su proceso mitigo 6.66 kg, 5.30 kg, 5.49 kg y 3.92 kg de emisiones de CO_2 procedentes de fuentes como carbón, diésel, combustóleo y gas natural, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos CONACYT-CB-167434 y CEMIE-SOL-P09 por el apoyo para el financiamiento de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (*INECC*), "México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. p. 61-62. México, Ed. Instituto Nacional de Ecología (*INE*), 2010.
2. Méndez, J., Cuervo R. y ECA ITF, "Energía solar", Energía Solar Térmica. p. 31-33, España. Ed. Fundación Confemetal (FC), 2008.
3. Zhao D., Xu E. Wang Z., Yu Q., Xu L. (2016). Influences of installation and tracking errors on the optical performance of a solar parabolic trough collector, Renewable Energy, Vol. 94, p. 197-212.
4. Kumar K.,Reddy K. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver, Applied energy, Vol. 86, p. 1804-1812.
5. Kizilkan O., Kabul A., Dincer I. (2016). Development and performance assessment of a parabolic trough solar collector-based integrated system for an ice-cream factory, Energy, Vol. 100, p. 167-176.
6. Valdes, B. & Serie Conmemorativa 50 aniversario UABC. (2006). Tecnología en la UABC, p.93-99. Ed. Porrúa, B. California, México.
7. Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. (2005). Industrial application of PV/T solar energy systems. Applied Thermal Engineering, Vol. 27, p.1259–1270.
8. Mendoza, C. (2004). Circuitos de ca en serie y en paralelo". *Introducción al análisis de circuitos*, p. 636-660, Ed. Pearson Educación,
9. Norma Mexicana. NMX-ES-001-NORMEX-2005.
10. SEMARNAT (Programa *GEI* México). (s.f). Recuperado el 13 de noviembre de 2015, de http://www.geimexico.org/factor.html