

REVISTA DE **Energías**

RENOVABLES



ANES®

**Asociación
Nacional de
Energía Solar**

PUBLICACIÓN TRIMESTRAL

OCT-DIC 2018

Certificado de reserva al uso exclusivo del Título:
No. 04-2014-101414142700-203
Registro ISSN: 2395-9304

36



**GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN MÉXICO:
UN FUTURO IMPULSADO
POR EL SOL**

**EXPLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA ¿CUANDO Y POR QUÉ?**

PERTURBACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL AGUA PARA MEJORAR LA EFICACIA DE DESTILADORES SOLARES

**LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA
Y SU PARTICIPACIÓN EN LA MATRIZ ELÉCTRICA**

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN FOTVOLTAICA DISTRIBUIDA CONECTADA A RED EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE VILLA MARÍA

Estimados lectores:

Los profesionales enfocados al sector energético, sin duda alguna, consideran a Alemania como uno de los países pioneros en lo referente al aprovechamiento de fuentes alternas de energía.

La Admiración que se genera, se basa en las condiciones climáticas del país nórdico, donde solo pocas horas al año, principalmente en la primavera, la potencia proveniente de energías renovables como la eólica y fotovoltaica alcanzan la capacidad instalada de México, que son alrededor de 79 GW. Por otro lado, es importante mencionar que Alemania genera otra parte de su energía eléctrica a partir de termoeléctricas basadas en la quema de combustibles, como carbón lignito y bituminoso, las cuales suman una capacidad total de 46 GW (Valor equivalente al 58% de la capacidad instalada en México). Basta de seguir por el camino equivocado, ante ello la importancia de tener un plan estratégico para cumplir con las metas impuestas sobre la reducción de gases de efecto invernadero, que plantea decir adiós al carbón para el año 2038. El cálculo, que fundamenta el plan estratégico es complejo para pronosticar el costo de la energía eléctrica y a su vez el bienestar económico, sin embargo, puntos elementales como la aplicación de tecnología LED en la iluminación, que reduce el gasto energético por más del 20% en comparación al foco ahorrador convencional debe de contener.

Tomando en cuenta la parte económica, el reemplazo de un foco ahorrador de 13 W por uno de LED, que representa una inversión de 50 pesos y un uso de 1500 horas al año el ahorro energético, será de 3.75 kWh al año considerando la tarifa eléctrica DAC (sin subsidio) como costo justo de la energía eléctrica, el ahorro resultante es de 20.75 pesos al año, alcanzando una amortización en menos de 3 años, derivado de ello podrá surgir el siguiente planteamiento ¿Qué tan reduciéndose son otras medidas de reducción de emisión de gases de efecto invernadero como por ejemplo sistemas fotovoltaicos? ¿Usted ya cuenta con una cotización de un sistema fotovoltaico para su domicilio o ya está contabilizando el rendimiento de un sistema implementado? Es momento de hacerlo.

En esta edición de la revista ANES nos informa sobre los sistemas tarifarios en México con dos contribuciones: Victor Ramírez y Sebastian Guzmán Diaz. También agradecemos a nuestros hermanos de Argentina por el envío de dos artículos por parte de su asociación ASADES: Julio Durán y Juan Cruz Medina. Igualmente agradecemos la aportación de nuestro fundador, Dr. José Luis Fernández Zayas, con una contribución sobre mejoramientos en sistemas de destilado solar.

Dr. Bernd Weber
Secretario de publicaciones

Contenido

	Pag.
EXPLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ¿CUANDO Y POR QUÉ?	3
GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN MÉXICO: UN FUTURO IMPULSADO POR EL SOL	6
LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA Y SU PARTICIPACIÓN EN LA MATRIZ ELÉCTRICA	10
ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DISTRIBUIDA CONECTADA A RED EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE VILLA MARÍA	17
PERTURBACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL AGUA PARA MEJORAR LA EFICACIA DE DESTILADORES SOLARES	24

REVISTA **Energías** Año 4 Núm. 36, OCT-DIC 2018

RENOVABLES

La Revista Energías Renovables, es el órgano oficial de comunicación de la Asociación Nacional de Energía Solar, AC, hecha por especialistas en energías renovables y dirigida al medio especializado, así como a ciudadanos interesados en formar parte del cambio energético tan urgente en México, así como en todo el mundo.

Dr. Lourdes Angélica Quiñones Juárez
Presidente
Dra. Karla Cedano
Vicepresidenta
Ing. Elizabeth Jiménez Trejo
Tesorero
Mtro. Javier Romero
Secretaría de Asuntos Industriales
M. I. Héctor Hernández
Secretario de Proyectos Estratégicos
M.I. Elsa Bernal
Secretario de Organización
Dr. Bernd Weber
Secretario de publicaciones

Dra. Guadalupe Moreno
Secretario de capacitación
Ing. Daniel Moreno Lawrence
Secretario de Normatividad
Dr. Ivan Martínez Cienfuegos
Secretario de Secciones Regionales
Dr. Iván Salgado Transito
Secretaría de Vinculación
Dr. Adolfo Finck Pastrana
Secretario General
Manuel Pérez Sánchez
Secretaría de Asuntos Estudiantiles
Daniel Calderón Xelhuantzi
Secretario de Asuntos Financieros

Editor Responsable: **Dr. Bernd Weber**, Secretario de Publicaciones y Comité Editorial; Edición; Coordinadora Editorial: **Dafne Krimis**, Diseño Gráfico y Dirección de Arte: **Rodrigo Cárdenas Torres**; Consejo Editorial: Dr. José Luis Fernández Zayas, Dr. David Morillón Gálvez, Dr. Eduardo A. Rincón Mejía, Ing. Odón de Buen Rodríguez.

La Revista Energías Renovables, Año 4, Número 36, OCT-DIC 2018, es una publicación trimestral editada por la Asociación Nacional de Energía Solar, AC, Insurgentes Sur 1748-303 Col. Florida, Álvaro Obregón D.F.C.P. 01030 | Tel: 5661-3787 E-mail: anes@anes.org Editor responsable: Dr Adolfo Finck Pastrana . Reserva de derechos ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Certificado de reserva al uso exclusivo del Título: No. 04-2014-101414142700-203. Registro ISSN: 2395-9304

Los artículos que aparecen en la revista de Energías Renovables son responsabilidad única y exclusiva de los autores y no representan necesariamente el pensamiento de los editores ni de la Asociación Nacional de Energía Solar, A.C.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio audiovisual, electrónico o impreso sin autorización por escrito de los editores y del autor.

Producto Editorial Hecho en México



Explicación de las metodologías de Generación Distribuida ¿cuando y por qué?

Por la propia actividad de la Asociación Nacional de Energía Solar es que diariamente estoy en contacto con instaladores de sistemas fotovoltaicos de todo el país. Si bien es un mercado pujante y creciente, no todos se han involucrado con la seriedad que la actividad requiere o no todos lo hacen de forma completa.

Hay muchos excelentes técnicos que desconocen la parte legal de la generación distribuida, y es en estos puntos donde quiero enfocarme: explicar por qué cada uno de los modelos de interconexión y responder algunas presuntas comunes de los instaladores y gestores.

Estos modelos derivaron de la resolución RES/142/2017 que son las Disposiciones Administrativas de Caracter General **(DACG)** en materia de Generación Distribuida y que, en conjunto con el Manual de Interconexión para Centrales Eléctricas de menos de 500 kW son, en los hechos, el reglamento del artículo 21 de la Ley de la industria Eléctrica, o la forma administrativa como se regula la generación distribuida.

¿Que incluye? Tres esquemas de interconexión:

1. Netmetering o medición neta.

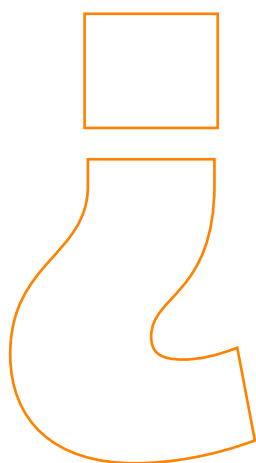
Es el modelo que existe desde 2007, en donde se instalan paneles, se conectan a un inversor, el inversor al circuito doméstico y la energía se consume. La energía que no se consume es inyectada a la red. Durante el tiempo que no hay generación (en la noche en el caso de la generación solar) la energía que el sistema doméstico requiere se toma de la red, y cada periodo de facturación se hace un balance entre lo inyectado y lo tomado. Antes de las actuales DACG, si el sistema generaba más energía de la que se consumía, la energía se perdía. Actualmente si eso pasa, la energía se paga a Precio Marginal Local Promedio. Si se tiene más consumo que generación, se paga antes y ahora la diferencia. Este modelo es ideal para aquellos que tienen facturación eléctrica de alto costo, como las tarifas comerciales o la doméstica de alto consumo. En estos casos (que son los que no tienen subsidio) los retornos de inversión han llegado a menos de tres años. Ah, la energía se perdía no porque CFE quisiera, sino porque era inconstitucional que cualquiera generara y vendiera energía.

2. Netbilling o facturación neta.

Se instalan paneles, inversor, y se conecta con un medidor para inyectar TODA la energía generada. El consumo de energía se sigue haciendo como siempre y se paga a la misma tarifa que siempre. La energía que se inyecta se paga a Precio Marginal Local Horario. Por eso, requiere un medidor especial ya sea con memoria o con comunicación permanente. Esta modalidad es ideal cuando tienes tarifas por debajo del precio de energía, como en los casos de las tarifas subsidiadas. Todo usuario en tarifa 1 puede realizar este tipo de interconexiones y tener retornos de inversión en menos de 5 años. Esta modalidad se inventó para quienes quieren ser responsables, generar su energía, pero por tener tarifa subsidiada no les hacía lógica económica hacer la inversión en netmetering.

3. Finalmente la venta total.

Esa modalidad su nombre lo dice todo. No está vinculada a un centro de consumo de energía. Toda la energía que se genera se vende y se paga a Precio Marginal Local Horario también, por lo que su medidor es el mismo que en netbilling. Esta modalidad es para quien tiene algún terreno "ocioso" cerca de un circuito de distribución, o que en su terreno se lleven a cabo actividades que no usan electricidad, como algunos estacionamientos. Este modelo viene a cambiar la perspectiva de la generación distribuida, pues ya no es sólo para ahorrar, sino para hacer negocios.



Ahora, hay algunas preguntas que son comunes en los instaladores y procuro resolverlas a continuación:



¿Cuándo se necesita unidad de inspección?

Siempre que haya una instalación en media tensión. No importa si tienes un proyecto de 10 o 50 kW, si está interconectado en media tensión, se requiere la unidad de inspección.

¿Se pueden instalar capacidades mayores a 500 kW?

Si, siempre que la salida del inversor sea máxima de 499 kW. Lo que se mide siempre es en corriente alterna.

¿Que costo tiene la interconexión?

Nada, y de hecho el suministrador de servicios básicos (que por el momento sólo está CFE) está obligado a conectarte, siempre que cumplas con las disposiciones y el manual.

¿Se pueden tener dos sistemas distintos en un mismo predio?

Si, y cada uno con un contrato distinto. De hecho se podrían tener instalaciones mayores a 500 kW, pero dividiendo para que ningún contrato rebase los 499 kW. Cada uno requerirá una persona distinta para firmar el contrato.

¿Se generan Certificados de Energías Limpias en Generación Distribuida?

Si, para eso se requiere instalar un medidor especial (en caso de que sea netmetering) y que una unidad de acreditación de CELs te verifique y darse de alta en el sistema SCEL.

Finalmente, es necesario mencionar que la propia asociación trabaja en algunos proyectos, como que haya DACG que incluyan el mecanismo de CELs, para que se paguen de forma automática en suministro básico, incrementar el umbral para que se considere distribuida la demanda máxima contratada, entre otros.

El proyecto final es incrementar el mercado, la inversión, y mejorar los retornos de inversión, para que haya energía renovable para todos.

¿Si alguien no realiza ningún trámite de interconexión ante de la CFE?

Obviamente es contra la legislación y es un deber para el gobierno de actuar tal manera que en un futuro un propietario de un departamento pueda instalar un módulo PV en su balcón con fines de cubrir algo de su consumo por medio de su propio PV. El problema es: como se requiere una línea separada y conexión especial para acoplar un módulo PV, la normatividad en construcción debe de actualizarse en este sentido. Cabe de mencionar que los medidores antiguos basado en el principio de Galileo Ferraris si girarán a revés al momento que la generación rebase el autoconsumo, lo que con los medidores recientes electrónicos ya no es posible.

¿En todos los países se maneja el mismo principio de esquema tarifaria?

En principio si, sin embargo algunos gobiernos agregan cláusulas, no con fines de hacer el esquema más complejo, más bien para incrementar el consumo en el punto de generación con fines de la implementación de nuevas tecnologías como bancos de baterías, consumo inteligente ("smart home") electro movilidad o el porteo a predios cercanos.

Generación distribuida en México: Un futuro impulsado por el Sol

Ing. Sebastián Guzmán Díaz

Tenorios 222, Edif. 8 Ex Hacienda Coapa,
Del. Tlalpan, 14300, CDMX., México

Tel. +044 (55) 1947 2498 seguzd@gmail.com

Ingeniero en Energías Renovables por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, Estudiante del Diplomado en Administración Estratégica y Desarrollo de Negocios por la Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Socio de la Asociación Nacional de Energía Solar, A.C.

Hablar de un país cuya disponibilidad de recursos naturales sea tan abundante, a lo largo y ancho de todo su territorio, se debe sin duda alguna mencionar a México.

Más aún si se destaca un recurso en particular: el Sol.

A nivel nacional, el promedio diario de radiación solar es de 5.5 kWh/m² llegando a cifras en regiones del Norte y Noroeste del territorio, durante los períodos de primavera y verano, de 8.0 kWh/m² (1). Desde esta perspectiva, se considera que las condiciones son ideales para el aprovechamiento de este tipo de recurso renovable de energía.

Sin embargo, a pesar del panorama de crecimiento a partir de la Reforma Energética de 2013, en la implementación y desarrollo de tecnologías como los sistemas fotovoltaicos, los nichos de oportunidad aún se encuentran muy por debajo de la gran capacidad de generación aprovechable que el recurso solar ofrece en todo el país.

• Distintos contextos

De acuerdo con cifras del REN21 en el Global Status Report (2), de 2009 a la fecha, la tendencia en los costos a nivel mundial de generación eléctrica por medio de este tipo de sistemas solares, se ha reducido en un 70%. Con una aportación durante el período 2010 - 2016 del 58% del total. Circunstancia que ha sido aprovechada por países como China, Estados Unidos, Japón y Alemania. Este último se encuentra entre los de mayor capacidad instalada del mundo, con 42.9 GW en 2017, conforme ha datos de la Asociación Alemana de la Industria Solar (BSW-Solar).

Al igual que México, países como Brasil, Chile e India catalogados como economías en desarrollo y de un considerable potencial de recursos renovables, han realizado en la medida de sus posibilidades, modificaciones en sus estructuras políticas y económicas, permitiendo la atracción de inversiones y el fortalecimiento de sus capacidades técnicas y operativas, para la consolidación de esquemas que favorezcan la implementación de tecnologías renovables para la generación de electricidad a largo plazo (3).

En este sentido, son fundamentales las acciones que el gobierno, la industria y el medio académico realizan, emprendido una labor conjunta, que les permita ser los principales agentes de cambio, con el objetivo de diversificar la matriz energética nacional y con ello, disminuir la proporción en el uso de hidrocarburos. Recurso que de acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2017, representa el 84.5% de la producción total de energía primaria (4) y sigue siendo catalogado en demasía, como el principal vector energético en México.

• Estancamiento forzado

De acuerdo con la Comisión Reguladora de Energía (CRE), existen tres modalidades de contraprestación para Generación Distribuida en México (5):

1. Net Metering: Consiste en la medición neta de energía, en donde al final de cada bimestre se paga el consumo o se cobra el excedente, este último, a partir del primer año de medición, por medio del Precio Marginal Local (PML) promedio.

2. Net Billing: Consiste en la facturación total de energía, en donde la generación y el consumo son medidos de forma independiente. Es por ello, que al final de cada bimestre se paga la energía consumida y los excedentes generados se cobran en su totalidad, por medio del Precio Marginal Local (PML) horario.

3. Venta Total: Consiste en la venta completa de la energía que se genera (no existe consumo por parte del usuario). Su cobro también es por medio del Precio Marginal Local (PML) horario.

La Ley de Transición Energética, establece a los operadores un precio competitivo de pago por la energía generada por medio de cualquiera de estas modalidades. Sin embargo, el desarrollo sólo ha sido posible a través del Net Metering, el cuál ha mostrado un crecimiento constante desde su conformación, aunque limitado de acuerdo con su potencial esperado.

Hasta hace unos meses la empresa subsidiaria Suministro Básico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tenía interpuesto un amparo, promovido contra las Disposiciones Administrativas de Carácter General emitidas por la CRE (6) en donde se consideraba que los costos de transmisión, reflejaban una pérdida de ingresos potenciales establecidos para las modalidades de Net Billing y Venta Total.

A pesar del estancamiento en el desarrollo de proyectos bajo estos dos esquemas, la Generación Distribuida ha sabido encontrar los medios pertinentes para favorecer el ideal de inclusión y participación de los usuarios finales. Como agentes activos no sólo en el consumo, sino como entidades generadoras de energía (prosumidores), permitiendo reafirmar y en un corto plazo establecer, los ideales mismos de la Reforma Energética, en la generación de acciones que los favorezcan, permitan el fortalecimiento del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e incentiven el desarrollo de proyectos con energías limpias (8).

• Más energía y menos emisiones

Conforme al Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015, México emite cerca de 683 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2e}), que lo ubican en el 12º puesto a nivel mundial, representando el 1.6% de las emisiones globales.

El sector de mayor aportación en el país es el Energético, con 481 MtCO_{2e}, correspondiente al 70% del total. En este rubro, la Generación Eléctrica representa el 34% de la emisiones de GEI, en donde sólo el sector Transporte con el 36%, se encuentra por encima en este ámbito (9).

No hay que olvidar que México, se encuentra bajo compromisos internacionales definidos en el Acuerdo de París en 2016. Con lo cuál, se han establecido metas para la reducción del 30% de sus emisiones a 2020 y un incremento del 35% a 2024, en la generación eléctrica por medio de energías limpias.

Dichos compromisos deberán ser cumplidos considerando atender una problemática de crecimiento de la demanda anual de electricidad, la cual, de acuerdo con la firma PwC en su estudio "Transformación del sector eléctrico mexicano: Implicaciones de la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de la CFE" se estima sea superior al 3.5%, lo que requerirá la incorporación de aprox. 38,000 MW de capacidad instalada adicional en los próximos 10 años (10).

Considerando que el mayor porcentaje de consumidores de energía eléctrica en México, se ubican a nivel residencial con el 88.6%. La relación entre los requerimientos de electricidad para

este sector y la proporción en el precio por consumo del servicio, presenta en este tipo de usuarios, un particular potencial para la incorporación de sistemas fotovoltaicos como alternativa de generación.

En palabras del Dr. Eduardo A. Rincón Mejía, Premio Nacional de Energía Renovable 2004 y editor de libro "Sustainable Energy Technologies": "Las tecnologías contaminantes deben ir en fuerte declive, y su déficit - más el crecimiento esperado de la demanda - deberá ser cubierto por tecnología solar, [...] de una manera sustentable (económica, social y ambientalmente)" El trabajo que los diferentes agentes del sector energético tendrán en sus manos, será fundamental para brindar la oportunidad de consolidar una transición efectiva, que permita dar un paso notable para aprovechar en gran medida, el enorme potencial que la energía solar y en general las energías renovables nos entregan.

• El potencial de la tarifa DAC

En México, el precio de las tarifas eléctricas ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo, sin embargo, han resultado ser más una medida política, que de trascendencia económica. La presencia de subsidios en mayor proporción en algunas de ellas, corresponde a una acción por parte del Estado para atender a la necesidad de compensar el costo real del servicio eléctrico.

Sin embargo, la capacidad económica con la cual se dispone, provoca que el manejo de dichos recursos en beneficio de la modernización del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), sea limitada.

La creación de la tarifa DAC (Doméstica de Alto Consumo) en 2002, tuvo como intención realizar acciones en este aspecto, a través de la derogación del subsidio en usuarios con elevados niveles de demanda de electricidad.

De esta forma la tarifa DAC, fue establecida dentro de la estructura tarifaria de la CFE la cual, al igual que el resto de sus similares del sector residencial, se maneja bajo factores específicos para su cobro como temperatura promedio y límite de consumo de energía por región.

En una entrevista para el diario El Economista, Alberto Valdés Palacios, doctor en ingeniería energética por la UNAM y Presidente del Comité Nacional de Normalización de Energía Solar NESO-13 (2012 - 2014), menciona que (11):

"El mercado fotovoltaico residencial representa un potencial de 500 a 1,000 MW, lo que equivale a un mercado de hasta 2,500 mdd con energía garantizada para más de 30 años".

De acuerdo con datos del mismo artículo, la CFE tiene registrados alrededor de 500,000 usuarios en tarifa DAC, en los cuales, el Dr. Valdés Palacios define como puntos potenciales para la implementación de programas para el financiamiento en la incorporación de sistemas fotovoltaicos a nivel residencial. Lo cual representarían, un considerable impulso para el sector energético en diversos ámbitos, como la generación de empleo, beneficios económicos y disminución de emisiones al medio ambiente.

• Reflexiones finales

En palabras del Guillermo García Alcocer, Comisionado Presidente de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), en su colaboración para el diario El Universal (12): "Desde 2012 se ha casi cuadruplicado el número de instalaciones solares de manera anual. Si la tendencia se mantiene, veremos que, en 2023, habrá 600 mil techos solares, es decir, la Generación Distribuida habrá crecido en mil por ciento".

Es por ello, que el establecimiento de acciones y garantías a largo plazo, que fomenten los diferentes esquemas de Generación Distribuida, permitirá afrontar las problemáticas futuras asociadas, no sólo con el incremento en los niveles de consumo, sino además, en la capacidad de abastecimiento energía eléctrica a nivel residencial y la inminente variabilidad con la cual, se rigen los precios de los energéticos.

La notable capacidad técnica y el compromiso profesional en el fomento hacia la generación de energía más limpia y eficiente, es parte de la realidad que ha marcado el presente de este país. La clave del éxito futuro, radicará en la continuidad y la forma en la que se de el seguimiento adecuado, a los logros alcanzados en esta materia, siendo la Generación Distribuida un buen ejemplo de ello.

No hay que olvidar que en México, hay más recursos que sólo petróleo, los cuales también favorecen al desarrollo económico y social del país. Ha llegado el momento de cambiar nuestra perspectiva, de dejar de mirar mar adentro, que el futuro de la energía se encuentra sobre nosotros, levantemos la mirada y que el Sol guíe nuestro camino.

Bibliografía

(1) Estrada Gasca C., Islas Amperio J., (2010). Energías alternas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México. Academia Mexicana de Ciencias. Ed. 1ª. México. p. 22-25.

(2) Renewable Energy Policy Network for the 21th Century, REN21., (2018). Renewable 2018 Global Status Report. [PDF] Recuperado a partir de: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>

(3) Bloomberg NEF. Climatescope., (2018). Emerging Markets Outlook 2018. [PDF] Recuperado a partir de: <http://global-climatescope.org/assets/data/reports/-climatescope-2018-report-en.pdf>

(4) Secretaría de Energía. SENER., (2018). Balance Nacional de Energía 2017. México. [PDF] Recuperado a partir de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf

(5) Publicado como Disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida. SENER. México. Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de marzo de 2017.

(6) Redacción (6 de julio de 2018). CFE desiste de amparo que limitaba generación de electricidad en hogares. Diario El Financiero, Consultado en línea: <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/cfe-desiste-de-amparo-contra-la-generacion-distribuida-de-cre>

(7) Revista Energía a Debate, (2018). Estancada, la Generación Distribuida en México: ANES. [PDF] Recuperado a partir de: <https://www.energiaadebate.com/blog/3278/>

(8) Secretaría de Energía, SENER. Ley de Transición Energética, (LTE). México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 24 de diciembre de 2015.

(9) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC., (2015) Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero., [PDF]. Recuperado a partir de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

(10) Price Waterhouse Coopers, S.C., PwC. (2014). Transformación del sector eléctrico mexicano: Implicaciones de la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de la CFE. México. [PDF] Recuperado a partir de <https://www.pwc.com/mx/es/industrias/archivo/2014-08-transformacion-sector-electrico-mexicano.pdf>

(11) Redacción (27 de agosto de 2017). Reforma debe impulsar energía renovable: ANES. Diario El Economista, Consultado en línea: <https://www.economista.com.mx/energia/Reforma-debe-impulsar-energia-renovable-ANES-20170827-0005.html>.

(12) Guillermo García Alcocer (17 de septiembre de 2018). El sol sale para todos. Diario El Universal, Consultado en línea: <http://www.eluniversal.com.mx/cartera/el-sol-sale-para-todos>



Las energías renovables en Argentina y su participación en la matriz eléctrica

C.G. Bolzi, J.C. Durán, J.A. Moragues(1), J. Plá(2)

Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes- Comisión Nacional de Energía Atómica Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Argentina.

(1) Consultor en Energía y Ambiente

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

CONTEXTO HISTÓRICO

La crisis energética de la década de **1970** llevó a la Argentina, al igual que a otros países del mundo, a impulsar programas de energías renovables y uso racional y eficiente de la energía (UREE). Un hito importante en esta dirección fue la creación en el año **1978** del “Programa Nacional de Investigaciones en Energía no Convencional”, dentro de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT) de la Nación. Su principal tarea era coordinar las actividades de los incipientes grupos dedicados a las energías renovables, en ese momento mayoritariamente en energía solar.

Unos años antes, en **1974**, se creó la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES) que en 1997 se convirtió en la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, manteniendo las siglas originales. La ASADES ha funcionado ininterrumpidamente desde su creación hasta el presente. Entre otras actividades, realiza anualmente una Reunión de Trabajo en la que convoca a investigadores, científicos y profesionales de organismos públicos y privados, involucrados con el aprovechamiento de recursos renovables, el uso racional y eficiente de la energía, el diseño ambientalmente consciente y el cuidado

del ambiente. En el año 2018 se realizó la XLI Reunión de Trabajo, que en esta oportunidad estuvo acompañada por el 2do. Encuentro Nacional sobre Generación Eléctrica Distribuida con Energías Renovables y una exposición de organismos y empresas del sector.

También en **1974**, la Comisión Nacional de Energía Atómica conformó un grupo de trabajo con el objeto de realizar actividades de investigación y desarrollo sobre fuentes renovables de energía, en particular la solar. Los primeros trabajos se llevaron a cabo en el área de la conversión fototérmica y a partir de mediados de la década de 1980 en conversión fotovoltaica. Con base en la experiencia previa sobre aplicaciones terrestres de la energía solar, en marzo de 2001 la Comisión Nacional de Actividades Espaciales CONAE y la CNEA suscribieron un convenio de cooperación con el objeto de desarrollar la tecnología y proveer los paneles solares para las misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional Argentino. La misión SAC-D/Aquarius fue un emprendimiento conjunto entre la CONAE y la agencia espacial de los Estados Unidos (NASA), en el cual la CNEA fue responsable de la provisión de los paneles solares. El satélite fue puesto en órbita el 10 de junio de 2011, y representó el primer satélite alimentado con paneles solares integrados en la Argentina. El grupo de trabajo creado en 1974 dio origen al actual Departamento Energía Solar, el cual es un referente a nivel nacional en energía solar fotovoltaica.

En **1981** la Secretaría de Energía de la Nación creó la Dirección Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de Energía, que aportaba recursos a la promoción de actividades relacionadas con las energías renovables y el UREE. En el marco de esta Dirección Nacional se generó el "Programa de Uso Racional de la Energía" que incluía temas específicos tales como conservación de energía, sustitución de combustibles, nuevas fuentes de energía y régimen de financiamiento.

En la misma época, se crearon Centros Regionales por convenios con las provincias y universidades locales donde había grupos de investigación y desarrollo con experiencia en temas afines. Uno de ellos, el Centro Regional de Energía Solar (CRES) en la provincia de Salta, devino años después en el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), un referente en temas de aprovechamiento de la energía solar térmica para todo el país. El INENCO es un instituto conjunto entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Salta.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Hasta el año 2009 los sistemas fotovoltaicos instalados en la Argentina estaban mayormente ubicados en áreas rurales dispersas y alejadas de las redes eléctricas de distribución, en instalaciones tales como electrificación rural, repetidoras de comunicaciones, bombeo de agua, monitoreo remoto y electrificación de alambrados. A partir del año 2010, como consecuencia de políticas nacionales y provinciales de promoción que favorecieron fundamentalmente la instalación de centrales de potencia basadas en fuentes renovables, la capacidad fotovoltaica instalada en el país ha crecido significativamente, habiendo pasado de una potencia total inferior a 10 MW en el año 2009 a una potencia total de aproximadamente 150 MW a fin de 2018.

Los primeros pasos hacia el cambio de escala de las potencias fotovoltaicas instaladas están asociados con el Proyecto Solar San Juan, una propuesta muy ambiciosa que lleva adelante el Estado de la Provincia homónima, a través de la empresa provincial de energía EPSE.

Este proyecto tiene como objetivo intervenir en toda la cadena de valor de la tecnología fotovoltaica basada en el silicio cristalino, desde la fabricación de lingotes hasta el montaje de centrales (integración vertical). Su primer hito ha sido la planta experimental fotovoltaica de 1,2 MW (Figura 1), que entró en operación en 2011 e incluye distintas tecnologías basadas en el silicio, constituyéndose en la primera central de potencia superior a 1 MW de América Latina.

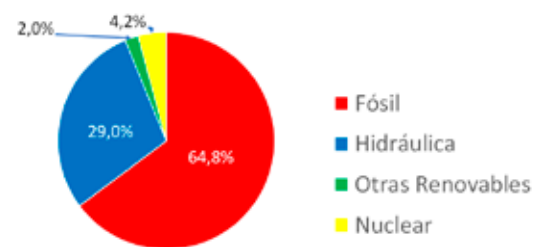


Figura 1: Generación por tipo de tecnología en la matriz eléctrica argentina 2017

En cuanto a la producción de módulos fotovoltaicos en el país, el primer hito de relevancia es la planta de ensamblado de módulos de baja potencia (hasta 100 W) a partir de celdas solares de silicio cristalino importadas, en operación desde 1986 en la provincia de La Rioja. En 2014 se puso en funcionamiento en San Luis la primera fábrica de ensamblado de módulos de potencias típicas para sistemas de conexión a red (240 W), existiendo iniciativas similares en otras provincias. Por su parte, la provincia de San Juan tiene en marcha un proyecto de instalación de una planta integrada, que incluye las etapas de fabricación de lingotes de silicio cristalino, celdas solares y módulos fotovoltaicos, con una capacidad de producción anual de 70 MW. Las actividades de investigación y desarrollo en el tema son relativamente escasas y están centradas en unos pocos organismos del sistema científico-tecnológico nacional.

PROGRAMA DE ABASTECIMIENTO DE LA POBLACIÓN RURAL DISPERSA

En el año **1994** la Subsecretaría de Energía Eléctrica dependiente de la Secretaría de Energía y Minería de la Nación puso en marcha el Programa de Abastecimiento Eléctrico de la Población Rural Dispersa de Argentina (PAEPRA). La intención de este programa fue que el sector rural disperso fuera considerado como mercado eléctrico diferenciado, limitado a los sectores residencial o de servicios, cubriendo la población rural sin acceso al servicio eléctrico interconectado.

En este marco, se presentó al Banco Mundial el Proyecto Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER), el cual fue aprobado y comenzó a ejecutarse en octubre de 1999. El proyecto, de alto contenido social, tuvo como objetivo mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales dispersas, fundamentalmente mediante fuentes renovables. En el año 2015 el Banco Mundial otorgó un nuevo subsidio para una segunda etapa, el PERMER II, que se encuentra actualmente en ejecución. El PERMER es uno de los programas con mayor continuidad en el campo de las renovables en el país.

Cabe destacar que la gran mayoría de los sistemas de generación eléctrica instalados en el marco del PERMER utilizan energía solar fotovoltaica, con la única excepción de un conjunto de instalaciones con energía eólica en la provincia de Chubut. Hasta 2017 se habían instalado sistemas fotovoltaicos en 25.071 viviendas (aproximadamente 3,5 % de las viviendas sin servicio eléctrico), 1.894 escuelas, 361 servicios públicos y 21 mini-redes. Han participado en este proyecto 18 de las 24 provincias argenti-

nas: Buenos Aires, Catamarca, Corrientes, Córdoba, Chaco, Entre Ríos, Jujuy, La Pampa, La Rioja, Mendoza, Misiones, Neuquén, Salta, San Juan, Santa Cruz, Santiago del Estero, Río Negro y Tucumán.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE FUENTES RENOVABLES

En **1998** se sancionó la ley 25.019, Régimen Nacional de la Energía Eólica y Solar, que declaró de interés nacional la generación de energía eléctrica con estas fuentes en todo el territorio nacional. Unos años más tarde, en 2006, fue sancionada la ley 26.190, Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica, que consideraba como fuentes renovables las energías eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, hidráulica con potencias de hasta 30 MW, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás. Ambas leyes tenían por objetivo promover la instalación de centrales de potencia conectadas al sistema interconectado nacional.

En el año **2009** la Secretaría de Energía dio comienzo al programa GENREN (Generación de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables), en cuyo marco se realizó una Licitación Pública Internacional para la instalación de centrales de potencia con energías renovables. De un total de 895 MW adjudicados se concretaron 131 MW en instalaciones eólicas, 7 MW en instalaciones fotovoltaicas, y 1 MW en centrales hidráulicas. El escaso éxito del programa se debió fundamentalmente a problemas de financiación de los proyectos.

Por su parte, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCYT) presentó en el año 2011 el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva - Argentina Innovadora 2020. El mismo definió 36 “Núcleos Socio-Productivos Estratégicos (NSPE)” destinados al fomento de innovaciones tecnológicas en seis sectores socioeconómicos. Uno de los sectores corresponde a Energía y dentro del mismo se localizan los NSPE “Aprovechamiento de Energía Solar” y “Generación Distribuida de Electricidad”, entre otros.

Desde **2010** a la fecha la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, dependiente del MINCYT, ha realizado cinco convocatorias, una de ellas en el tema Energía Solar, a presentación de proyectos a ser financiados mediante los denominados Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial (FITS). En 2016 el MINCYT definió Proyectos Estratégicos para dar respuesta a las necesidades de la población y generar trabajo de calidad mediante la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación productiva.

En el año **2015** se sancionó la Ley 27.191, que modificó la ley 26.190, y fijó una serie de metas para la participación de las energías renovables (esta ley llevó la potencia máxima de las centrales hidráulicas a 50 MW) en la matriz eléctrica del país, partiendo de un 8 % a fin de 2017 hasta alcanzar un 20 % en el año 2025. Asimismo, definió beneficios fiscales para la instalación de las centrales e incentivos para el desarrollo de la industria nacional, y creó el Fondo Fiduciario de Energías Renovables (FODER) para financiar los incentivos.

En el año **2017** se sancionó la ley 27.424, Ley "Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública", la cual fue reglamentada en noviembre de 2018.

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA MATRIZ ELÉCTRICA ARGENTINA

Como puede verse en la Figura 2, la matriz eléctrica argentina depende fuertemente de los combustibles fósiles (64,8 %), seguidos por la energía hidroeléctrica (29,0 %) y en menor medida la energía nuclear (4,2 %). Las "otras renovables" representaron en 2017 sólo el 2 % de la matriz, muy lejos de la meta del 8 % fijada en la Ley 27191. Este 2 % estuvo dado por energía hidráulica con una potencia máxima de 50 MW (1,24 %), energía eólica (0,45 %), biomasa y biogás (0,22 %), y fotovoltaico en una proporción prácticamente despreciable (0,01 %).

En el año **2016**, el entonces recientemente creado Ministerio de Energía y Minería, donde por primera vez se introdujo una Subsecretaría de Energías Renovables, realizó una convocatoria abierta internacional para la provisión de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en el mercado eléctrico mayorista (MEM). Los resultados de las rondas licitatorias denominadas RenovAr, Rondas 1 y 1.5 (en 2016), Ronda 2 (en 2017) y Res 202 se sintetizan en la Figura 3. La potencia total adjudicada fue de 4966 MW, correspondiendo en su gran mayoría a centrales eólicas (2911 MW) y fotovoltaicas (1742 MW), a un precio promedio cercano a 55 USD/MWh mediante contratos de compraventa de energía ("Power Purchase Agreement", PPA).

RONDA 1/1.5/2/ RES 202 157 PROYECTOS ADJUDICADOS: 4,966 MW & 16,9/AÑO*

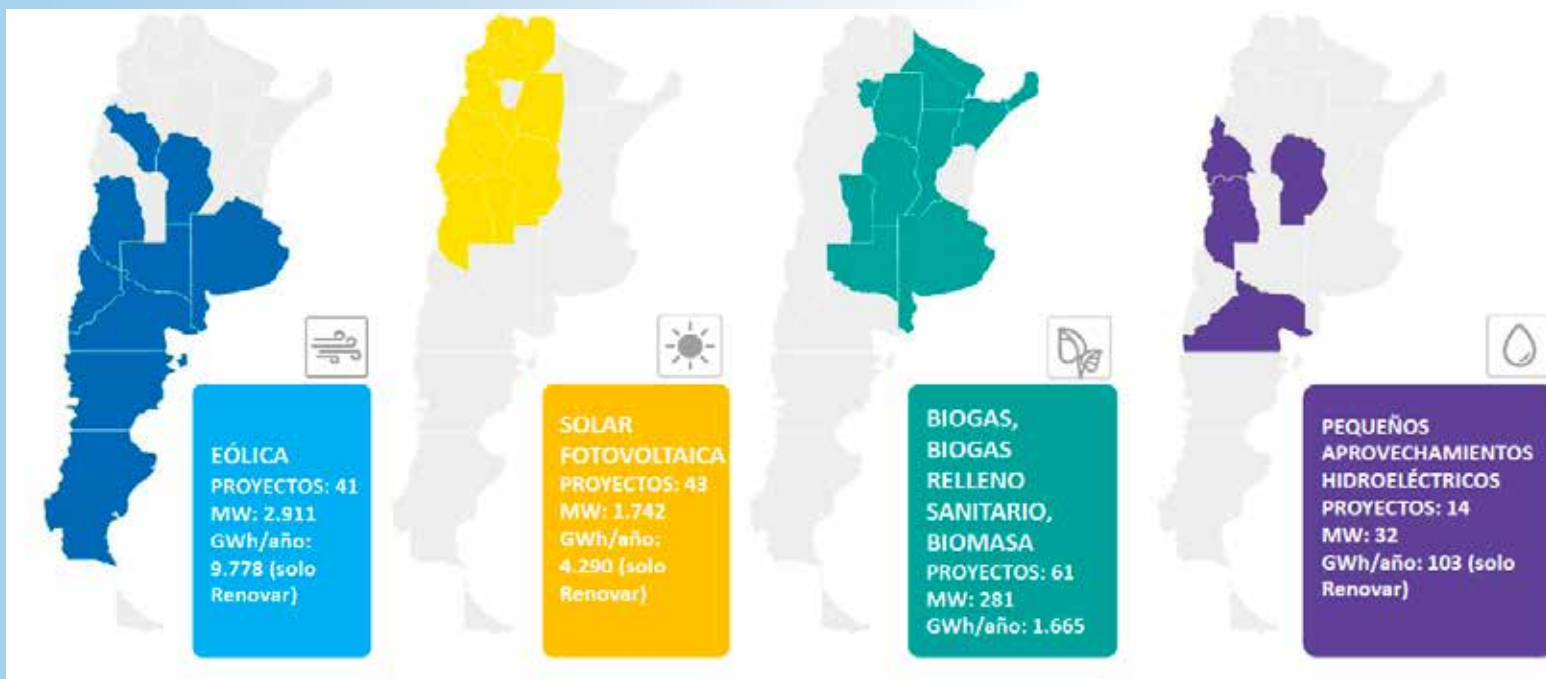


Figura 2: Distribución geográfica, potencia y tecnología de los proyectos adjudicados en el programa RenovAR



Figura 3: Central Fotovoltaica de Ullum, Provincia de San Juan

Considerando además los contratos de compraventa de energía entre empresas privadas, la cantidad total de proyectos de energías renovables adjudicados en poco más de 2 años es de 197, con una potencia total cercana a 6000 MW.

A fin de 2018 se encontraban en operación centrales del programa RenovAr por una potencia total de aproximadamente 660 MW, esperándose superar los 3600 MW durante 2019 y alcanzándose prácticamente la totalidad de la potencia licitada (4966 MW) a fines de 2020.

¹<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/265000-269999/265962/norma.htm>

Las proyecciones que realiza CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico) al año 2025 prevén la incorporación de 2500 MW térmicos (combustibles fósiles, esencialmente gas), 650 MW nucleares, 1580 MW hidroeléctricos, y 10000 MW renovables, con los cuales se alcanzaría la meta del 20 % con renovables bajando a su vez la contribución de las centrales térmicas por debajo del 50 %.

GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DISTRIBUIDA

La Argentina tiene la mayor parte de su consumo eléctrico concentrado en los centros urbanos (el Área Metropolitana Buenos Aires, por ejemplo, consumió en 2017 el 38% de la demanda eléctrica del país), junto con una gran extensión territorial. Dadas estas características, la utilización masiva de generación eléctrica distribuida basada en energías renovables (principalmente, fotovoltaica), ubicada en áreas urbanas y periurbanas, contribuiría al uso eficiente de la energía por reducción de las pérdidas por transporte y a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero por reducción del quemado de combustibles fósiles en centrales térmicas. A tal fin, resulta fundamental implementar políticas de promoción de este tipo de instalaciones.

La formulación de un marco regulatorio técnico, comercial, económico, fiscal y administrativo eficiente es clave para optimizar el proceso de adopción tecnológica. Errores en cualquiera de esos aspectos retrasarían innecesariamente el proceso o lo harían insostenible, como sucedió en España (subsidios excesivos en la tarifa), Canadá (procesos de habilitación de instalaciones demasiado complejos), o los Estados Unidos (protecciones redundantes que encarecen innecesariamente el costo).

A principios de la corriente década no existían en el país regulaciones técnicas ni políticas de promoción que permitieran e impulsaran la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a las redes de baja o media tensión en áreas urbanas. Por tal motivo y a fin de promover la introducción de esta tecnología en la Argentina, el Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Escuela de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) propusieron la realización del proyecto "Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos" (en adelante, proyecto IRESUD). Este proyecto estuvo parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación y fue ejecutado entre los años 2012 y 2016 a través de un consorcio público-privado conformado por la CNEA, la UNSAM y cinco empresas privadas.

En el marco del proyecto IRESUD se instalaron más de 50 sistemas fotovoltaicos con potencias entre 1,5 kW y 5 kW conectados a la red de baja tensión en diferentes partes del país (Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 16 provincias y Base Marambio, en la Antártida Argentina), con el objeto difundir el uso de este tipo de sistemas en áreas urbanas, capacitar recursos humanos y promover el desarrollo del marco regulatorio correspondiente a nivel nacional y provincial. Las Figuras 4 y 5 muestran dos instalaciones del proyecto IRESUD.

Figura 4: Pérgola fotovoltaica en el Edificio TANDAR del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA.



Figura 5: Sistema fotovoltaico instalado en la Base Marambio, Antártida Argentina.

El Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública (Ley 27.424 y Reglamentaciones) está destinado a los clientes de las empresas distribuidoras. Se trata esencialmente de un régimen para autoconsumo y eventual inyección de excedentes de energía eléctrica generada mediante fuentes renovables. Define un modelo tarifario de facturación neta en el cual la tarifa de inyección (en \$/kWh) a la red pública es igual al precio mayorista que paga la Distribuidora al Mercado Eléctrico Mayorista. La tarifa por la energía consumida de la red (precio minorista) es significativamente mayor que el precio mayorista para los pequeños consumidores, en particular los residenciales.

La ley 27.424 crea un fondo fiduciario, FODIS, para el financiamiento de beneficios promocionales. Estos beneficios estarán diferenciados según el costo de la energía generada, la tecnología, la potencia instalada y condiciones regionales, e incluyen bonificación sobre costo de capital y créditos fiscales, entre otros. Si bien la ley contempla la posibilidad de otorgar un precio adicional de incentivo a la inyección de energía a la red ("Feed-in Tariff", FIT), no se prevé su implementación. La ley también crea el Régimen de Fomento para la Fabricación Nacional de Sistemas, Equipos e Insumos (FANSIGED).

CONCLUSIONES

Desde la publicación del Cuarto Informe del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático, varios trabajos muestran que resulta imprescindible mantener el sistema climático dentro de límites tolerables, realizando para ello el mayor esfuerzo de reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en las próximas décadas, de modo tal que la transición a un sistema energético libre de combustibles fósiles se alcance, en lo esencial, antes de la mitad del corriente siglo.

La generación eléctrica en base a fuentes renovables, centralizada o distribuida, interconectada a la red eléctrica pública es, sin dudas, una alternativa con gran potencial para contribuir en el mediano y largo plazo con la transición mencionada en el párrafo precedente. Varios países Latinoamericanos han logrado ya importantes avances en el camino hacia una matriz eléctrica con una participación creciente de las energías renovables, con casos extremos como Costa Rica y Uruguay, en los cuales la participación de las renovables en la generación de electricidad es de prácticamente el 100 %.

Las actividades de investigación y desarrollo en la Argentina en el campo de las energías renovables comenzaron muy precozmente, a mediados de la década de 1970. A lo largo de más de 40 años se han ejecutado numerosos proyectos relacionados con el aprovechamiento de las fuentes renovables y el uso racional de la energía. Entre ellos cabe destacar el Proyecto Energías Renovables en Mercados Rurales, de alto contenido social por su contribución para mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales dispersas.

Sin embargo, hasta el año 2017 los avances en la transición energética, medidos como contribución de las renovables a la matriz, han sido escasos. Las numerosas ventajas de las energías renovables, entre las que cabe destacar el aumento de la seguridad energética, la disminución de costos de generación, el ahorro de divisas, el desarrollo de industria nacional, la generación de empleo y la mitigación del cambio climático, demuestran claramente la necesidad de definir políticas de Estado que impulsen el desarrollo y la utilización en la Argentina de este tipo de fuentes.

Referencias

J.A. Moragues, Evolución de las Políticas Nacionales en Energías Renovables en la Argentina en los últimos 40 años. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 40, pp. 59 - 63, 2017, ISSN 0328-932X.
Proyecto Solar San Juan - <http://epsesanjuan.com.ar/web/proyecto/proyecto-solar-san-juan/5>
Solartec - <http://www.solartec.com.ar>

En los últimos años, el país parece estar sentando las bases para iniciar la transición hacia una matriz energética más limpia, diversificada, económica y segura, a través de diversas políticas nacionales y provinciales de promoción de las energías renovables. Para el caso específico de la matriz eléctrica, ha habido dos hitos importantes a nivel nacional, la sanción de las leyes:

- **27.191, que modificó la ley 26.190, Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica.**
- **27.424, Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, reglamentada recientemente.**

La primera de ellas fue el punto de partida para el programa RenovAr y los contratos de compraventa de energía entre privados (MATER), que dieron lugar a la adjudicación de proyectos de centrales de potencia mediante energías renovables (esencialmente, eólica y solar fotovoltaica) por una potencia total cercana a 6000 MW. La concreción, aún parcial, de estos proyectos implicará un cambio sustantivo en la participación de las renovables en la matriz eléctrica nacional.

Por su parte, el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida aún no se encuentra operativo y es, además, previsible que se encontrará con mayores dificultades para impulsar un crecimiento rápido y significativo de instalaciones de generación distribuida con fuentes renovables, principalmente solar fotovoltaica. Las barreras más significativas para lograr este crecimiento serán posiblemente la falta de financiación a tasa razonable y los subsidios a las tarifas de la energía eléctrica convencional, principalmente de origen fósil, junto a un modelo tarifario para las renovables que no incluirá el pago de una tarifa diferencial ("Feed-in Tariff").

Las condiciones están dadas para dar un salto de calidad hacia una matriz energética más sustentable, que excede el tema energético por sus implicancias en el cuidado del medio ambiente y en el desarrollo económico y social del país. El uso racional y eficiente de la energía, las energías renovables, la generación distribuida y el manejo inteligente de las redes eléctricas deben ser parte de la estrategia energética de corto, mediano y largo plazo del país.

CAMMESA. Mercado Eléctrico Mayorista, Informe Anual 2017. [http://www.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/\\$first?open](http://www.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/$first?open)
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/265000-269999/265962/norma.htm>
Programa RenovAr – Adjudicaciones (2018); consultado el 3/12/2018.
<https://www.argentina.gob.ar/renovar>
Proyecto IRESUD <http://www.iresud.com.ar>

Análisis y diagnóstico de la generación fotovoltaica distribuida conectada a red en el campus de la Universidad Nacional de Villa María

Resumen

Para introducir en el país tecnología asociadas con la interconexión a la red eléctrica distribuida en áreas urbanas, mediante fuentes de energías renovables particularmente fotovoltaica, se debe contemplar aspectos técnicos de diseño e instalación.

El trabajo realiza un diagnóstico, presentando experiencia del caso, en el marco de un proyecto de investigación que estudia la generación distribuida mediante fuentes de energías renovables, relacionada a la planta piloto fotovoltaica on grid en el edificio administrativo del campus de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM). Los aspectos abordados son desde lo técnico y legales de equipamiento del sistema en su conjunto (inversor, paneles FV, tablero), recopilación de datos respecto a la energía generada comparando con otros programas que estiman la misma, superficie que ocupa tal potencia y su integración arquitectónica. Además, se estudia y cuantifica el 5% de pérdida de generación por orientación e inclinación del sistema instalado. Se determinó la importancia que tienen estas tecnologías en la generación de energía y los desafíos que presenta ya sea desde lo legal hasta lo técnico en pos de garantizar la seguridad y calidad eléctrica.

Autor: Medina, Juan Cruz; Quintilla, Tomas

Fecha: 16/11/2018

Introducción

La matriz energética actual de la República Argentina tiene una gran dependencia de recursos fósiles los cuales en su mayoría son importados. Compuesto principalmente en la generación de energía eléctrica por casi un 60% a partir de procesos térmicos en base a combustibles fósiles con eficiencias promedios de las centrales de alrededor del 40 % (BEN, 2016). En los últimos años se puede observar una incipiente penetración de fuentes no convencionales como los son las energías renovables, casi en su totalidad concentrada en parques solares, hidráulicos (menores a 50 MW) y eólico.

Actualmente, el clima de época de las energías renovables ha comenzado a desarrollarse diversos proyectos de gran envergadura mediante diferentes leyes y programas del gobierno nacional de Argentina, como son los RenovAR 1, 1.5, 2, entre otros. Estas políticas tuvieron un impacto en los grandes consumidores y en las redes del mercado eléctrico mayorista, donde uno de los objetivos es que de alguna manera permita el ingreso de tecnologías en la generación por fuentes renovables sustituyendo a las fuentes contaminantes como lo son la generación de energía mediante fuentes térmicas o centrales poco eficientes.



Figura 1: Ubicación de la planta FV.
Imagen extraída Google Earth

Por otro lado, nuevas leyes y programas han permitido actuar, a otra escala, en la problemática de seguridad eléctrica y la estabilización de la red, mediante proyectos de menor envergadura, como lo son la nueva la ley de Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública (decreto 1075/2017) o programa como el MiniRen. Esta nueva forma estructural, de generación de energía eléctrica por fuentes renovables, a nivel nacional, pero de alguna manera ya desarrollada en algunas provincias con propios incentivos, permite generar nuevos actores en la distribución y generación de la energía. Este cambio estructural permite al usuario repensar su rol en el uso de la energía.

En este sentido, el siguiente trabajo se desarrolla en el marco de una demostración de generación distribuida mediante fuente fotovoltaica (FV) como experiencia en la Universidad Nacional de Villa María (UNVM), donde nos permite de algún modo ejemplificar el impacto positivo de la penetración de energías renovables, en particular la fotovoltaica. A continuación, se desarrolla la presentación del equipamiento, características, normativas, generación a la fecha y luego un análisis de las pérdidas por orientación e inclinación.

Desarrollo

Ubicación de la planta piloto de generación distribuida FV en la UNVM.

Se dimensionó, diseño e instaló una pérgola en el edificio administrativo del campus de la Universidad Nacional de Villa María, particularmente el ingreso al Instituto Académico Pedagógico de Ciencias Sociales. La misma cuenta con paneles solares fotovoltaicos que suman una potencia total instalada de 966 Wp con posibilidad de extenderla a 1.5 kWp, La puesta en marcha del mismo fue realizada el 13 de junio del 2017. Este sistema lo componen 21 paneles solares de silicio policristalino y Tedlar, marca Solartec de potencia pico 45 W cada uno, con una inclinación de 40° respecto a la horizontal y orientación 33° al Oeste del Norte Geográfico. El inversor utilizado es de 1.5 kW, marca SMA Sunny Boy 1.5.

La pérgola, con una superficie cubierta de 7.12 m² de paneles FV, influye de algún modo, en la disminución de la carga térmica del edificio, consiguiendo un beneficio adicional a la producción de electricidad.

A continuación, se presenta cada componente con sus características técnicas detalladas en lo que hay instalado actualmente en el campus de la UNVM.

Panels fotovoltaicos

Ficha técnica de Panel FV:

Solartec. Modelo: KS46T. N° serie: 10671.
 Fabricación: 10/2013. Industria Argentina

P Max	46.0 Wp	1000W/mw AM 1.5 -25 C
I PMax	2.60 A	
V pmax Isc	17.80 V	
Isc	2.82 A	
Voc	21.7 V	
Dimensión (LxAxE)	918 x 343 x 36 mm	

Otras consideraciones: máximo voltaje del sistema conectado en serie, no debe superar los 600 V, no inflamable clase C y certificado bajo normas IRAM.

Potencia total instalada 966 Wp (21 paneles * 46 Wp), si cada panel mide aprox. 0.336m² * 21 paneles = 7.1 m² + 0.02 m² (factor de error) = 7.12 m² superficie total cubierta. En la práctica se toma como referencia que 1 kWp ocupa aproximadamente de 6 a 7 m², pero como estos paneles ya son obsoletos, por lo que son pequeños y de menor rendimiento, por ende el factor de ocupación es mayor.

Inversor

Inversor de aplicación en plantas pequeñas, marca Sunny Boy modelo 1.5. Tiene una amplia zona de tensión de entrada que va de los 80 V a los 600 V, se puede utilizar en diversas situaciones lo que le concede una elevada flexibilidad a la hora de elegir los módulos. Es de fácil instalación por el reducido peso y compacto tamaño. El equipo una vez puesto en marcha, para su configuración y monitorización local, cuenta con software libre "Sunny Explorer" y una interfaz web a la cual se puede acceder mediante la señal Wifi que emite el dispositivo o mediante cable ethernet.

Ficha técnica del Inversor CC/AC

SSMA Sunny Boy Model 1.5

Vdc max	600 V	DC
Vdc Mpp	160 – 500 V	
Idc max	10 A	
Isc PV	18 A	
Número de entradas de MPP independientes/strings por entrada de MPP	1/1	
Vac	220/230/240 V	AC
PAC	1500 W	
Smax	1500 Va	
Fac r	50/60 hz	
Iac msx	7 A	
C os φ	0.8...1...0.8	
Peso	9.2 Kg	
Certificados y autorizaciones (otros a petición)	AS4777.3, C10/11/2012, CEIO-21Int, EN50438, G83/2, IEC61727, IEC62116, IEC62109, NBR16149, NEN-EN50438, NRS097-2-1, VDE-AR-N4105, VDE 0126-1-1, VFR2014	
Rendimiento	máx./europeo 97, 2%/96,1%	

Otras consideraciones, ante la variedad de inversores que existen en el mercado es importante que al momento de realizar la compra el instalador se asegure que el equipo de marca y modelo ofertado o seleccionado, cumpla con las normas de interconexión con la red pública y la certificación este comprobada por un organismo de competencia en el área.

En Argentina, existe una norma nacional IRAM 210013, establece las condiciones y requisitos mínimos de los inversores que se usan en instalaciones para la

conexión a la red de distribución de baja tensión. Esta se basa en normas técnicas internacionales vigentes, algunos de sus aspectos más importantes es la seguridad eléctrica que incluye: los grados de protección de los elementos constituyentes de un inversor y las máximas sobretensiones permitidas que el equipo pueda producir. Otro aspecto es la detección de funcionamiento en isla: que determina los ensayos que se le deben realizar a un inversor FV para garantizar que el mismo no quede funcionando frente a un corte del

servicio eléctrico. En el Grid code: se establecen los valores máximos y mínimos tanto de frecuencia como de tensión de la red permitidos para la operación del inversor. En lo que respecta a la calidad de energía inyectada: establece los límites máximos de las corrientes armónicas inyectadas a la red y los niveles de flicker admitidos.

Códigos de las normas generales

Características

Protección de Red	VDE 0126 ; G83/1; C10/11; EN 50438; RD 1663, 661; AS 4777.2/.3, DK 5940, ðNORM E 8001-4-715, IEC 61727; VDE AR-N 4105; IEEE 1547.
Compatibilidad Electromagnética	IEC/EN 61000-6-2-3

Otros accesorios

Tablero de protección:

Fusible	Jabalina
Varistores	Cableado
Medidor de energía	Cañería
Disyuntor	Estructura



Figura 2: Instalación de estructura.



Figura 3: paneles instalados

En términos general, la instalación es de fácil ejecución, siempre y cuando la realice un instalador profesional donde le permita tener consideraciones técnicas a la hora de la puesta en marcha. El tablero cuenta con protecciones tanto para la persona como para el equipamiento, con un medidor de energía adicional.

La estructura es galvanizada, con puesta a tierra al igual que los marcos de los paneles. A la hora de la instalación se tuvo que adaptar a la estructura existente, cediendo en pérdidas por orientación e inclinación, con el objetivo de que quede arquitectónicamente integrado al edificio existente. A continuación, se hace un breve análisis de las pérdidas por orientación e inclinación.



Figura 4: Protecciones, medidor e inversor.

Pérdidas por orientación e inclinación

La orientación e inclinación es un análisis de diseño en ingeniería de detalle que se debe realizar en las obras de energía solar fotovoltaica para la generación de energía eléctrica, ya que, si el objetivo es vender o auto consumir la energía para evitar consumir de la red, se debe buscar el óptimo generado. En la práctica, sucede que pueden existir limitantes respecto al óptimo de la instalación haciendo que uno debe ceder a la disminución de energía ya sea por orientación, inclinación y/o sombras, por ejemplo, en la instalación piloto de la UNVM la inclinación óptima de los paneles FV sería el ángulo que nos dice la Lat -31° y la orientación respecto al norte geográfico, "Debido a cuestiones arquitectónicas la orientación de la instalación no es la óptima (norte), siendo esta noroeste. Esto hace que la curva de generación se encuentre aplanada en las horas de la mañana." (Pierantonelli, Medina, Quintilla, 2018, p. 7) Para evaluar la declinación se utilizó un software disponible online "National Centers For Environmental Information", este sirve para determinar la declinación del norte solar respecto al norte magnético. El modelo utilizado es el magnético mundial o el modelo del campo de referencia geomagnético internacional (IGRF). Los resultados de la declinación son típicamente precisos a 30 minutos de arco, pero los factores ambientales pueden causar perturbaciones en el campo magnético.

Declinación Magnética Villa María Campus, edificio

Date	Día: 2018-11-11
Latitude	$32^\circ 22' 55.54''$ S
Longitude	$63^\circ 15' 36.80''$ W
Elevation	0 Km GPS
Declination	6.02° W changing by
	0.18° W per year
Uncertainty	$\pm 0.38^\circ$

Tabla: extraída de National Centers For Environmental Information

Según el software la declinación del norte magnético al norte geográfico es de 6.02° oeste (factor de error $\pm 0.38^\circ$) y aumenta 0.18° anualmente. La planta piloto de la UNVM esta desviada del norte geográfico 26° específicamente.

A continuación, se puede demostrar en la figura 5, software desarrollado por el Observatorio de Energía y Sustentabilidad de la Universidad Tecnológica Facultad Regional Rosario, demostrando que la pérdida por orientación e inclinación es del $\pm 5\%$ aproximadamente, cabe resaltar que la escala es de a 5%.

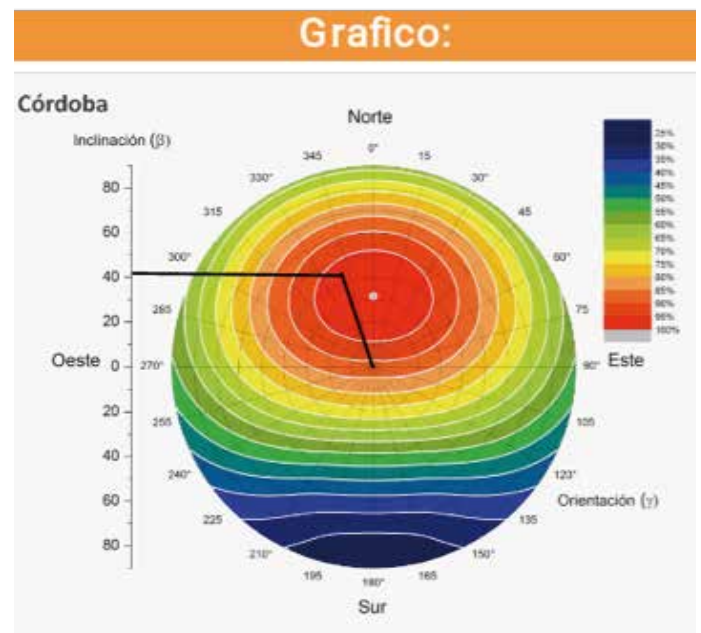


Figura 5: Software Dimensionamiento para equipamiento térmico, pérdidas Inclinación y Orientación.

Generación de energía eléctrica

Es fundamental, previo al diseño de la planta FV, conocer la radiación del sitio para estimar mediante programas la generación de energía posible. En Argentina, acceder a datos de radiación, se puede mediante diversos softwares internacionales, pero actualmente la Universidad Nacional de Lujan particularmente el Grupo de Estudio de Radiación está desarrollando mapas propios, mejorando la exactitud de los mismos. En el trabajo se utilizó el Atlas Solar Global, realizado por Solargis Banco Mundial, modelo basado en satélite, donde éste tiene la finalidad de apoyar el desarrollo de la energía solar en las fases de exploración, prospección, selección de sitios y evaluación de pre-factibilidad.

Site name	Villa María, Córdoba, Argentina
Latitude	-32.407500°
Longitude	-63.240200°
Azimuth	26°
Inclination	40°
PVOUT	1.455 kWh per year 3,98kWh per day

El programa estima que la energía generada del sistema FV, con la inclinación y orientación actual, es de 1.455 kWh por año, en nuestros resultados fueron: “La energía entregada por el equipo a la red eléctrica de la universidad desde el 13 de junio del año 2017 durante un año fue de: 1175,87 kWh.” (Pierantonelli, Medina, Quintilla, 2018, p. 7). Valores no tan lejanos de la estimada, considerando que el equipo estuvo apagado 36 días en los mayores meses de radiación (enero, febrero), no por problemas del sistema on grid FV, si no por mantenimiento del edificio, produciendo cortes del suministro de energía eléctrica, y por seguridad normalizada el inversor debe apagarse automáticamente, como anteriormente fue explicado.

Finalmente cabe resaltar que la calidad de los datos de recursos solares es crítica para la evaluación económica y técnica de las plantas de energía solar. Comprender la incertidumbre y gestionar el riesgo relacionado con el clima es esencial para una planificación y operación exitosas de los activos de generación de energía solar.

Resultados

En esta experiencia donde se inyecta energía a la red interna de la UNVM, acredita más de 550 días de funcionamiento sin ningún problema técnico hacia la red.

El equipamiento presenta múltiples pérdidas debido a tres factores principales, el primero por orientación que es del 5%, la tecnología antigua de los paneles FV con bajos rendimientos, y el rendimiento del inversor que es el 96%.

“Cabe destacar que en realidad la mejor medición en condiciones óptimas de irradiación (1000 W/m² perpendicular a los paneles) fue de 820 Wp lo que representa un rendimiento de $\eta = 820 \text{ W} / 966 \text{ W} = 0.848$ (85%) respecto a la potencia pico declarada por el fabricante. De manera que estos paneles entregan un 15% menos de la potencia especificada, por lo cual se puede considerar como potencia nominal de la instalación 820W.” (Pierantonelli, et al., 2018, p. 6)

En términos de generación es de vital importancia hacer un pre-dimensionamiento con la energía que se puede llegar a generar, con programas u cálculos simples como por ejemplo el utilizado en el estudio donde la predicción se acerca a los valores reales, tomándola como opción posible, pero no la única, sobre todo destacando que el programa es de libre acceso, donde cualquier usuario puede acceder a generar sus propios datos, de acuerdo a su latitud y longitud, orientación e inclinación.

En conclusión, la generación distribuida particularmente fotovoltaica presenta grandes desafíos, y resulta de gran beneficio en pos de la seguridad eléctrica. Esta puede ayudar en la fiabilidad y continuidad del sistema, ya que su implementación conlleva muchos lugares de generación y no solamente una gran generación centralizada. Además, debido a la larga extensión del país la distribución de las fuentes de generación aporta mayor estabilidad ante las variables climáticas (sol y viento disponibles).

Los sistemas de Generación Distribuida son modulares y proporcionan flexibilidad al sistema eléctrico de distribución. Esto implica una instalación sencilla y en un corto período de tiempo. Además, proporciona una gran ventaja en el funcionamiento y en el mantenimiento del sistema, así como, en la flexibilidad de su capacidad total, aumentando o disminuyendo el número de módulos.

Como consideraciones finales se puede afirmar que la generación distribuida mediante fuentes renovables en residencias, comercios, universidades y pymes, desarrolla un escenario favorable donde permitirá una diversificación del mercado laboral, una democratización del uso de la energía, nuevas tecnologías y seguridad eléctrica a la red. Para lograr un impacto significativo es necesario crear un escenario económicamente favorable para los usuarios, donde los costos y las formas de financiamiento de los equipos sean accesibles, logrando incentivar al uso de energías renovables. Esto debe ser acompañado por normativas acordes, que a partir de la simpleza logren cubrir todas las variables que puedan afectar a la generación distribuida para evitar los monopolios económicos y favorecer la igualdad social.

(1) Licenciatura en Ambiente y Energías Renovables (LAER) - Instituto Académico Pedagógico de Ciencias Básicas y Aplicadas- Universidad Nacional de Villa María (UNVM)

(2) DIN V VDE V 0126-1-1 (VDE V 0126-1-1): 2006-02 Dispositivo de desconexión automática entre un generador y la red pública de baja tensión.

(3) Disponible en:
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>

Referencia bibliográfica

Manual técnico SMA 1.5 // 2.5 Sunny Boy. En línea: <file:///C:/Users/juanc/Desktop/SB%201.5-2.5-DES1548-V12.pdf>
Pierantonelli, Mario; Medina, Juan Cruz; Quintilla, Tomás (2018) "generación distribuida fotovoltaica asociada a vehículos eléctricos". Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6, pp. 06.177-06.188, 2018. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-1-2

Paginas consultadas

Solartec. <http://solartec.com.ar/productos.html> Última Visita: 11/11/2018.

SMA Solar Technology. www.SMA-Iberica.com Última Visita 11/11/2018.

National Centers For Environmental Informatio. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination> Última Visita 11/11/2018

Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info> Última Visita 11/11/2018.

Softwares utilizados

Ret Screen

Sunny Explorer

PLEDU - Planilla calculo ST ACS-C

Perturbación de la superficie del agua para mejorar la eficacia de destiladores solares

RESUMEN

Se agita la superficie del agua en el contenedor de salmuera de un destilador solar sencillo de superficie inclinada, con el fin de aumentar el área de superficie evaporante específica. Por lo tanto, la producción total de agua destilada se incrementa. Se observa que la destilación solar, que es la combinación de la evaporación del agua superficial y su condensación dentro de la cubierta superior, es sensible al aumento de la evaporación. La perturbación de la superficie del agua se logra mediante la inyección de burbujas de aire dentro del contenedor de agua, lo que produce una vibración de la superficie que genera pequeños movimientos ondulantes, lo que aumenta el área total de la superficie a evaporar y crece el coeficiente de transferencia de masa. El trabajo experimental se llevó a cabo en la región semi desértica, hambrienta de agua y altamente aislada de La Paz, BCS, México. La mejora así obtenida parece ser más relevante en los destiladores solares de gran sección, donde la promoción de una destilación más eficiente da como resultado una reducción de la temperatura del agua del recipiente y, por lo tanto, menos pérdidas térmicas. Si el aparato está muy bien aislado, las pérdidas térmicas son siempre pequeñas y la mejora en la destilación se reflejará solamente en una pequeña mejora general del rendimiento.

J. L. Fernández-Zayas, N. Chargoy-del-Valle
Instituto de Ingeniería,

Universidad Nacional Autónoma de México,
Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria,
Coyoacán 04510 CDMX Mexico

La necesidad apremiante de agua natural de alta calidad, apta para el consumo humano y para preservar los ecosistemas, ha incrementado los precios del agua y, en consecuencia, ha llevado a la búsqueda de mejorar la destilación solar [1, 2, 3]. La investigación sobre el comportamiento básico de los destiladores solares se ha vuelto más frecuente en la última década [4, 5, 6]. Las combinaciones eficientes de sistemas fotovoltaicos con purificadores de agua por ósmosis inversa avanzados pueden producir cantidades importantes de agua de alta calidad a partir del agua de mar, aunque las crecientes preocupaciones con la sostenibilidad ambiental han complicado la tecnología básica [7]. La búsqueda de una destilación de agua de mar cada vez más eficiente y económica se analiza en varias revisiones de las técnicas de mejora del proceso de desalación solar [8, 9].

Probablemente el desafío tecnológico más relevante es cómo lograr una eficiencia de conversión de energía muy alta del rendimiento solar en el destilado, dada la densidad relativamente baja de energía solar que llega a la superficie de la Tierra. Si solo se requiriese una cantidad moderada de agua potable para cada individuo, esta podría suministrarse mediante destiladores solares

térmicos simples de tipo de pendiente única en áreas geográficas altamente aisladas, como la región sur de Baja California Sur, en México [10].

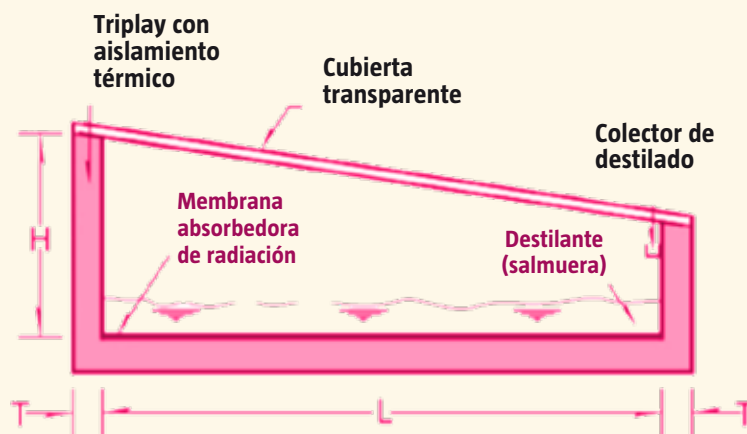
Se pueden distinguir dos grupos básicos de técnicas de mejora de la destilación en destiladores solares de una sola pendiente: la mejora pasiva del rendimiento del destilado mediante el perfeccionamiento del uso de geometría fija, de materiales y de la práctica, por un lado, y el empleo de recuperación de calor y otras técnicas industriales activas, tales como el suministro de calor adicional al sistema. Sin embargo, los autores del presente trabajo creen que los destiladores solares simples y no sofisticados serán los más adecuados para suministrar agua potable en grandes regiones del planeta, debido principalmente a su sencillez y simplicidad [11].

En las aplicaciones que resultan más prácticas en las sociedades en desarrollo, donde las técnicas pasivas son obligatorias debido a la escasez local de mano de obra calificada, el desafío se enfrenta preferiblemente mediante la modernización del destilador tradicional, aunque se realizan importantes contribuciones en ambos grupos de técnicas. La mejora pasiva del destilador incluye la mejora del absorbente de calor solar [12, 13], la selección de una geometría fija apropiada [14, 15, 16], optimizando la profundidad de la salmuera [17], minimizando la masa de la cubierta transparente [18, 19], estimulando la condensación de la cubierta [20, 21], introduciendo estimulantes de condensación y evaporación en el sistema [22-31], y aumentando la superficie de evaporación [32, 33]. El uso de estrategias tecnológicas más avanzadas, que requieren habilidades técnicas sofisticadas a nivel local, no se considera adecuado para las aplicaciones indicadas en el presente trabajo. Estos incluyen procesos avanzados y térmicos [34, 35], circulación interna de aire forzado [13, 36], condensación superficial mejorada [4], seguimiento solar [37], reflexión solar [38], la mejora vibratoria de la evaporación [39], estructuras solares de efecto múltiple o escalonados [40-44], colectores de placa plana agregados [45], nano materiales [46-51], tubos evacuados [52] y capas fotovoltaicas sobre cubiertas [53], entre otros. El modelado numérico de los destiladores solares es muy útil para evaluar diferentes enfoques para mejorar la destilación [17]. Para este fin, las ecuaciones de control deben ser lo suficientemente generales, precisas y confiables [54].

Las ecuaciones apropiadas que describen el destilador solar simple de manera confiable deben ser reevaluadas, ya que se informa de un desacuerdo sobre su fiabilidad y precisión [14, 55]. Además, hay informes de mejoras en las técnicas de modelado [5, 56-59], y de reveladores análisis exergéticos [60, 28].

Las comparaciones y evaluaciones en el presente trabajo se realizan con referencia a la eficiencia energética global, que se calcula como la relación de la energía efectivamente empleada para producir agua destilada entre la energía solar recibida sobre la superficie externa del aparato durante el día. Este método incluye la medición de la pequeña cantidad de agua que se destila durante la noche. Por lo tanto, si toda la energía solar recibida se convierte en agua destilada y pérdidas térmicas, un aparato solar que minimice las pérdidas térmicas tendrá una eficiencia muy alta. En el caso límite, donde las pérdidas térmicas son muy pequeñas, las técnicas de mejora de la destilación son en gran medida irrelevantes. Sin embargo, si el destilador es propenso a las pérdidas térmicas, como ocurre en las cámaras fijas o en los invernaderos, que tienen una cavidad muy grande, las técnicas de mejora pueden mejorar notablemente su eficiencia de destilación. Los destiladores solares simples y baratos, capaces de suministrar agua potable valiosa en lugares remotos, son a menudo ineficientes por diseño, y por lo tanto pueden beneficiarse de muchas de las técnicas de mejora revisadas, lo que no es cierto para destiladores solares compactos poco profundos (MacCracken [11]).

MATERIALES Y MÉTODOS



Los principios fundamentales de diseño del destilador solar poco profundo, analizados en este trabajo, se representan en la imagen que se muestra en la Fig. 1. El área de insolación efectiva fue $1 \times 1 = 1 \text{ m}^2$, y la inclinación de la cubierta fue de alrededor de 4° , por lo tanto, el lado más alto $H=0.24 \text{ m}$, y el lado opuesto, 0.20 m . La cantidad de agua a ser destilada típica era de 10 l al comienzo de los experimentos, con una producción típica de destilado de $4\text{-}5 \text{ l}$ diariamente.

Se empleó una pequeña bomba de aire de 2.5 W alimentada con energía fotovoltaica para inyectar burbujas de aire en el agua para perturbar la quietud de la superficie de agua a evaporar. El aire inyectado se tomó del espacio aéreo sobre la superficie, como se ilustra en el dibujo de abajo (Fig. 2). No se introdujo ningún desequilibrio térmico por el burbujeo.

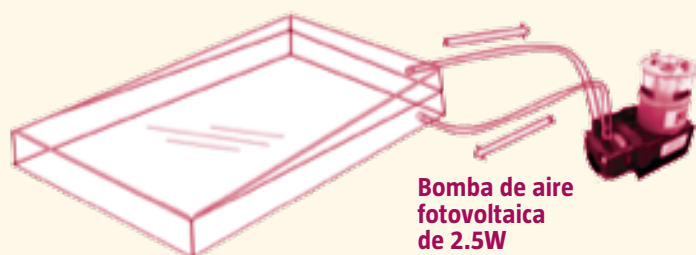


Figura 2: Diagrama esquemático que ilustra la operación de la bomba inyectora de burbujas.

El trabajo experimental al aire libre se realizó como se ilustra en la Fig. 3, donde la mayoría del equipo de medición y la electrónica de procesamiento están en el lado izquierdo de la imagen, y el destilador solar probado está a la derecha. Un piranómetro Kahlsico está al lado del aparato solar. La constante de calibración es de $18 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$ con una incertidumbre $<1.2\%$ y la incertidumbre medida de inclinación $\pm 1^\circ$, $285\text{-}3000 \times 10\text{-}9 \text{ m}$ de rango espectral.



Fig 3. Configuración al aire libre típica para monitorear el funcionamiento de la cámara solar superficial (cámara mirando hacia el norte).

Todas las mediciones se realizaron mediante termopares de cobre constantán de calibre 30 y convertidores digitales analógicos, de modo que la incertidumbre estaba dentro de $\pm 1^\circ\text{C}$. Los procesadores de datos controlados por computadora adquirieron lecturas de temperatura y radiación cada segundo y los promedios de 900 s se almacenaron para un análisis posterior. Durante ese periodo, el rendimiento del destilado se capturó en tubos de ensayo calibrados y se registró manualmente al final de cada periodo. La velocidad del viento se midió con un anemómetro de copa de registro continuo de diseño propio, calibrado a una incertidumbre de $\pm 3\%$.

Las muestras de los resultados experimentales (sin mejorar) se muestran en las Figs 4a y 4b. Las mediciones se realizaron el 26 de junio, un día particularmente soleado, que produjo una insolación diaria de $5.7 \text{ kWh}/\text{m}^2$, o $20,520 \text{ kJ}/\text{m}^2$. Dado que el rendimiento total del destilado fue de $6.137 \text{ l}/\text{m}^2$, la eficiencia de conversión de energía, definida como el cociente de la energía empleada efectivamente en la destilación del agua, entre la energía solar recibida sobre el plano inclinado del exterior del destilador solar, en el mismo lapso, fue de 0.676 a $h_{fg} = 2,260 \text{ kJ}/\text{kg}$.

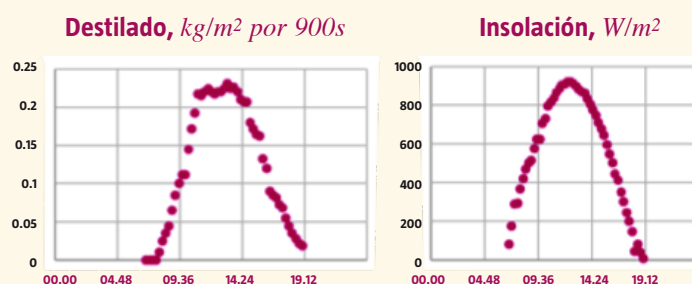


Figura 4: (izq.) Mediciones de destilado producido cada 900s para la irradiancia global correspondiente de la Fig. 4b (der).

La técnica experimental se explica con la ayuda de un conjunto típico de resultados experimentales, como se muestra en la **Tabla 1**. Esta prueba experimental se repitió varias veces, muchos días, con resultados muy similares. La irradiación solar y la salida del destilado se registran experimentalmente cada 900 s , como se muestra en la Fig. 4. Dado que el caudal másico de destilación es bastante constante, a aproximadamente $0.22 \text{ kg}/15'$, entre las $11:00$ y las $14:00$, ahora se construye la **Tabla 1**. solo con esa información (área sombreada).

Hora solar	qsol	Destilado	Uwe	Tw	Tg	eficiencia η
h:min	W/m ²	l/m ² 900 s	kW/m ² K	°C	°C	
11:00	835	0.217	0.00618	71.6	62.1	0.66
11:15	865	0.215	0.00662	71.8	62.4	0.65
11:30	885	0.22	0.00662	72.5	63.2	0.65
11:45	905	0.225	0.00668	72.6	63.2	0.64
12:00	910	0.22	0.0075	71.9	62.5	0.62
12:15	920	0.217	0.0075	72.1	62.7	0.62
12:30	920	0.22	0.0074	72.2	62.8	0.63
12:45	915	0.22	0.0071	72.2	62.8	0.63
13:00	895	0.225	0.006	73.1	63.9	0.67
13:15	880	0.232	0.0058	73	63.7	0.68
13:30	870	0.225	0.00572	72.8	63.4	0.68
13:45	860	0.227	0.0055	72.4	63	0.69
14:00	830	0.22				

Tabla 1: Valores selectos para el periodo de la 11:00 a las 14:00 h. Valores medidos para sol y destilado (sombreados). Valores calculados para Tw, Tg, Uwe y eficiencia η .

Bases para un modelo numérico.

El modelo matemático que mejor describe la evolución temporal de un destilador solar se detalla en [54]. La base del modelo es hc , el coeficiente de transferencia de calor para la convección natural entre la superficie del agua de salmuera caliente a temperatura T_w , y el interior de la cubierta transparente, en T_g :

(1)

$$hc = 0.884 \left[Tw - Tg + Tw(Pw - Pg) / (268.9 \times 10^3 - Pw) \right]^{(1/3)}$$

Esta expresión empírica, en $W/m^2 K$, ha sido ampliamente aceptada durante los últimos cincuenta años, aunque parece infravalorar la hc en destiladores solares someros [54]. Sin embargo, es la expresión más apropiada para el propósito declarado. El coeficiente de transferencia de calor de destilación se calcula generalmente por

(2)
$$he = F hc$$

donde $F = 16.273 \times 10^{-3} (Pw - Pg) / (Tw - Tg)$, *adimensional*.

El calor transferido entre el agua y la superficie de la cubierta se incrementa con la radiación térmica, representada por hr , también en $W/m^2 K$, que se calcula como:

(3)
$$hr = \{s(Tw^2 + Tg^2)(Tw + Tg)\} / (ew^{-1} + eg^{-1} - 1)$$

La transferencia total de calor desde el agua y la superficie interior de la cubierta, Uwg , puede ahora escribirse como:

(4)
$$Uwg = hc + he + hr$$

Las ecuaciones (1) y (2) se consideran válidas en el caso base estándar, cuando la superficie del agua no está perturbada, así que en caso de estar perturbada, la eq (4) se escribe como:

(4')
$$Uwg = IF \cdot [hc + he + hr]$$

donde IF es un factor adimensional de intensificación, que involucra los resultados de la combinación de los efectos de intensificación por la extensión de la superficie evaporante y por la vibración de la superficie del agua, que destruye la capa límite de aire saturado de humedad y facilita la evaporación. Los coeficientes hc , he y hr se calculan como indican las expresiones (1), (2) y (3) anteriores (*sin IF*). Ambos efectos provienen de la vibración que resulta de la inyección de burbujas en el agua. Este factor IF toma el valor de la unidad cuando no hay intensificación de la evaporación. Se prefiere escribir la ecuación (4') con la inclusión del fenómeno radiativo, representado por hr , ya que no hay forma confiable de separar la radiación del proceso de intensificación.

La configuración general del modelo de simulación matemática emplea las expresiones anteriores para resolver el balance térmico. Durante el período de temperatura casi constante alrededor del mediodía, se pueden asumir condiciones de estado estable o permanente y se pueden ignorar los efectos dinámicos. La resolución del balance de calor requiere el cálculo de las pérdidas térmicas desde el recipiente de agua hacia el entorno, caracterizado por el coeficiente de transferencia de calor global Uwe , que se puede estimar como:

(5)
$$Uwe = 1 / (1/Uext + 1/Uk)$$

Los coeficientes de transferencia de calor U_{ext} y U_k se emplean para describir el flujo térmico desde la superficie exterior del destilador hacia el medio ambiente, y la conducción térmica desde el agua hacia la superficie exterior del destilador, por lo tanto

$$(6) \quad U_{ext} = hr3 + hc3$$

donde $hr3 = \epsilon\sigma((Text)^2+(Ts^2))(Text+Ts)$

$$Ts = 0.0552 Te^{1.5}$$

$$hc3 = 2.8+3.0 Vwind$$

Adicionalmente, la conductancia térmica conductiva U_k se calcula por:

$$(7) \quad Uk = 1/(dwood/kwood)$$

Finalmente, el flujo de calor desde la cubierta del destilador somero a los alrededores, se calcula como la suma del calor radiado hacia el cielo y el calor perdido por convección al ambiente:

$$(8) \quad Uge = hr2 + hc2$$

donde $hr2 = \epsilon\sigma((Tg)^2+(Ts^2))(Tg+Ts)$

$$hc2 = 2.8+3.0 Vwind$$

El balance térmico del destilador solar ahora se puede resolver con estas expresiones. Dado que la presión absoluta P y otras propiedades del fluido y del material variarán con la temperatura, el sistema de ecuaciones no es lineal y la solución del balance de calor se debe realizar mediante aproximaciones numéricas.

Cálculo de las principales variables

Los valores calculados para T_w y T_g ahora se incluyen en la **Tabla 1**. A partir del rendimiento del destilado medido en períodos de **900 s** cada uno, y con la insolación medida, la eficiencia de conversión térmica global η se puede calcular directamente (última columna, **Tabla 1**). La eficiencia media para el período de tres horas es, por lo tanto, de aproximadamente **0.65**. También se incluyen la temperatura de cubierta de vidrio calculada T_g y la temperatura del agua destilada, y como la temperatura del aire ambiente T_e fue estable a **31 °C** durante el período, el coeficiente de pérdida térmica global U_{we} se puede calcular en cada intervalo, como se muestra. Las pequeñas variaciones en este coeficiente, alrededor del valor medio de **0.00655 kW/m² K**, pueden explicarse en términos de pequeñas variaciones de la velocidad del viento.

Las mediciones realizadas alrededor del mediodía solar, cuando la insolación y la temperatura ambiente varían poco, se pueden interpretar con la ayuda de un balance térmico básico. Dado que en ese periodo de tres horas, variables como los coeficientes de transferencia de calor U_{wg} , U_{ge} y U_{we} se mantienen básicamente constantes, y muchos días como el reportado se encuentran en la región más al sur de BCS, México, muchos registros se realizaron con resultados similares. Estos están correlacionados por las ecuaciones básicas de balance térmico, de tal manera que permiten una comprensión especial de los valores esperados de los coeficientes locales de transferencia de calor. Se observa que los valores para la absorbancia solar α y la transmitancia τ también son bastante constantes [64], como se muestra en la Fig. 5. En esta figura solo se grafica el factor efectivo ($\tau\alpha$), que incluye una consideración ampliamente aceptada sobre la (pequeña) influencia de la radiación solar difusa [54].

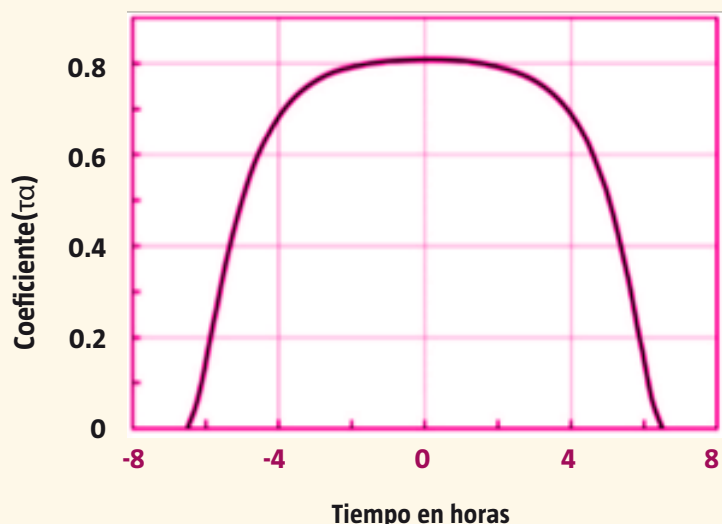


Figura 5: coeficiente($\tau\alpha$) para el 29 de junio, Horas (eje x) a partir del medio día [54].

Un procedimiento para evaluar qué tan confiable es el modelo, en comparación con los datos medidos, se ejemplifica con el cálculo del agua destilada producida. Con las variables calculadas, se calcula el destilado esperado para cada período de **900s**. Cuando todos los productos calculados en intervalos de **3 horas** se suman, el rendimiento resultante es de **2.914 l/m²**, que se compara bien con el total medido de **2.883 l/m²**, una diferencia de aproximadamente el **1%**.

Burbujeo de aire dentro del recipiente de agua del destilador

Los procesos de evaporación pueden acelerarse si la superficie de evaporación se extiende, como se propone [32]. Una forma de extender la superficie de evaporación sin alterar la capacidad de condensación de un destilador solar, es mediante la inyección de un pequeño chorro de aire en la zona de destilación. La potencia de bombeo es producida por una pequeña bomba eléctrica de **2.5W** que es alimentada por una celda fotovoltaica. Este aparato solo funciona cuando se alcanza un cierto umbral de irradiancia, por lo que se adapta bien a la aplicación prevista. El aire se aspira desde la cavidad de aire dentro del destilador, por lo que no se introducen

cambios de temperatura en el depósito de salmuera. Cada burbuja de aire aumentará sustancialmente la superficie de contacto agua-aire. El área de destilación también se extiende debido al movimiento de la superficie ondulada que producen las burbujas. En la Fig 6 se ilustra una evaluación general de los resultados experimentales básicos con esta técnica de mejora.



Figura 6: Producción de destilado, ml/m² en intervalos de 900s, para una prueba típica en marzo. La curva superior describe los resultados del destilador intensificado.

La medición de las variables de operación y de estado se realizó durante el mes de marzo de la manera informada, y se encontró consistentemente que el dispositivo mejorado produjo aproximadamente un **12%** más de destilado que el destilador estándar (**IF = 1.12**). El experimento se repitió varias veces y los resultados indicados representan el efecto mejorado de manera apropiada. Debe destacarse que la inyección de burbujas solo se exploró con una sola entrada y puntos de admisión de aire, y que no hay razón para creer que se haya encontrado algún tipo de arreglo de mejora óptimo.

La medición de las variables de operación y de estado se realizó durante el mes de marzo de la manera informada, y se encontró consistentemente que el dispositivo mejorado produjo aproximadamente un **12%** más de destilado que el destilador estándar (**IF= 1.12**). El experimento se repitió varias veces y los resultados indicados representan el efecto mejorado de manera apropiada. Debe destacarse que la inyección de burbujas solo se exploró con una sola entrada y puntos de admisión de aire, y que no hay razón para creer que se haya encontrado algún tipo de arreglo de mejora óptimo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pérdidas térmicas de la caja del destilador

La mejora de la producción de destilado se explora mediante una perturbación en la superficie de evaporación de la salmuera. La mejora de la evaporación tendría muy poco impacto, y sería de poco interés, si el flujo de calor de la energía solar se transformara principalmente en pérdidas térmicas laterales e inferiores. De ahí el interés en evaluar la importancia relativa de las pérdidas térmicas del sistema y su relación con la técnica de mejora de la evaporación.

Para el modelo solar aún sin mejorar, empleado para construir la **Tabla 1**, el modelo matemático se ejecutó para varias intensidades solares y aislamiento de cajas o cuerpos. Los resultados se resumen en la **Fig 7**. La variable dependiente representada en el eje y sería la producción de destilados, en **l/m² 900 s**. Un amplio rango de coeficientes de transferencia de calor entre la temperatura de la salmuera y el ambiente, **Uwe**, se trazan en el eje x, que corresponden a las características de construcción de la caja que se describen en el pie de la figura. Por lo tanto, la figura se construye para una gama de calidades de construcción de cajas, que van desde muy buen aislamiento térmico hasta ningún aislamiento.

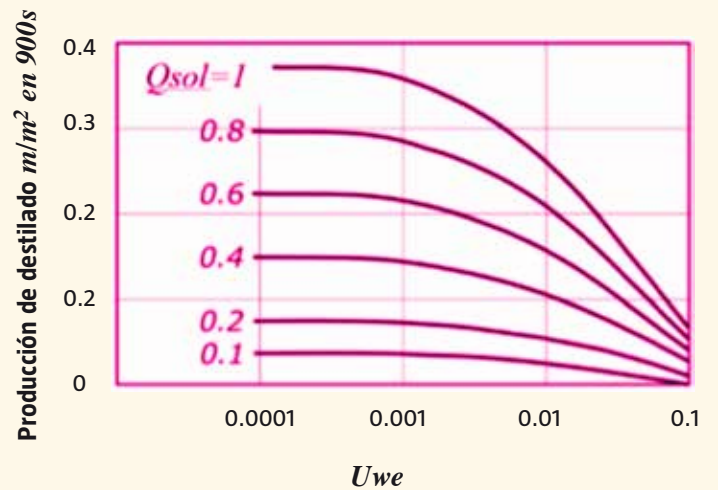


Fig 7. Producción de destilado calculado para una amplia gama de valores de Uwe. El rango 0,0001 - 0,001 pertenece a las paredes inferior y laterales del sistema adecuadamente aisladas, por lo general con recipientes internos y externos de madera contrachapada y aislamiento de lana de roca de ½ a 1 pulgada de espesor o similar. Los valores de 0,001 a 0,01 corresponden a destiladores de madera contrachapada mal aislados. Un valor de Uwe más alto correspondería a destiladores fabricados con láminas delgadas sin aislamiento térmico bajo vientos fuertes.

La **Fig. 7** revela que los casos de destiladores adecuadamente aislados son esenciales para asegurar que la mayor parte del calor solar se transforme en agua destilada, y que no se produzcan pérdidas térmicas apreciables a través de las paredes laterales o la base del aparato. Las pérdidas térmicas incluyen la convección de las paredes exteriores, así como la radiación térmica. Sin embargo, este último componente es bastante pequeño ya que la temperatura de la pared exterior del sistema es cercana a la temperatura ambiente. Un destilador debidamente aislado debería mantener las pérdidas térmicas del fondo al mínimo. Un aparato adecuadamente aislado mostraría muy poca mejora, si la hubiera, con la técnica de mejora de burbujeo, dada la alta eficiencia de conversión: a medida que el calor solar ingresa al destilador solar adecuadamente aislado, aumenta la temperatura de la salmuera. Este calor solar solo puede dejar el destilador por la parte superior, debido al correcto aislamiento térmico de la caja.

Si el procedimiento de destilación fue deficiente, el aumento de la temperatura resultante de la zona de destilación resultaría generalmente en un solamente un pequeño aumento de las pérdidas térmicas. Si las pérdidas térmicas de la caja del aparato se minimizan, la mayoría de las pérdidas térmicas se producirían a través de la parte superior, en forma de convección térmica y radiación.

La precisión de la predicción de destilado se puede probar en condiciones de insolación extremas, como se registró el 29 de junio. Los resultados de los rendimientos de destilados calculados v medidos se representan en la **Fig 8**. El destilado total recolectado durante el día se midió como **6.137 l/m^2** , mientras que el valor calculado similar fue de **6.187 l/m^2** , que es **1.0081** veces más alto. Este tipo de evaluación otorga credibilidad al modelo matemático para inferir más resultados de los experimentos de mejora de inyección de burbujas.

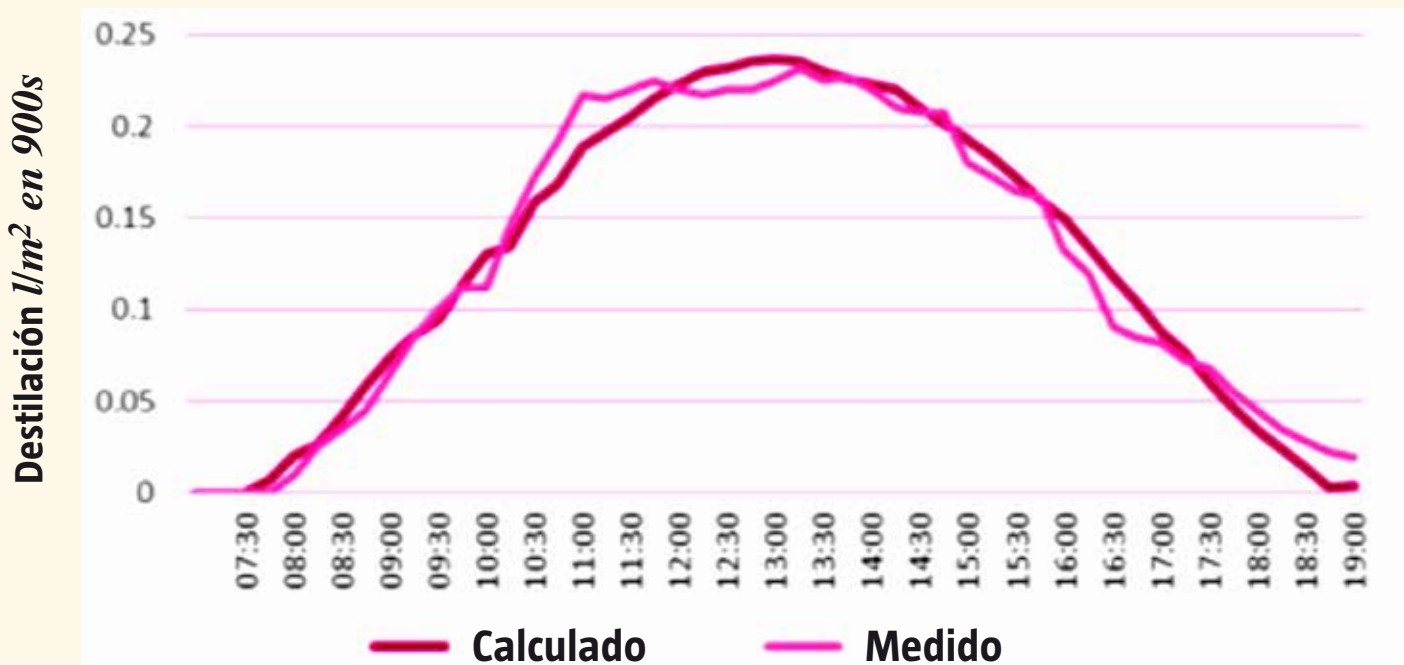


Fig 8. Comparación entre valores medidos y calculados de la destilación, datos del 29 de junio.

Extrapolación de la intensificación de la destilación

De los resultados anteriores, está claro que las pérdidas térmicas del fondo deben mantenerse al mínimo, lo que significa en la práctica que $U_{we} \leq 0,0006 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$, un valor de la conductancia térmica general que requiere un revestimiento de aislamiento adecuado en las cuatro paredes verticales del alambique. y en la parte inferior. Por otro lado, una cantidad considerable de calor se pierde en la convección natural entre el

fondo del aparato con calefacción solar y la cubierta transparente. Por lo tanto, la salmuera puede calentarse de manera muy eficiente, pero el aire húmedo se transporta a la cara interior de la cubierta de manera menos eficiente. Ciertamente, cuando se calculan los tres modos de emisión de calor desde la superficie del agua hacia la parte superior (**convección, evaporación y radiación, Ecs. 2-4**), existe una cierta cantidad de calor transmitida a través de la capa de aire húmedo por convección natural, que no resulta en destilación. Aparentemente, el patrón convectivo exhibe

asimétricas que se pueden registrar como fluctuaciones de temperatura muy finas. Estas inestabilidades asimétricas también se observan en otros experimentos de convección natural, tanto físicos [61] como numéricos [62] en determinadas intensidades de transferencia de calor. Un estudio adicional de estos fenómenos puede producir mejoras importantes en la producción de destilado.

Las ideas anteriores podrían ayudar a explicar la validez general de los modelos de transferencia de calor propuestos por [63]. El modelo matemático ahora se resuelve con ecuaciones de transferencia de calor estándar para calcular los balances de calor en la cubierta de agua y vidrio, y la importancia relativa de la mejora de la destilación se puede explorar utilizando un factor de mejora IF en la ecuación correspondiente para calcular U_{wg} (Eq 4'). Como todos los demás factores externos son constantes, la velocidad de destilación esperada se puede representar para los valores de $IF=1, 2, \dots, 16$ como se muestra en la Fig 9. Se puede observar que los valores más bajos de IF dan como resultado un cambio de valor más alto de la mejora neta, y la mejora de la destilación tiende a un valor invariante. Se observa que las curvas del mismo aislamiento son casi paralelas entre sí. Parece confirmado que, en destiladores solares adecuadamente aislados, las pérdidas térmicas máximas (radiación y convección) son pequeñas en comparación con la transferencia de calor por evaporación.

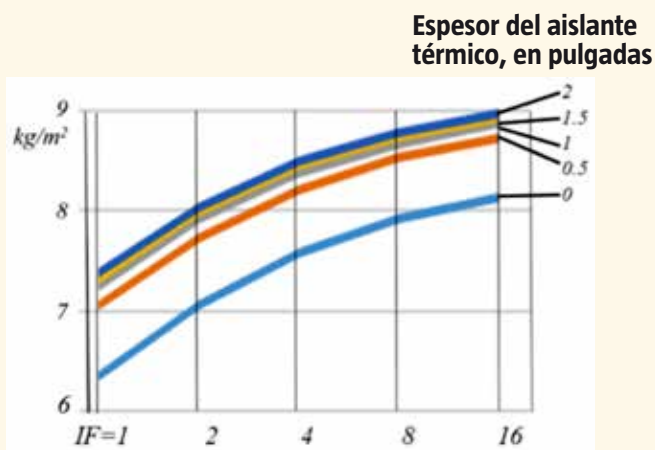


Fig 9: Producción diaria de destilado para factores de intensificación y aislamiento de lana de vidrio

CONCLUSIONES

Se investigó la posibilidad de mejorar el producto, o destilado, de un destilador solar somero de pendiente única, mediante la inyección de burbujas de aire en el seno del agua a destilar. Se confirmó el factor de intensificación esperado de la evaporación en el proceso de destilación, ya que la evaporación puede incrementarse mucho sin que la destilación global logre una respuesta proporcional: la mejora de la evaporación puede inducirse en más de un orden de magnitud, mientras que la mejora de la destilación en general permanece sin gran variación. Las pruebas experimentales simples permiten verificar el importante efecto de la mejora al alterar la tersura de la superficie.

Sin embargo, los resultados obtenidos pueden mejorarse mucho si se realizan pruebas adecuadas en aparatos experimentales más sofisticados. Como complemento de esta investigación, se verificó que el aislamiento térmico adecuado de la caja fija es esencial para lograr altos índices de producción. Los resultados en días de verano muy claros en Baja California Sur, México, avalan las altas tasas de producción anunciadas hace varios años por Horace MacCracken [61].

Ahora está claro que el esfuerzo de aislamiento sustancial que [61] insistió en emplear, junto con un volumen interno mínimo de agua en la energía solar, son necesarios para lograr resultados tan impresionantes ($\eta - 0.65$). En un destilador solar bien aislado, las pérdidas de los recipientes son insignificantes, pero si se emplea un aislamiento pobre o nulo, las pérdidas térmicas pueden reducir al menos **10-15%** de la eficiencia general. Las técnicas de mejora para mejorar la destilación, como estimular la evaporación o aumentar efectivamente el área

de la superficie de la evaporación (como la introducción de burbujas y ondas) pueden tener un aumento significativo en la tasa de producción de la destilación general si el destilador no está adecuadamente aislado. Los destiladores solares de tipo gabinete, como los estudiados para la utilización solar de uso general en invernaderos [32], pueden mostrar una mejora significativa de la producción al aumentar la superficie de evaporación, un efecto no esperado en el destilador somero pasivo bien aislado.

Nomenclatura

Ac, Ap, área de transferencia de entrada de calor, pérdida de calor, m²
dwood, madera, espesor de madera contrachapada, m
dwool, espesor del aislamiento, m (y pulgadas)
hr, hc, he, coeficientes de transferencia de calor unitarios, kWm⁻² K⁻¹
IF, factor de mejora (1, 2... 16)
kwood, conductancia térmica de madera contrachapada, kWm⁻² K⁻¹
kwool, aislamiento de conductividad térmica, kWm⁻² K⁻¹
Pw, Pg, presión parcial de vapor de agua, Nm⁻²
qsol, irradiancia solar global, kWm⁻²
qu, flujo de calor útil, kW
qp, flujo de calor perdido, kW
qi, flujo de calor interno (= qsol), kW
Te, temperatura ambiente exterior, °C
Tw, temperatura de la superficie del agua a destilar, °C
Tg, cubierta interna de vidrio, °C
Uwg, coeficiente de transferencia de calor de la superficie del agua a destilar a la cubierta de vidrio, Wm⁻² K⁻¹
Uwe, coeficiente de transferencia de calor de la superficie del agua a la temperatura exterior
Uge, cubierta de vidrio para coeficiente de transferencia de calor ambiente externo
Vwind, velocidad media del viento, ms⁻¹
 α , absorbanza de radiación térmica
 η , eficiencia global de transferencia de calor
 ϵ_w, ϵ_g , emisión de radiación de calor para el agua, superficie de vidrio
 σ , constante de radiación de Stefan Boltzmann, $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
m, Flujo de masa total de destilado por segundo en 15 minutos, kgm⁻² (900s) ⁻¹
($\tau\alpha$), factor de absorbanza de la transmitancia para limitar la entrada de calor efectiva, no dimensional

Referencias

- [1] H. Liao, E. Sarver, L.A.H. Krometis, Interactive effects of water quality, physical habitat, and watershed anthropogenic activities on stream ecosystem health, *Water Res.* 130 (2018) 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.065>.
- [2] 5th WATER ROUND TABLE, "Waste and wastewater management in African countries", Challenges, Experiences and Solutions, Regarding the Fulfillment of the Right to Water, Monday, 18th March 2013 from 9 to 12 a.m. Embassy of the Arab Republic of Egypt Stauffenbergstr. 6-7, 10785 Berlin.
- [3] H. Panchal, I. Mohan, Engineering advance, various methods applied to solar still for enhancement of distillate output, *Desalination* 415 (2017) 76–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.015>.
- [4] K. Vinoth Kumar, R. Kasturi Bai, Performance study on solar still with enhanced condensation, *Desalination* 230 (2008) 51–61, doi:10.1016/j.desal.2007.11.015.
- [5] M. Edalatpour, K. Aryana, A. Kianifar, G.N. Tiwari, O. Mahian, S. Wongwises, Review, Solar stills: A review of the latest developments in numerical simulations, *Sol. Energy* 135 (2016) 897–922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.005>
- [6] A.E. Kabeel, T. Arunkumar, D.C. Denkenberger, R. Sathyamurthy, Performance enhancement of solar still through efficient heat exchange mechanism – A review, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2017) 815–836. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.044>
- [7] N.M. Mazlan, D. Peshev, A.G. Livingston, Energy consumption for desalination — A comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes, *Desalination* 377 (2016) 138–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.011>
- [8] Thaneissha a/p Marimuthu, Samson Mekbib Atnaw, Priyatharishini a/p Mardarveran, Sim Shu Yi, Mazlin Azura binti Usop, Muhammad Khairi bin Md Gapar, Siti Aishah Binti Rusdan, Roshahliza Binti M Ramli, Shaharin A. Sulaiman, Design and development of solar desalination plant, *MATEC Web of Conferences* 131, 02004 (2017), UTP-UMP SES 2017. DOI:10.1051/mateconf/201713102004
- [9] H.N. Panchal, S. Patel, An extensive review on different design and climatic parameters to increase distillate output of solar still, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 69 (2017) 750–758. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.001>
- [10] A. Bermudez-Contreras, M. Thomson, D.G. Infield, Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico, *Desalination* 220 (2008) 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.046>
- [11] J. Gordes, H. McCracken, Understanding solar stills, *Volunteers in Technical Assistance, VITA Technical Paper, Technologies for Development*, TP# 37:9/85, (1985) 46 pag. ISBN 0-86619 248-4.
- [12] C.Tiris, M.Tiris, I.E.Türe, Improvement of basin type solar still performance: Use of various absorber materials and solar collector integration, *WREC* (1996) 758-761.
- [13] O.O. Badran, Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity, *Desalination* 209 (2007) 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.022>
- [14] E. Rubio, M.A. Porta, J.L. Fernandez, Cavity geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills, *Appl. Therm. Eng.* 20 (2000) 1105-1111.
- [15] A.K. Tiwari, G.N. Tiwari, Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still: The effect of water depths, *Desalination* 207 (2007) 184–204. doi:10.1016/j.desal.2006.07.011.
- [16] M. Arslan, Experimental investigation of still performance for different active solar still designs under closed cycle mode, *Desalination* 307 (2012) 9-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.09.003>.
- [17] R. Dev, G.N. Tiwari, Characteristic equation of a passive solar still, *Desalination* 245 (2009) 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.07.011>
- [18] A. Ahsan, K.M. Shafiul Islam, T. Fukuhara, A.H. Ghazali, Experimental study on evaporation, condensation and production of a new Tubular Solar Still, *Desalination* 260 (2010) 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.044>
- [19] A. Ahsan, M.A. Imteaz, A. Rahman, B. Yusuf, T. Fukuhara, Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still, *Desalination* 292 (2012) 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.013>
- [20] J. Xiong, G. Xie, H. Zheng, Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface, *Energy Convers. Manag.* 73 (2013) 176–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.024>
- [21] Y.A.F. El-Samadony, A.E. Kabeel, Theoretical estimation of the optimum glass cover water film cooling parameters combinations of a stepped solar still, *Energy* 68 (2014) 744-750. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.080>
- [22] K.K. Murugavel, S. Sivakumar, J.R. Ahamed, Kn.K.S.K. Chockalingam, K. Srithar, Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials, *App. Energy* 87 (2010) 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.023>
- [23] A.A.F. Al-Hamadani, S.K. Shukla Performance of Single Slope Solar Still with Solar Protected Condenser, *Distributed Generation &*

- Alternative Energy Journal, 28:2 (2013) 6-28.
<https://doi.org/10.1080/21563306.2013.10677548>
- [24] M.T. Chaichan, H.A. Kazem, Water solar distiller productivity enhancement using concentrating solar water heater and phase change material (PCM), *Case Studies in Thermal Engineering* 5 (2015) 151–159.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.009>
- [25] T. Elango, K. Kalidasa Murugavel, The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination* 359 (2015) 82–91.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.036>
- [26] A.A. El-Sebaili, M.R.I. Ramadan, S. Aboul-Enein, M. El-Naggar, Effect of fin configuration parameters on single basin solar still performance, *Desalination* 365 (2015) 15–24.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.002>
- [27] R. Sathyamurthy, S.A. El-Agouz, V. Dharmaraj, Experimental analysis of a portable solar still with evaporation and condensation chambers, *Desalination* 367 (2015) 180–185.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.012>
- [28] M. Asbik, O. Ansari, A. Bah, N. Zari, A. Mimet, H. El-Ghetany, Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM), *Desalination* 381 (2016) 26–37.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.031>
- [29] R. Samuel Hansen, K. Kalidasa Murugavel, Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach, *Desalination* 422 (2017) 59–67.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.015>
- [30] K. Rabhi, R. Nciri, F. Nasri, C. Ali, H. Ben Bacha, Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser, *Desalination* 416 (2017) 86–93.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.023>
- [31] S. Rashidi, N. Rahbar, M.S. Valipour, J.A. Esfahani, Enhancement of solar still by reticular porous media: Experimental investigation with exergy and economic analysis, *Appl. Therm. Eng.* 130 (2018) 1341–1348.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.089>
- [32] A.E. Silva-Martinez, P. Martinez-Pereda, J.L. Fernandez-Zayas, Dimensionless parameter for assessing a solar still's production, *Desalination* 281 (2011) 105–110.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.051>
- [33] M.A. Al-Nimr, M.-E. Dahdolan, Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser, *Solar Energy* 114 (2015) 8–16.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.021>
- [34] A.S. Nafey, M.A. Mohamad, S.O. El-Helaby, M.A. Sharaf, Theoretical and experimental study of a small unit for solar desalination using flashing process, *Energy Convers. Manag.* 48 (2007) 528–538.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.010>
- [35] K. Srihar, T. Rajaseenivasan, Performance analysis on a solar bubble column humidification dehumidification desalination system, *Process Saf. Environ. Prot.* 105 (2017) 41-50. Saf.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.002>
- [36] Z.M. Omara, A.S. Abdullah, T. Dakrory, Improving the productivity of solar still by using water fan and wind turbine, *Sol. Energy* 147 (2017) 181–188.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.041>
- [37] I.M. Muslih, S.M. Abdallah, W.A. Husain, Cost Comparative Study for New Water Distillation Techniques by Solar Energy Using, *Solar Power Plants and Their Application*, ISSN 0003-701X, *Appl. Sol. Energy*, 46 1 (2010) 8–12.
<https://doi.org/10.3103/S0003701X10010032>
- [38] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, A.S. Abdullah, A review of solar still performance with reflectors, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 68 (2017) 638–649. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.031>
- [39] K.M.S. Eldalil, Improving the performance of solar still using vibratory harmonic effect, *Desalination* 251 (2010) 3–11.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.10.004>
- [40] P. Druetta, P. Aguirre, S. Mussati, Minimizing the total cost of multi effect evaporation systems for seawater desalination, *Desalination* 344 (2014) 431–445.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.04.007>
- [41] A. Senthil Rajan, K. Raja, P. Marimuthu, Multi basin desalination using biomass heat source and analytical validation using RSM, *Energy Convers. Manag.* 87 (2014) 359–366.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.040>
- [42] S.J. Patrick Gnanaraj, S. Ramachandran, D. Santosh Christopher, Enhancing the design to optimize the performance of double basin solar still *Desalination* 411 (2017) 112–123.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.02.011>
- [43] R. Kalbasi, A.A. Alemrajabi, M. Afrand, Thermal modeling and analysis of single and double effect solar stills: An experimental validation, *Appl. Therm. Eng.* 129 (2018) 1455–1465.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.012>
- [44] A.F. Muftah, K. Sopian, M.A. Alghoul, Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts, *Desalination* 435 (2018) 198-209.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>

- [45] M.A. Eltawil, Z.M. Omara, Enhancing the solar still performance using solar photovoltaic, flat plate collector and hot air, *Desalination* 349 (2014) 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.021>.
- [46] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum, *Energy Convers. Manag.* 86 (2014) 268–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.050>
- [47] Nisrin Abdelal, Yazan Taamneh, Enhancement of pyramid solar still productivity using absorber plates made of carbon fiber/CNT-modified epoxy composites, *Desalination* 419 (2017) 117–124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.012>
- [48] Chen, W., Application of recoverable carbon nanotube nanofluids in solar desalination system: An experimental investigation, *Desalination* 451 (2019) 92-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.025>
- [49] L. Sahota, G.N. Tiwari, Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of hybrid double slope solar still loaded with nanofluids, *Energy Convers. Manag.* 148 (2017) 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.068>
- [50] S. Rashidi, M. Bovand, N. Rahbar, J.A. Esfahani, Steps optimization and productivity enhancement in a nanofluid cascade solar still, *Renew. Energy* 118 (2018) 536-545. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.048>
- [51] S. Shanmugan, S. Palani, B. Janarthanan, Productivity enhancement of solar still by PCM and Nanoparticles miscellaneous basin absorbing materials, *Desalination* 433 (2018) 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.045>
- [52] M.B. Shafii, S. Jahangiri Mamouri, M.M. Lotfi, H. Jafari Mosleh, A modified solar desalination system using evacuated tube collector, *Desalination* 396 (2016) 30–38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.030>
- [53] D.B. Singh, G.N. Tiwari, Enhancement in energy metrics of double slope solar still by incorporating N identical PVT collectors, *Sol. Energy* 143 (2017) 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.039>
- [54] J. A. Duffie, W. A. Beckman (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd Edn. John Wiley and Sons, New York.
- [55] P.T. Tsilingiris, The application and experimental validation of a heat and mass transfer analogy model for the prediction of mass transfer in solar distillation systems, *Appl. Therm. Eng.* 50 (2013) 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.007>
- [56] A. Madhlopa, Modelling radiative heat transfer inside a basin type solar still, *Appl. Therm. Eng.* 73 (2014) 707-711. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.065>
- [57] M.M. Morad, H.A.M. El-Maghawry, K.I. Wasfy, Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover, *Desalination* 373 (2015) 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.06.017>
- [58] M.M. Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, M. Zerrouki, Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, *Energy Convers. Manag.* 94 (2015) 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.069>
- [59] A. Rahmani, A. Boutriaa, Numerical and experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser, *J. Hydrogen Energy* 42 (2017) 29047 – 29055. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.242>
- [60] A.G.M. Ibrahim, I. Dincer, A solar desalination system: Exergetic performance assessment, *Energy Convers. Manag.* 101 (2015) 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.060>
- [61] A. Kondrashov, E. Burkova, Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below, *Int. J. Heat Mass Transfer* 118 (2018) 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.096>
- [62] R. Ul Haq, F. Ahmed Soomro, T. Mekkaoui, Q.M. Al-Mdallal, MHD Natural convection flow enclosure in a corrugated cavity filled with a porous medium, *Int. J. Heat Mass Transfer* 121 (2018) 1168–1178. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.063>
- [63] R. V. Dunkle, Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still, Commonwealth scientific and industrial research organization, Victoria, Australia, C.S.I.R.O., 108, (1961) 895-902.
- [64] P.T. Tsilingiris, Parameters affecting the accuracy of Dunkle's model of mass transfer phenomenon at elevated temperatures, *Appl. Therm. Eng.* 75 (2015) 203-212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.010>

Apéndice. Datos empleados para calcular Figs 6-9.

$q_{sol} = 0.9 \text{ kW/m}^2$	Data for n = 180 (29th Junio)
$(\tau\alpha) = 0.8$	$T_{amb \text{ max}} = 37; T_{amb \text{ min}} = 25;$
$T_e = 31^\circ\text{C}$	$\Phi = 23.5; \beta = 4; \gamma = 0$ (La Paz, B.C.S.)
$V_{wind} = 1 \text{ m/s}$	$M_w = 10; M_{cub} = 8$
$\epsilon_w = \epsilon_g = 0.95$	$(\tau\alpha) = 0.94; A_c = 1; A_p = 1.6$
$A_p = 1.6 A_c$	$d_{wood} = 0.0254/8; V_w = 1$
$k_{wood} = 0.12 \text{ W/m K}$	$Rad_{TotMax} = 0.895; R_{addirmax} = 0.764$
$d_{wood} = 0.00635 \text{ m (o } \frac{1}{4}''\text{)}$	$step1 = 0.125/8$
$\epsilon_{out} = 0.9$	