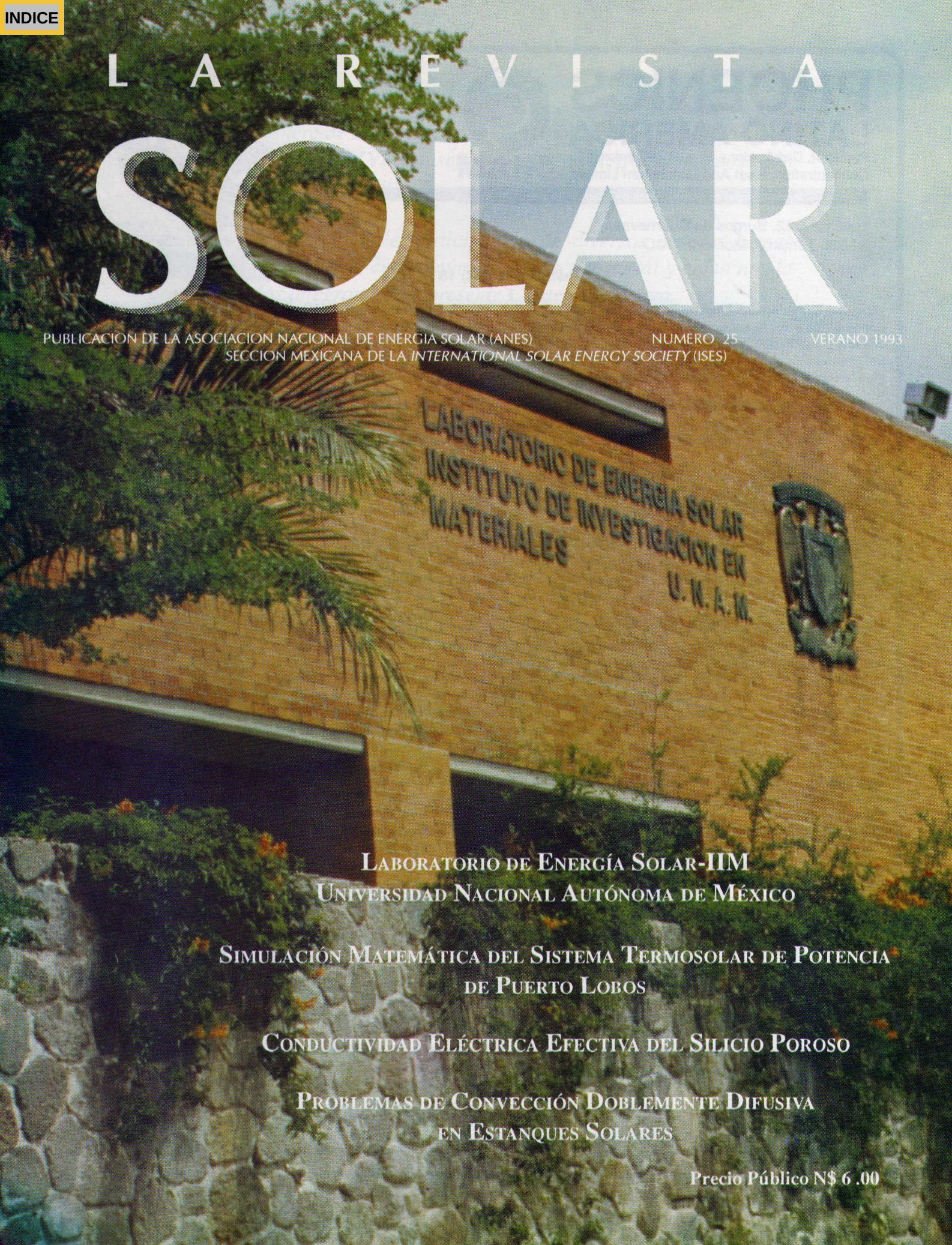
LA REVISTA SOLAR

PUBLICACION DE LA ASOCIACION NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES) NUMERO 25 VERANO 1993
SECCION MEXICANA DE LA *INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY* (ISES)



LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR-IIM
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA TERMOSOLAR DE POTENCIA DE PUERTO LOBOS

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EFECTIVA DEL SILICIO POROSO

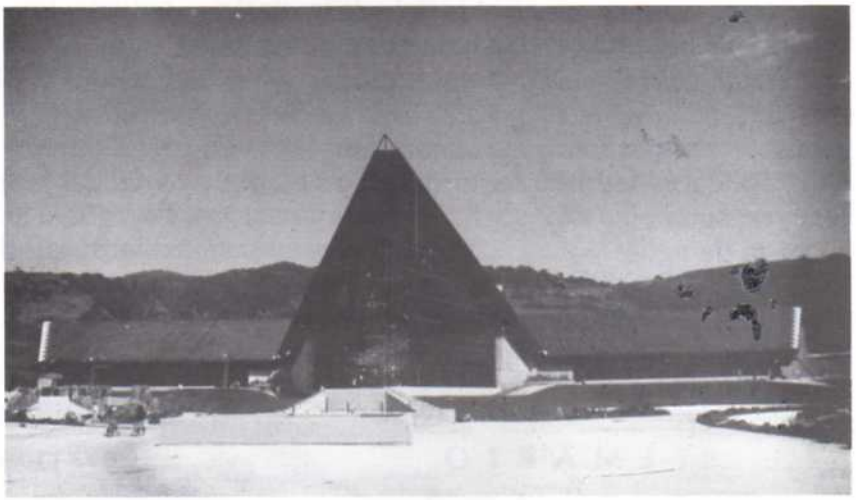
PROBLEMAS DE CONVECCIÓN DOBLEMENTE DIFUSIVA EN ESTANQUES SOLARES

Precio Público N$ 6 .00

El Auténtico

Módulo^{mr} SOlar

Contratista seleccionado para el equipamiento del ***Club Campestre Ecológico Asturiano****, donde suministró e instaló más de 4,000 m^2 de calentadores solares de cobre con superficie selectiva de óxido cúprico. Tambien fabricó e instaló mallas* ***sombreadoras para el control solar y ventilación.***



Los únicos calentadores solares con cubierta doble de policarbonato

GARANTIZADO !!

Instalados más de 80,000 m^2 desde 1975, en hoteles, deportivos, industrias, ...

LA EMPRESA CON MAYOR EXPERIENCIA EN INGENIERIA SOLAR

Tels: (73) 12•36•07
Fax: (73) 14•08•82

EDITORIAL

Con este número de la Revista Solar se completa el primer ciclo anual de la misma desde que el VII Consejo Directivo de la ANES tomó posesión de su cargo en octubre de 1992.

Gracias a la invaluable participación de diversos autores hemos logrado editar con este, cuatro números de la revista tal y como nos lo propusimos los integrantes del presente Consejo Directivo.

Por tal motivo, hemos seleccionado en esta ocasión especial, cuatro artículos elaborados todos ellos por investigadores del Laboratorio de Energía Solar, de la Universidad Nacional Autónoma de México, institución de sólido prestigio, dedicada a la investigación de la energía solar y sus aplicaciones.

En el primer trabajo se describen los aspectos más importantes de las distintas áreas que constituyen el Laboratorio de Energía Solar, incluyendo su Posgrado en Energía Solar.

El segundo artículo describe los aspectos teóricos involucrados en la simulación de un sistema solar que permitirá satisfacer las demandas de energía eléctrica en una comunidad pesquera ubicada en el Estado de Sonora.

En el tercer trabajo se analiza un material que representa una promesa para las aplicaciones optoelectrónicas, presentándose un modelo que lo trata de representar físicamente, planteando además las ecuaciones para el transporte electrónico.

Por último, el cuarto artículo, presenta un análisis relativo a los problemas de convección en estanques solares, analizando desde el punto de vista numérico la evolución de dicho fenómeno.

Solo me resta, enviar un cordial saludo a todos nuestros lectores, y agradecer infinitamente a todas aquellas personas que han hecho posible la publicación de esta revista, esperando verlos a todos proximamente en nuestra XVII Reunión Nacional en la Universidad de Colima.

Ricardo Saldaña Flores
Editor

LA REVISTA SOLAR

Una publicación para los interesados en el Sol y otras energías renovables

Suscríbase

Durante varios años, LA REVISTA SOLAR fue una publicación exclusiva para los miembros de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). Hoy en día, nuestra nueva política de difusión permite la suscripción para todo el público, con lo cual un número mayor de personas puede introducirse al mundo de la energía solar y otras fuentes renovables.

Costo por un año (cuatro números) N$ 24.00

Para mayor información, escriba sus datos en el siguiente cupón, recortelo y envíelo a:
ANES, Apartado Postal 20-633,
01000 México, D.F.

NOMBRE _____
APELLIDO PATERNO APELLIDO MATERNO NOMBRE

DOMICILIO _____
CALLE NUMERO

_____
NUMERO INTERIOR COLONIA CODIGO POSTAL

_____
CIUDAD ESTADO TELEFONO

ASOCIACION NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES)

VII Consejo Directivo
Presidente
Dr. Juan José Ambriz García
Vicepresidente
Ing. Enrique Caldera Muñoz
Tesorero
Dr. Yasuhiro Matsumoto K.
Secretario Gral.
Dr. Claudio A. Estrada Gasca

SECRETARIAS:
Relaciones
M.C. Enrique Barrera Calva
Organización
Fis. Adolfo Finck Pastrana
Publicaciones
M.I. Minerva GuadalupeVargas Vega
Vocalías
Ing. Ricardo Saldaña Flores
Asuntos Industriales
Ing. Enrique Ramoneda Retif
Asuntos Internacionales
M.I. Eduardo Rincón Mejía
Secciones Regionales
Arq. Juan Manuel Rodríguez Torres

Editor
Ing. Ricardo Saldaña Flores

Diseño y Formación
Dr. Francisco Villaseñor Rivero
DiGraTec

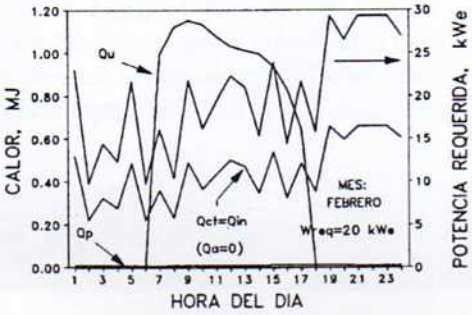
Impresión
Impresora Ambriz
Tel. 633-83-32 y 633-34-60
México, D.F.

LA REVISTA SOLAR, publicación trimestral de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) de México. Apartado Postal 20-633, 01000 México, D.F. Los artículos firmados son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de la Asociación. Certificado de Licitud de Título núm. 2148. Certificado de Licitud de Contenido núm. 1357. Se autoriza la reproducción de la información si se cita la fuente.

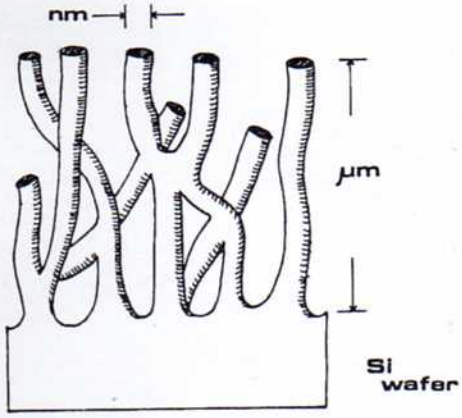
PORTADA
Edificio del Laboratorio de Energía Solar, IIM-UNAM.
Cortesía: C. A. Estrada Gasca.

SUMARIO

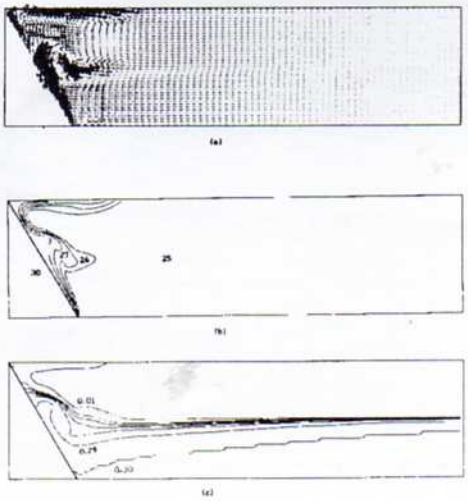
Laboratorio de Energía Solar-IIM Universidad Nacional Autónoma de México **4**



Simulación matemática del sistema termosolar de potencia de Puerto Lobos **10**



Conductividad eléctrica efectiva del silicio poroso **15**



Problemas de convección doblemente difusiva en estanques solares **21**

LABORATORIO DE ENERGIA SOLAR-IIM UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Por: Jaime Cervantes de Gortari*

PROPOSITO Y OBJETIVOS

Fundado en 1975 como Departamento de Energía Solar del Instituto de Investigaciones en Materiales en la Ciudad Universitaria del D.F., el Laboratorio de Energía Solar (LES) se estableció en 1984 dentro de la zona conurbada de Cuernavaca, en el municipio de Temixco, Morelos, como parte de la política de descentralización de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Sus instalaciones están localizadas a 90 Km. al sur de la ciudad de México y a 7 Km. al sur de Cuernavaca. Las coordenadas geográficas del LES son 18° 51' latitud norte, 99° 14' longitud oeste y 1285 m de altitud sobre el nivel del mar. A lo largo de la mayor parte del año, el cielo está despejado, las temperaturas diurnas fluctúan entre 20 °C y 30 °C y la velocidad del viento es normalmente inferior a 3 m/s.

La mayor parte del financiamiento para las actividades del LES proviene de la UNAM, aunque varios proyectos son financiados por el CONACYT, los organismos y dependencias del gobierno federal, y algunas agencias internacionales como la OEA y la UNESCO. Desde 1986, el LES es una institución afiliada al Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia.

* Jefe del Laboratorio de Energía Solar IIM-UNAM, Apartado Postal 34, C.P. 62580, Temixco, Morelos, México.

El LES es la sede de los programas de posgrado en energía solar que ofrece la UNAM: la Especialización en Heliodiseño de la Facultad de Arquitectura y la Maestría en Energía Solar (con dos opciones: Sistemas Fototérmicos y Sistemas Fotovoltaicos) de la Unidad de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades. El LES ha sido también anfitrión de varios cursos nacionales e internacionales.

Son objetivos específicos del LES:

- Realizar investigación básica, investigación aplicada y desarrollo tecnológico en las disciplinas que contribuyan al mejor aprovechamiento de la energía solar.

- Difundir los conocimientos y tecnologías que se desarrollan en sus áreas de actividad.

- Formar recursos humanos en energía solar a través de cursos de actualización y sus programas de Especialización en Heliodiseño y de Maestría en Energía Solar.

El LES está constituído por cuatro Grupos de Trabajo interdisciplinarios integrados por investigadores en Física, Química e Ingeniería que realizan las actividades que se detallan en los siguientes apartados:

GRUPO DE TERMODINAMICA APLICADA

INTEGRANTES:

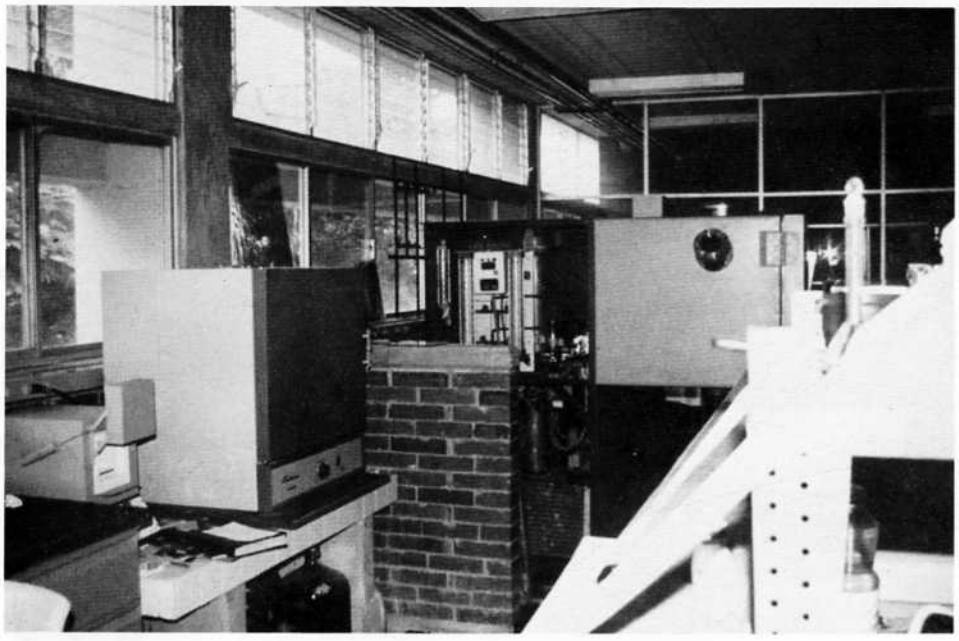
Dr. Roberto Best Brown
Dr. Jaime Cervantes de Gortari (Jefe del LES)
M. en I. Jorge Hernández Gutiérrez
M. en C. Fabio Manzini Poli
Dr. Manuel Martínez Fernández
Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa (Jefe de grupo)
M. en E.S. Wilfrido Rivera Gómez Franco
D.I. Adrián H. Oskam Voorduin

ACTIVIDADES

A. TECNOLOGIA DE REFRIGERACION POR ABSORCION Y BOMBA DE CALOR.

1. Diseño, construcción y evaluación de sistemas de absorción de operación contínua e intermitente usando como fuentes de energía de baja o mediana temperatura como la energía solar, la geotérmica y el calor industrial de desecho.

2. Diseño y prueba de componentes de los sistemas de absorción y generación de datos para el diseño de intercambiadores de calor y masa.



B. DATOS DE DISEÑO TERMODINAMICO PARA BOMBAS DE CALOR POR ABSORCION.

1. Simulación por computadora de sistemas de bomba de calor por absorción.

2. Evaluación de propiedades termodinámicas y termofísicas para fluidos de trabajo usados en sistemas de absorción y adsorción.

3. Análisis de exergía de los sistemas de refrigeración y bombas de calor.

C. PLANEACION ENERGETICA.

1. Desarrollo de modelos de sistemas energéticos con simulación numérica.

2. Análisis de sistemas fotovoltaicos.

GRUPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

INTEGRANTES:

Fís. José Campos Alvarez
M. en C. Arturo Fernández Madrigal
Ing. Oscar Gómez Daza Alemdaro
Dr. Antonio Jiménez González
Dra. Hailin Zhao Hu
Dr. Karunakaran Nair Padmahabhan (Jefe de Grupo)
Dra. Santhamma Nair Mailepallil Thankamma
Dr. Sebastián Pathiyamatton Josep
Fís. Aarón Sánchez Juárez

ACTIVIDADES

A. PELICULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS

1. Depósito por vapor químico beneficiado con plasma (PECVD).

2. Técnicas químicas de depósitos para películas delgadas.

3. Depósito por rocío pirolítico químico.

4. Películas impresas por serigrafía.

5. Estación de caracterización optoelectrónica.

B. CELDAS SOLARES.

1. Celdas solares basadas en silicio amorfo.

2. Celdas solares de películas delgadas policristalinas.

C. SUPERFICIES SELECTIVAS.

1. Recubrimiento para el control de la radiación solar.

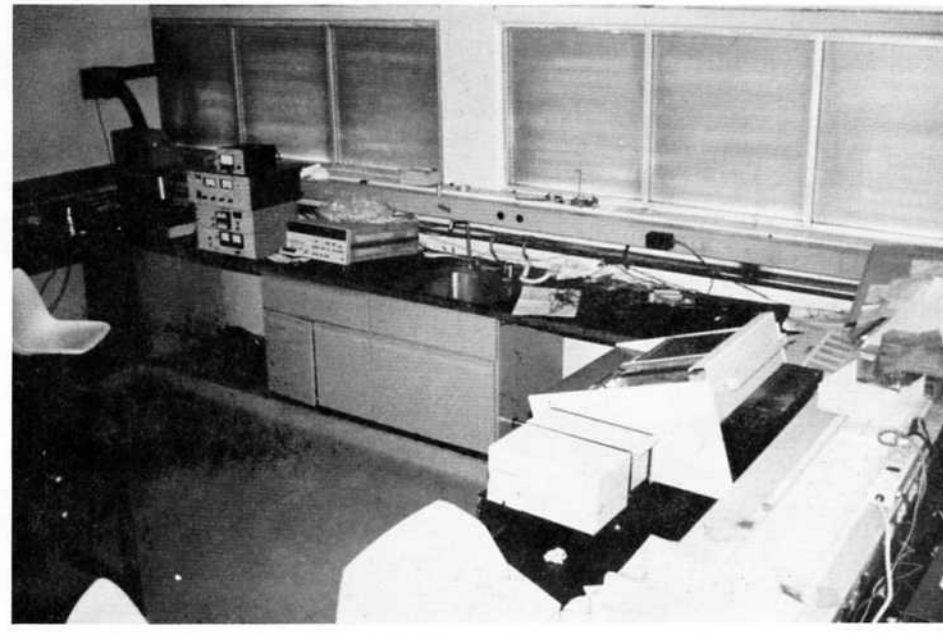
2. Colectores solares de alta temperatura.

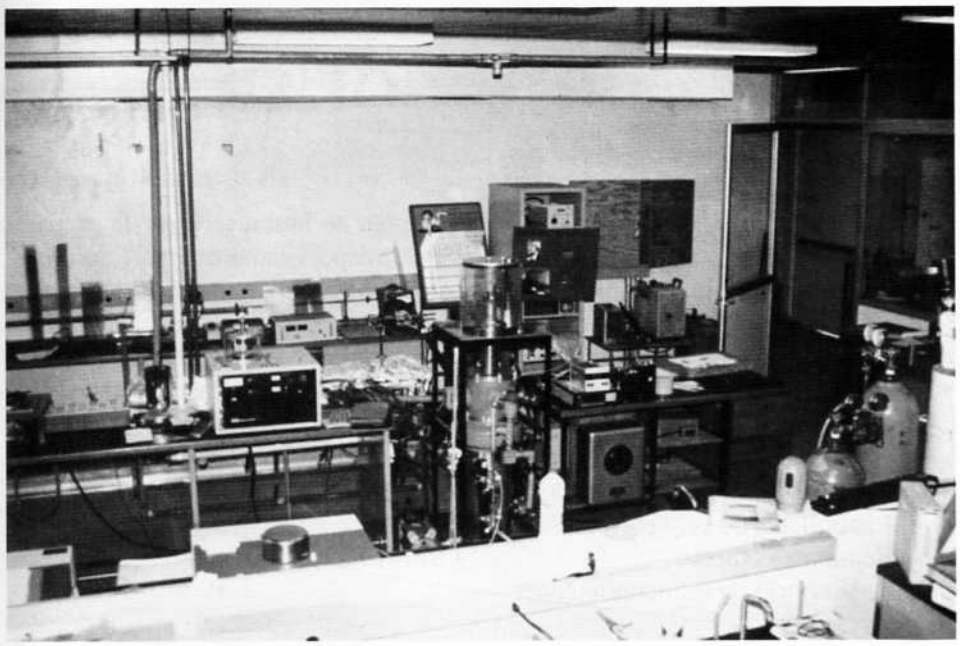
3. Electrónica solar.

GRUPO DE FISICA TEORICA

INTEGRANTES:

Dr. Mariano López de Haro (Jefe de Grupo)
Dra. Julia Tagüeña Parga
Dra. Marcela Beltrán Sánchez
Dr. Jesús Antonio del Río Portilla
I. Q. María del Carmen Huerta Reynoso





ACTIVIDADES

A. FISICA TEORICA (MECANICA ESTADISTICA Y FISICA DEL ESTADO SOLIDO).

1. Termodinámica de procesos irreversibles.

2. Teoría cinética de mezclas.

3. Propiedades dinámicas de soluciones poliméricas.

4. Convección de Bernard.

5. Difusión en medios porosos.

6. Impurezas en silicio amorfo y germanio amorfo.

7. Aleaciones de semiconductores amorfos.

GRUPO DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA Y MASA

INTEGRANTES:

Dr. Francisco Avila Segura
Dr. Jaime Cervantes de Gortari (Jefe del LES)
Dr. Claudio A. Estrada Gasca (Jefe de Grupo)
Ing. Guillermo Hernández Cruz
Dr. Eduardo Ramos Mora
Dr. Jorge A. Rojas Menéndez

ACTIVIDADES

A. SIMULACION NUMERICA

Se desarrollan y se adaptan programas para la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales nolineales en problemas de termofluidos.

Se desarrollan códigos numéricos que simulan el comportamiento térmico de sistemas termosolares.

B. ANALISIS EXPERIMENTAL

Se desarrollan y se adaptan instrumentos que permiten medir con precisión variables como velocidad, temperatura, presión, etc. para el estudio de problemas de transferencia de calor en fluidos. Entre los equipos instalados se encuentran:

1. Anemómetro laser Doppler y anemómetro de hilo caliente.

2. Interferómetro holográfico.

3. Procesamiento de imágenes.

C. CONVECCION NATURAL

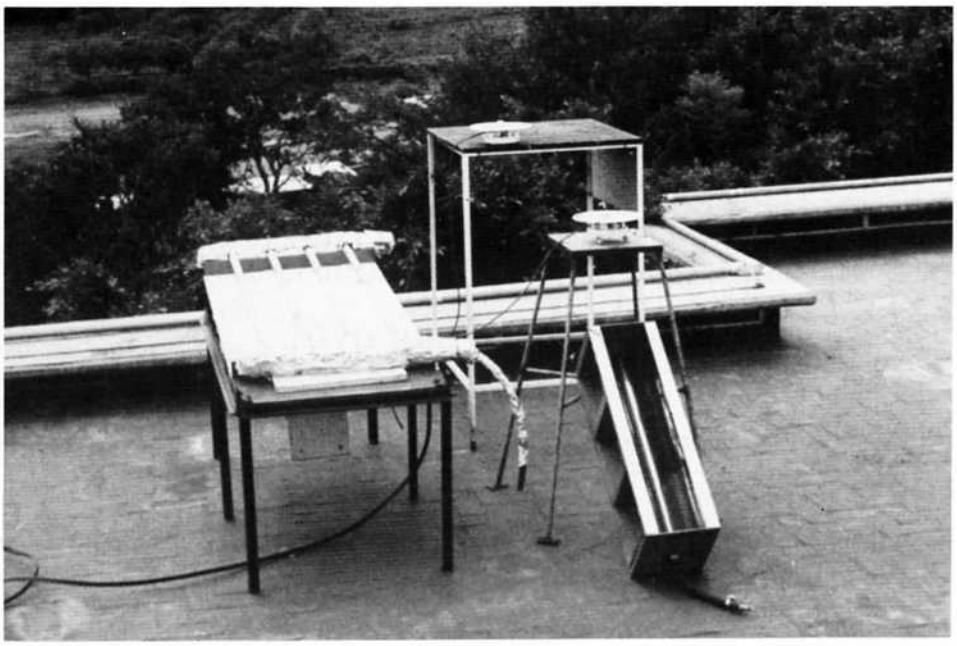
Se plantean modelos matemáticos y se analizan numéricamente y experimentalmente, problemas diversos de convección natural en cavidades, en circuitos cerrados, sistemas doblemente difusivos, etc. para el estudio de los fenómenos básicos que ocurren en sistemas de aprovechamiento de energía solar.

D. DISPOSITIVOS FOTOTERMICOS

1. Evaluaciones Térmicas de vidrios con controladores ópticos.

2. Concentración Solar.

3. Transferencia de calor en tubos evacuados para colectores solares.



POSGRADO EN ENERGIA SOLAR

MAESTRIA EN ENERGIA SOLAR

OBJETIVO GENERAL

Capacitar en los conocimientos básicos, teóricos y experimentales, necesarios para desarrollar las aplicaciones de la energía solar.

OPCIONES

Se ofrecen dos opciones basadas en las principales formas de conservación: la fotovoltaica y la fototérmica.

OBJETIVOS DE LA OPCION FOTOTERMICA

Formar recursos en la teoría de la transferencia de calor y masa, y en el área científico-técnica de la conversión de energía solar a energía calorífica, y en su posterior utilización en diversos procesos.

OBJETIVOS DE LA OPCION FOTOVOLTAICA

Formar recursos humanos en la teoría de semiconductores y en el área científico-técnica de la conversión de energía solar a energía eléctrica por medio de celdas solares. Incluyendo la preparación y caracterización de materiales y dispositivos.

La planta docente de profesores esta compuesta por algunos investigadores del Laboratorio de Energía Solar.

Algunas de las asignaturas que se cursan son las siguientes:

Asignaturas obligatorias para ambas opciones.

- Fenómenos de transporte I
- Introducción al aprovechamiento de la energía solar
- Matemáticas I
- Principios de estado sólido
- Proyecto de investigación I
- Proyecto de investigación II

Asignaturas de la opción fotovoltaica.

- Aplicaciones de semiconductores
- Laboratorio de celdas solares I
- Laboratorio de celdas solares II
- Semiconductores
- Laboratorio de semiconductores

Asignaturas de la opción fototérmica

- Aplicaciones érmicas de la energía solar
- Fenómenos de transporte II
- Laboratorio de radiación y solarimetría
- Matemáticas II
- Termodinámica aplicada

Asignaturas optativas para ambas opciones

- Electrodinámica
- Estadística matemática
- Fenómenos de transporte en sistemas electroquímicos
- Planeación y evaluación energética
- Temas selectos de conversión fotovoltaica
- Temas selectos de conversión fototérmica

ESPECIALIZACION EN HELIODISEÑO

OBJETIVO

Formar profesionistas de alto nivel que posean los conocimientos teórico-práctico que les permitan desarrollar tecnologías solares para lograr un diseño integral con viabilidad técnica y económica en los ámbitos industrial, arquitectónico y urbano.

También se busca reforzar la preparación de especialistas en transferencia de calor y masa, propiedades de materiales, así como análisis y evaluación de sistemas en relación a la disponibilidad, características y técnicas de aprovechamiento de la energía solar.

PLAN DE ESTUDIOS

I SEMESTRE

- Principios de transferencia de calor y masa
- Radiación solar y clima
- Heliodiseño I
- Taller de Heliodiseño

II SEMESTRE

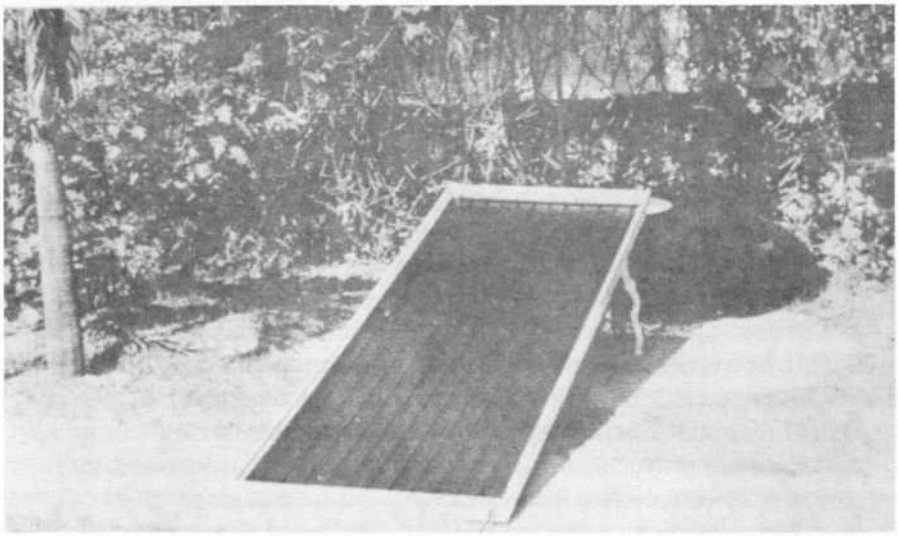
- Análisis y evaluación de sistemas solares
- Heliodiseño II
- Taller de Heliodiseño II
- Temas Selectos de Heliodiseño

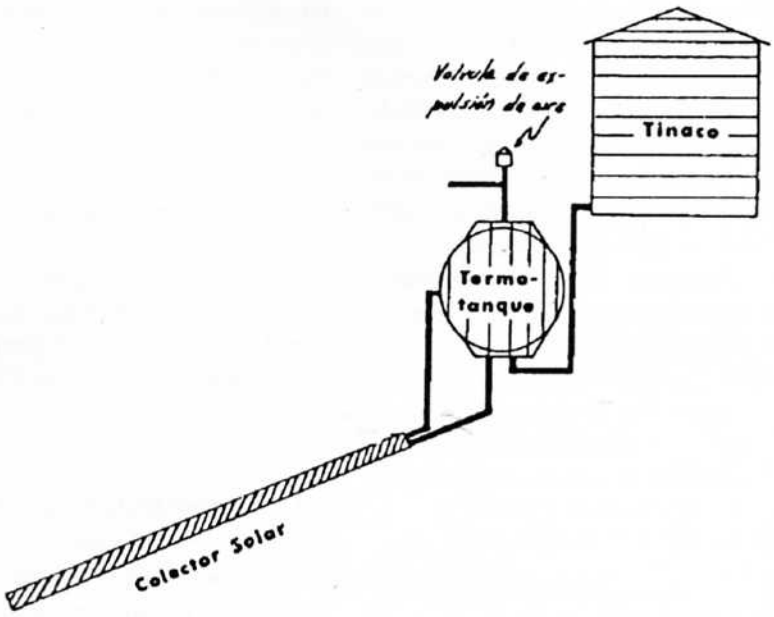
Privada de Chiapas Nº 105
62050 Cuernavaca, Mor.
Tel. (91-73) 14-30-42
Fax. (91-73) 18-26-68

ASHMOR

Hda. de Lira Nº 324
78180 Queretaro, Qro.
Tel. (91-42) 15-23-27
Fax. (91-42) 15-23-27

COLECTORES SOLARES Y TERMOTANQUES





SIMULACION MATEMATICA DEL SISTEMA TERMOSOLAR DE POTENCIA DE PUERTO LOBOS

Por: C.A. Estrada-Gasca*
F. Bahena*
R.E. Cabanillas**

INTRODUCCION

Los sistemas solares son sistemas energéticos que captan la energía solar y la transforman en alguna energía útil para el ser humano. En general se puede hablar de los sistemas solares fotovoltáicos y de los sistemas solares fototérmicos. Los primeros transforman directamente la energía solar en electricidad permitiendo satisfacer demandas de energía eléctrica. Los segundos transforman la energía solar en calor que puede ser usado para satisfacer demandas energéticas de calentamiento o enfriamiento de espacios en edificaciones, calentamiento de agua para uso doméstico o industrial, producción de frío e incluso generación de electricidad a través de máquinas térmicas. En todos los casos, el funcionamiento de los sistemas solares será tan bueno sea su diseño. Una herramienta que ha resultado ser muy eficaz para el diseño y optimización de dichos sistemas son las simulaciones matemáticas en computadora de los mismos. Estas simulaciones son experimentos numéricos basados en modelos matemáticos de los sistemas físicos que pueden dar el mismo tipo de información sobre el funcionamiento de un sistema que la operación real del mismo. También las simulaciones en computadora pueden dar información del efecto que tiene el cambio en los parámetros de diseño sobre el funcionamiento del sistema. Esto se logra a través de una serie de experimentos numéricos donde cambiando dichos parámetros se usan las mismas demandas térmicas y condiciones climáticas. En este artículo se presenta como ejemplo la simulación matemática que se ha realizado de la Planta Termosolar de Puerto Lobos.

El Proyecto de Desarrollo de la Comunidad de Pescadores de Puerto Lobos [1] es un proyecto financiado por el Programa Nacional de Solidaridad y se encuentra actualmente en construcción. Este proyecto es el proyecto piloto más reciente de su tipo en México. El pueblo de Puerto Lobos tiene 229 habitantes y esta localizado en el Municipio de Caborca, en el Estado de Sonora. Los principales objetivos del proyecto son proveer a la comunidad con: electricidad (30 kWe) para uso doméstico, productivo y turístico; agua potable (3000 litors/día) para consumo humano, refrigeración de 3000 kg de pescado y producción de 1500 kg de hielo y casas con diseño pasivo para los pescadores. Los destiladores para la producción de agua potable con agua de mar ya se terminaron de construir y se encuentran en operación. La planta termosolar esta en contrucción así como el resto de los sistemas. La compañia mexicana que elaboró el proyecto y esta construyendo la obra es CIEDAC de México.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema eléctrico de Puerto Lobos es un sistema híbrido termosolar y diesel. Consiste de los siguientes subsistemas: el campo de colectores solares, el tanque de almacenamiento térmico, el calenta dor auxiliar de aceite, la máquina térmic de ciclo Rankine con fluido orgánico d trabajo y el sistema diesel de respaldo d generación eléctrica.

El campo de colectores solares consist de 72 colectores de canal parabólico cu yos ejes estan orientados norte-sur y tie nen un sistema de seguimiento este-oes te, con una apertura de 13.93 m^2 dando u área total de 1003 m^2.

La unidad de almacenamiento térmic consiste de dos tanques cilíndricos d acero con una capacidad cada uno de 2 m^3 con aislamiento térmico de fibra d vidrio. El fluido de almacenamiento té mico es el aceite térmico con una tempe ratura máxima de operación de 290 °C El calentador auxiliar de aceite tiene ur capacidad de salida de 87 kW.

El sistema de potencia es una unidad d máquina térmica de ciclo Rankine orga nico con capacidad de 30 kWe. El fluid de trabajo es el Freón R 113; las cond ciones estándares del generador de vap son 135 °C y 924 kPa, las condiciones d condensador son 35 °C y 65.5 kPa con u flujo de enfriamiento en el condensad de 21.3 lts/seg. El sistema de potenc auxiliar es un sistema diesel de gener ción eléctrica, trifásico, 220 V, 60 cicl y con capacidad de 38 kWe.

La figura 1 muestra el esquema de planta que fue analizada. En condicion de diseño (estado estacionario), el sist ma opera como sigue. La energía solar absorbida por el aceite térmico cuanc este pasa a través de de los colector solares calentándose a una temperatu mayor, típicamente 50 °C arriba de la qu entra. Este aceite caliente va al tanque almacenamiento donde permanece has

* Laboratorio de Energía Solar IIM - UNAM
Apartado Postal 34, C.P. 62580,
Temixco, Morelos, México

** Departamento de Ingeniería Química
Universidad de Sonora,
Transversal y Rosales, Hermosillo,
Sonora, México

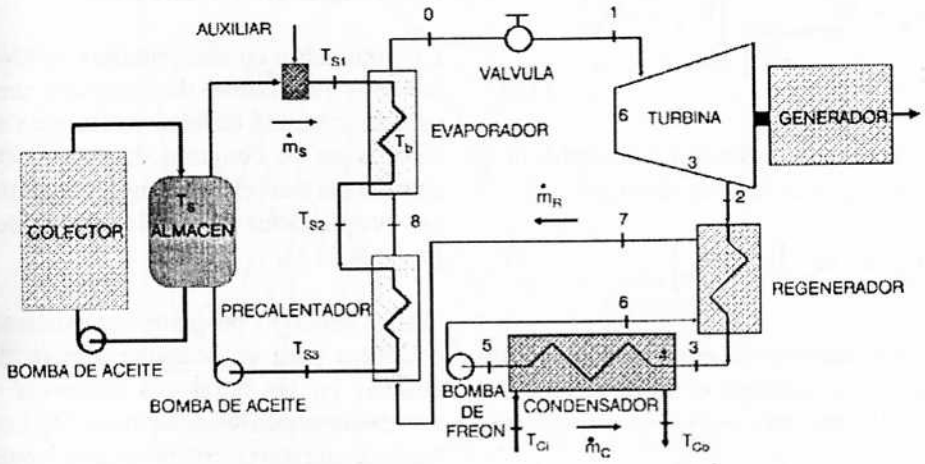


Figura 1. Esquema simplificado de la planta termosolar de Puerto Lobos.

que o regresa al campo de colectores solares para ganar más energía térmica o va al generador de vapor de la máquina térmica para dar algo de su energía al fluido de trabajo Freón R113. En este último caso, a más baja temperatura, el aceite deja el generador de vapor y va al precalentador cediendo más calor y de ahí es bombeado de regreso al tanque de almacenamiento térmico. Si se requiere, el calentador auxiliar entra en operación para incrementar la temperatura aceite hasta el valor requerido por la máquina térmica. Se espera requerir energía térmica auxiliar en dias nublados o cuando demandas pico en la energía eléctrica ocurran.

En el sistema de potencia el fluido orgánico sigue el camino estándar de un ciclo Rankine. Para condensar el fluido orgánico, se hace pasar agua de mar a través del condensador. Esta agua de mar calentada es después enviada a los destiladores trabajando en modo de cogeneración.

MODELO MATEMATICO

Para desarrollar el modelo matemático del sistema que se muestra en la figura 1, se realiza un balance de energía en el tanque de almacenamiento; suponiendo que el fluido en el tanque esta bien mezclado y esta bajo un proceso de flujo-uniforme y de estado-uniforme, se puede obtener [2]

$$(mCp)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_u - Q_p - Q_{ct} \qquad (1)$$

donde Q_u es la energía que viene de los colectores y va al tanque térmico, Q_p es la energía que se pierde por conducción y convección del tanque al medio ambiente, Q_{ct} es la carga térmica que va del sistema solar (colectores + tanque de almacenamiento) a la máquina térmica para satisfacer la carga requerida y el lado izquierdo de la ecuación representa el cambio en la energía interna del fluido dentro del tanque. Para resolver esta ecuación es necesario conocer a Q_u, Q_p y Q_{ct} como funciones de T_s, la temperatura del aceite dentro del tanque.

La eficiencia instantánea de los colectores solares que se usaran en Puerto Lobos es de acuerdo al fabricante [2]

$$\eta_c = 0.68 - \left[0.26\left(T_f - T_{amb}\right) + 0.0019\left(T_f - T_{amb}\right)^2\right]\left(I_t\right)^{-1} \qquad (2)$$

donde I_t es la insolación instantanea sobre la superficie de los colectores, T_f es la temperatura de entrada del fluido a los colectores y T_{amb} es la temperatura ambiente. Despreciando pérdidas en tuberías $T_s = T_f$, y si A_c es el área del colector, entonces ,

$$Q_u = A_c I_t \eta_c = Q_u(T_s, T_{amb}, I_t) \qquad (3)$$

La ecuación que determina las pérdidas térmicas del tanque al medio ambiente esta dada por,

$$Q_p = (UA)_s \left(T_s - T_{amb}\right) = Q_p \quad (T_s, T_{amb}) \qquad (4)$$

donde $(UA)_s$ es el producto área-coeficiente de pérdidas del tanque térmico. Para los tanques de Puerto Lobos se tiene que $(UA)_s = 9.65$ W/°C. Así $Q_p = Q_p(T_s, T_{amb})$.

La figura 1 incluye el diagrama de la máquina térmica. Los puntos numerados identifican los estados termodinámicos de interés del Freón R 113 en dicha máquina. Conociendo las entalpías en cada estado del fluido orgánico y especificando el flujo másico del Freón, Q_{ct} puede ser calculado por,

$$Q_{ct} = \dot{m}_R \left(h_0 - h_7\right) \qquad (5)$$

y la potencia neta de la máquina térmica sería,

$$\dot{W} = \dot{W}_t - \dot{W}_b \qquad (6)$$
$$= \dot{m}_R \left(h_1 - h_2\right) - \left(h_6 - h_5\right)$$

Esta potencia es la que entra al generador eléctrico que tiene una eficiencia del 95 %.

Conociendo las propiedades termodinámicas del fluido orgánico, se desarrolló un algoritmo para calcular las entalpias. Dada la temperatura del condensador en el ciclo, las entalpias son función sólo de la temperatura en el generador de vapor y así

$$Q_{ct} = \dot{m}_R \left(h_0 - h_7\right) = Q_{ct}(T_0)$$

La eficiencia de la máquina térmica esta dada por,

$$\eta_{mt} = \left[\left(h_1 - h_2\right) + \left(h_6 - h_5\right)\right] \cdot \left(h_0 - h_7\right)^{-1} = \eta_{mt}(T_0) \qquad (7)$$

En máquinas térmicas que operan con ciclo Rankine es un hecho conocido que la temperatura máxima del fluido de trabajo (T_o) es generalmente entre 5 y 20 °C más baja que la máxima temperatura del fluido en el tanque térmico ($T_s = T_{s1}$) debido a la diferencia de temperaturas en el intercambiador de calor. Similarmente, la temperatura en el condensador (T_3) está entre 5 y 20 °C arriba de la temperatura del fluido de enfriamiento (T_{ci}, temperatura del agua de Mar a la entrada del condensador). Esto es,

$$T_0 = T_s - T_\alpha \,, \qquad T_3 = T_{c_1} - T_\beta \tag{8}$$

donde T_α y T_β tienen un valor constante, dependiendo de los intercambiadores usados, entre los rangos mencionados. Así, cuando se conocen T_s y T_{ci}, entonces quedan determinadas T_o y T_3.

Sustituyendo las ecuaciones 3, 4, 5 y 8 en la ecuación 1 e integrando se obtiene,

$$T_s^{l+1} = T_s^l + \int_{t_l}^{t_{l+1}} \left(Q_u - Q_p - Q_{ct}\right) \frac{dt}{(mCp)_s} \tag{9}$$

donde las condiciones al tiempo t_o son conocidas. Esta ecuación permite calcular la temperatura en el tanque térmico como función del tiempo. La integración se hace numéricamente siendo en general suficiente un paso de tiempo de una hora.

OPERACION DEL SISTEMA

Las cargas eléctricas que se esperan en Puerto Lobos son función del tiempo. Suponiendo que la máquina térmica trabaja a una temperatura constante en el generador de vapor, como se menciona en [1], entonces para un tiempo dado, se conoce T_{ci} 1y para satisfacer a ese tiempo la potencia requerida $W_{requerido}$, el flujo másico del Freón debe satisfacer la relación

$$\dot{m}_R = \dot{W}_{requerido} \left(\dot{W}_t - \dot{W}_b\right)^{-1} = \dot{m}_R(t) \tag{10}$$

Con ese flujo el calor transferido a la máquina térmica esta dado por

$$Q_{IN} = \dot{m}_R \left(h_0 - h_7\right) \tag{11}$$

y para trasferir esa energía desde el tanque y el auxiliar, el flujo másico del aceite debe ser

$$\dot{m}_s = \dot{m}_R \left(h_0 - h_8\right) \cdot \left[\varepsilon_s Cp_s \left(T_{s1} - T_o\right)\right]^{-1} \tag{12}$$

donde $T_{s1} - T_o = T_\alpha$ es una constante.

Dos casos pueden ocurrir, cuando $T_s < T_o + T_\alpha$ entonces, para mantener T_o constante, el calentador auxiliar de aceite debe encenderse hasta que la energía auxiliar necesaria haya sido transferida,

$$Q_A = \dot{m}_s Cp_s \left(T_{s1} - T_s\right) \tag{13}$$

así, Q_{load} del tanque de almacenamiento térmica es

$$Q_{ct} = Q_{IN} - Q_A \tag{14}$$

Si $T_s \geq T_o + T_\alpha$, $Q_A = 0$ y $Q_{load} = Q_{IN}$, m_s es calculada con (12).

PROGRAMAS Y DATOS

La simulación en computadora se hizo con dos programas de computo, uno para la máquina térmica y otro para el sistema en su conjunto. Los datos de entrada para el primer programa fueron las propiedades termodinámicas del Freón R 113.

En el segundo programa se pusieron controles para el arranque y paro de bombas en las horas del amanecer y anochecer según los criterios de [2]. Los datos de entrada en este programa fueron los datos meteorológicos (promedios diarios mensuales de temperatura ambiente, velocidad de viento, e insolación) y la distribución horaria de cargas eléctricas. La temperatura ambiente horaria se modela con funciones sinusoidales con mínimo y máximo a las 6 y a las 15 horas respectivamente. El programa calcula la insolación horaria en el plano de abertura de los colectores, con eje horizontal único norte-sur y con seguimiento este-oeste. Varios parámetros del sistema como las eficiencias de las turbina y bombas o las efectividades de los intercambiadores fueron fijados de acuerdo al equipo de la planta. Este programa integra la ecuación 9 con un paso de tiempo de 1 hora, para un día promedio de cada mes y para los doce meses del año. Un proceso iterativo se realizó en la integración diaria de tal suerte que la temperatura al inicio del día (0 horas) coincidiera más o menos un valor pequeño predeterminado con la

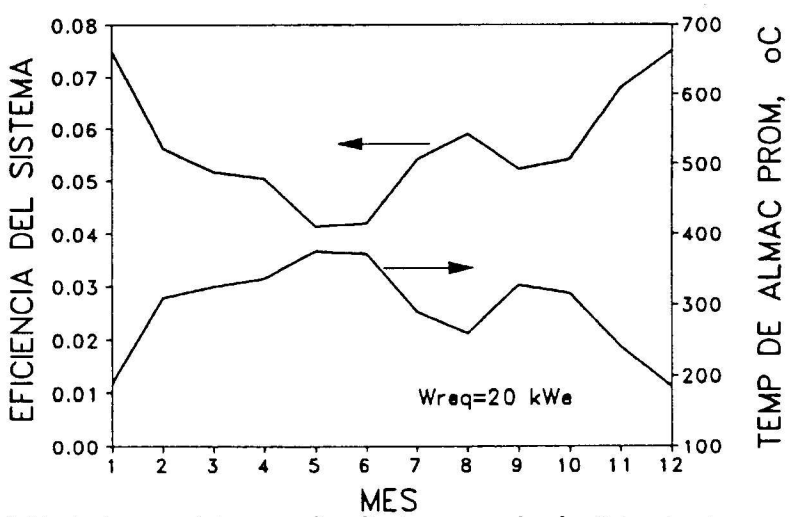


Figura 2. Variacion anual de promedios diarios mensuales de eficiencia y temperatura del aceite operando el sistema a 20 kWe.

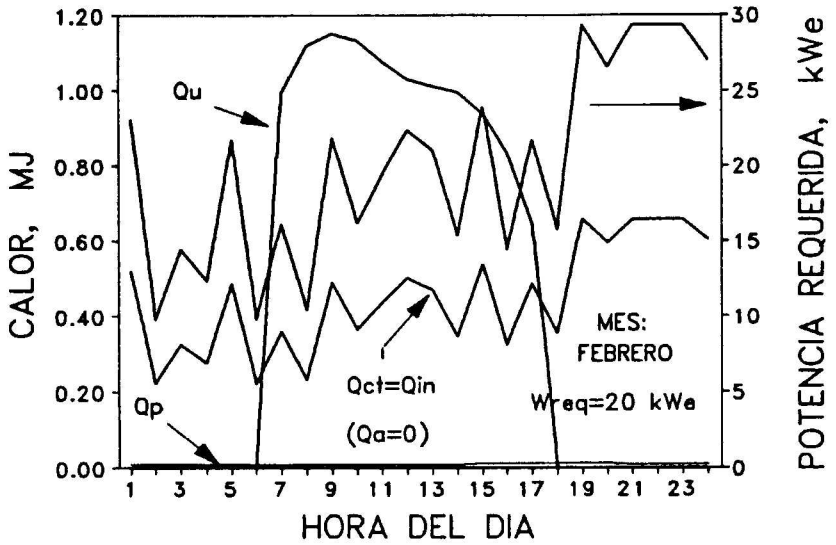


Figura 3. Calores y potencia eléctrica requerida para el mes de Febrero y una carga promedio de 20 kWe.

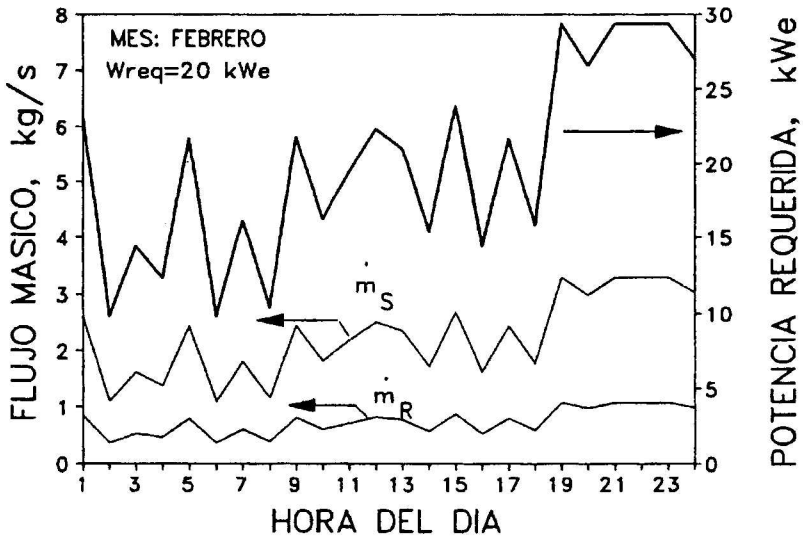


Figura 4. Flujos másicos horarios del Freon y del aceite para Febrero operando el sistema con carga promedio de 20 kWe.

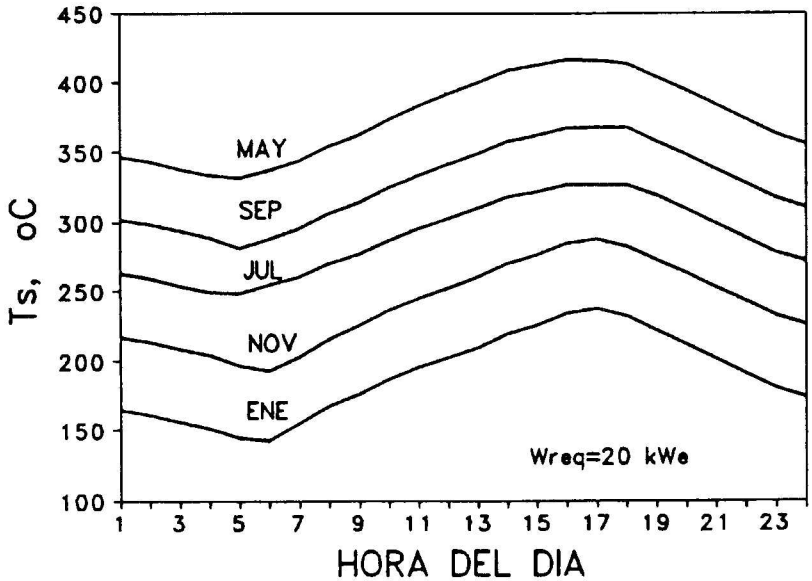


Figura 5. T_s contra el tiempo para 6 meses y una carga promedio de 20 kWe.

temperatura al final del día (24 horas). Se calcularon para cada hora los calores, las eficiencias y la fracción solar del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se presentan resultados de la simulación hecha con una carga promedio de 20 kWe. El sistema fue diseñado para tener una carga máxima de 30 kWe aunque la demanda al inicio se espera que sea de 14.3 kWe.

La figura 2 muestra la variación de los valores diarios promedios mensuales de la eficiencia y de la temperatura del aceite en el tanque para todo el año. La eficiencia anual del sistema fue calculada en 5.6% y la temperatura promedio del aceite fue de 243 °C. Estos resultados son consistentes con las ganancias de energía solar. Los colectores de concentración de canal parabólico estan en un plano horizontal con el eje orientado norte-sur y con seguimiento este-oeste, así que en el invierno las ganancias de energía solar tiene un valor mínimo mientras que en verano tienen un máximo.

En la figura 3 se muestran los calores horarios transferidos en el mes de Febrero. También se grafica en el eje de la derecha, para efectos de comparación, la distribución de la carga eléctrica requerida y satisfecha por el sistema. Esta se comporta de manera similar a Q_{in} como era de esperarse.

La figura 4 muestra las variaciones horarias de los flujos másicos del Freón y del aceite. También se grafica la demanda eléctrica requerida y su comportamiento es el esperado.

La Figura 5 muestra a T_s como función del tiempo para 6 meses. Se observa un comportamiento razonable de T_s. Sin embargo se hace notar que para junio T_s rebasa la temperatura límite de 290 °C. Este hecho también se muestra en la figura 2 donde el máximo promedio diario mensual ocurre en mayo. Esto es consecuencia de la fracción solar utiliza-

da en el diseño que fue de 98.9%. La operación en el verano del sistema deberá ser tal que no eleve la temperatura T_s arriba del límite permitido. Este límite se establece para evitar efectos de degradación del aceite por sobrecalentamiento. Es importante señalar aquí que la temperatura de flujo estancado en los colectores solares es de 566 °C. Siendo esta la temperatura de límite superior a la cual podría llegar el aceite.

CONCLUSIONES

De la simulación matemática, los parámetros mas importantes que se encontraron fueron los siguientes:

- Los valores promedios de $\dot{m}_R$ y $\dot{m}_S$ fueron 0.68 Kg/s and 2.1 Kg/s respectivamente para 20 kWe. Los valores de diseño fueron 1.1 Kg/s y 3.81 kg/s mostrando un buen acuerdo entre ellos.

- La eficiencia promedio del sistema fue de 5.6% y el valor de diseño fue de 5.9 %.

- La temperatura promedio T_s fue para 20 kWe de 243 °C en buena correspondencia con el valor de diseño de 225 °C ,

- Las fracciones solares fueron de 91.33 %

- A pesar de las suposiciones hechas, la simulación numérica da resultados consistentes y apegados razonablemente a los valores de diseño. Al mismo tiempo permite tener una idea clara de la operación del sistema. Sin embargo se hace necesario un estudio paramétrico mas detallado que permitirá sugerir modos de operación para maximizar eficiencias y operar la planta dentro de los límites críticos.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la asistencia recibida de Victor M. Cruz por la elaboración de los gráficos. Expresamos nuestro especial reconocimiento a los Ingenieros Eduardo Machuca, Rogelio Velazco y Arturo Whaley de CIEDAC y ENTEC por la información facilitada sobre el Proyecto de Puerto Lobos.

REFERENCIAS

1. CIEDAC, Proyecto de Desarrollo de la Comunidad Pesquera de Puerto Lobos, Programa Nacional de Solidaridad, México D.F. Enero de 1992.

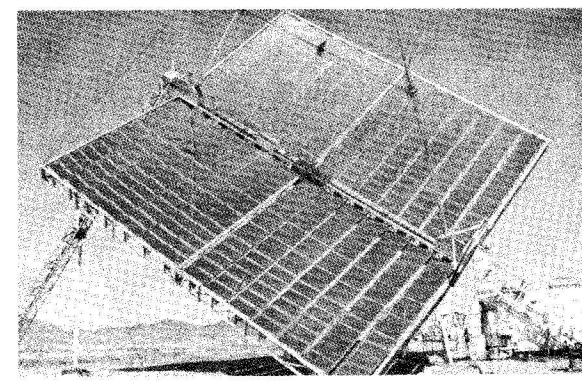
2. Duffie, J. and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process. Wiley Interscience, 1991.

3. Estrada Gasca C.A. Simulación Matemática de una Unidad Solar para Bombeo de Agua de 1 kW de Potencia. 1983 7a. Reunión Nacional de Energía Solar, Saltillo, Coahuila, México.

SOLARTRONIC
MORELOS SUR 1301-E, CUERNAVACA, MOR.
TEL. (73) 18-97-14 TEL./FAX (73) 18-45-06

Ingeniería, Investigación Tecnológica y Venta de Equipos para:

- EVALUACION DEL RECURSO SOLAR
- ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
- PLANTAS TERMOSOLARES
- CLIMATIZACION NATURAL
- ENERGIA EOLICA



"EN LA ERA DE LA ENERGIA SOLAR... SOLARTRONIC ESTA CON USTED"

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EFECTIVA DEL SILICIO POROSO

Por: J. A. del Río, J. Tagüeña *
J.A. Ochoa **

RESUMEN

Desde el punto de vista teórico, los fenómenos de transporte lineales están bien entendidos. Sin embargo, los fenómenos de transporte en materiales porosos son, con mucho, más complicados. En esta investigación se logró obtener una expresión analítica para la conductividad eléctrica efectiva en la dirección axial, tomando un modelo que simula un silicio poroso (PS). Se utilizó el método de promedio volumétrico, el cual ha probado ser adecuado para tratamientos de transporte de fluidos en medios porosos. El modelo para el PS se basa en la información experimental que se conoce acerca de la estructura de este nuevo material y en datos experimentales de Si cristalino y de láminas delgadas de a-Si hidrogenado. Con este método se puede calcular la contribución volumétrica y la contribución superficial para una conductividad efectiva. Se encontró que para ciertos parámetros la conductividad eléctrica efectiva se incrementa a un valor máximo cuando la porosidad es óptima, a partir de la cual su valor decrece a cero. El comportamiento de la conductividad eléctrica efectiva tiene con seguridad importantes consecuencias para las posibles aplicaciones del PS a la optoelectrónica y a las celdas solares.

INTRODUCCION

La búsqueda de nuevos materiales ha sido una de las fuerzas impulsoras de la Ciencia en Materiales y de la Física de Estado Sólido. Entre éstos destacan los materiales a base de silicio, particularmente por su uso en la microelectrónica y en las aplicaciones fotovoltaicas, donde la conductividad eléctrica efectiva es una propiedad necesaria, sin la cual no se podría pisar terreno firme en el avance del desarrollo de los dispositivos. Originalmente se utilizó el silicio cristalino debidamente envenenado. Sin embargo en la década de 1950 a 1960 el silicon amorfo hidrogenado (a-Si:H) tomó un papel relevante, ya que es un material más barato y que puede ser depositado en áreas grandes; el hidrógeno satura a las ligaduras libres debidas a la amorficidad, limpiando la brecha y permitiendo así su envenenamiento. Ante el reto de estudiar redes no periódicas, se desarrolló tanto investigación teórica como experimental sobre este nuevo material [1].

En la actualidad nos encontramos frente a otro material producido a partir del silicio. Ahora el reto es su porosidad y el entendimiento de sus propiedades luminiscentes[2]. El silicio poroso (PS) es producido a partir de su contraparte cristalina por medio de una disolución parcial electroquímica[3] en ácido fluorhídrico (HF). Por otro lado se sabe, que las estructuras de baja dimensión producen "efectos cuánticos", que aparecen en dimensiones más pequeñas que 10 nm en donde los electrones pueden estar confinados en algunas estructuras. Este puede ser el caso de PS, del cual se sabe a través de microscopía electrónica de alta resolución[4] que aparece una microestructura parecida al coral (ver fig. 1).

Las ramas del PS y el tamaño de sus poros pueden controlarse al cambiar la

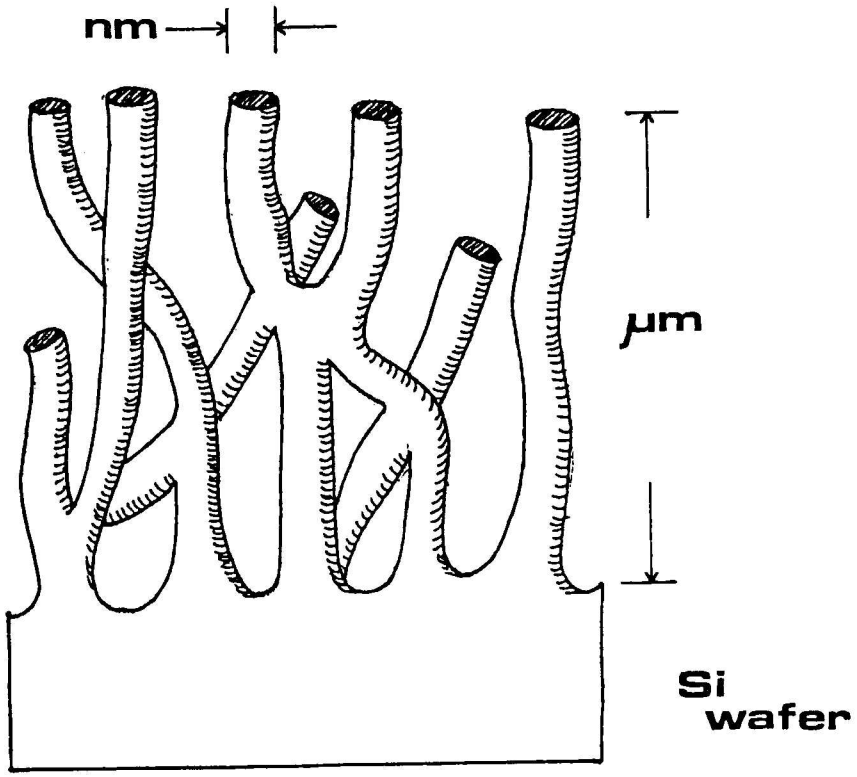


Fig. 1. Microestructura del Silicio Poroso.

** Laboratorio de Energía Solar, IIM-UNAM
** Departamento de Ingeniería Química, ITC

disolución electroquímica, obteniendo así cilindros con diámetro de nanómetros. También se sabe que la superficie del PS se satura con hidrógeno[5], mientras que por resultados con rayos X se concluye que su núcleo es cristalino. Se puede decir que el PS se forma por dos componentes: silicio (hidrogenado en la superficie) y aire, con cada uno formando una red interconectada cuyo valor crítico de rompimiento puede ser muy alto.

Las propiedades de luminiscencia multicolor del PS son muy diferentes de las del silicio cristalino (c-Si), que es muy poco eficiente para emitir luz y lo hace cerca del infrarrojo. De tal forma que el PS representa una gran promesa para las aplicaciones optoelectrónicas. Desde el punto de vista teórico, se calculó recientemente[6] que el PS presenta una brecha directa, contrariamente a la indirecta del c-Si. De hecho, se ha observado experimentalmente la importancia de los enlaces Si-H[7] en la superficie del PS. En este estudio el PS esta modelado por cilindros o alambres saturados con hidrógeno.

Por otro lado, los materiales porosos son muy difíciles de caracterizar, tanto en su microgeometría como en sus propiedades de transporte. El PS por ejemplo, es mecánicamente muy frágil, químicamente muy reactivo y tiene baja conductividad de calor. Es también altamente degradable por oxidación. Se necesitan todavía muchos experimentos con este material para aclarar su propiedades y existen también muchas preguntas sin respuesta desde el punto de vista teórico.

La teoría de Estado Sólido ha sido exitosa al lidiar con propiedades atómicas. Sin embargo, los materiales reales son muy heterogéneos, policristalinos, amorfos, compuestos y porosos y sus propiedades están determinadas por el comportamiento colectivo de su microestructura. Aunque existe una escala intermedia entre el mundo microscópico (en el cual se estudia tradicionalmente los trabajos de Estado Sólido) y el mundo macroscópico clásico, esta escala mesoscópica ha sido generalmente olvidada[8].

En este estudio se considerará el problema de la conductividad eléctrica efectiva en un modelo de PS que se abordará precisamente desde una perspectiva mesoscópica. Por un lado, la elección del modelo incorpora información microscópica; pero por el otro lado, el problema es resuelto desde un punto de vista clásico con una ecuación efectiva. En la siguiente sección se describirá el método y el modelo, seguidos de los resultados y conclusiones.

METODO Y MODELO

El transporte en materiales heterogéneos es local y varía de punto a punto. Sin embargo bajo ciertas circunstancias, en nuestra escala, esto pareciera no ser así. Entonces, se justifica desarrollar una descripción similar a la de materiales homogéneos. Esta perspectiva simplifica enormemente la complejidad matemática del problema junto con su interpretación física.

El método de promedio volumétrico (VAM) ha resultado exitoso en describir el transporte de masa y energía en un medio poroso dentro del enfoque descrito. En él se promedian ecuaciones de transporte puntuales sobre un volumen cuyo radio es mucho mayor que la longitud característica de la microestructura, pero mucho más pequeño que la escala macroscópica donde el medio poroso parece homogéneo. Esto es un promedio en la escala mesoscópica. A partir de él se obtienen las ecuaciones efectivas con los coeficientes de transporte adecuados. El VAM involucra la información atómica de la siguiente manera. Las ecuaciones de transporte locales son transformadas en ecuaciones promedio con parámetros efectivos, éstos últimos incluyen las propiedades fisicoquímicas de los componentes y de la geometría específica de la microestructura. Así, datos experimentales de las propiedades físicas de los granos homogéneos deben estar disponibles, y una microestructura debe ser seleccionada.

La geometría mas simple es una periódica (ver fig. 2). En este caso, cilindros paralelos son una buena elección. Estos cilindros pueden ser caracterizados en sus propiedades de bulto usando datos experimentales del c-Si, mientras que para sus propiedades superficiales los resultados de películas delgadas de sili-

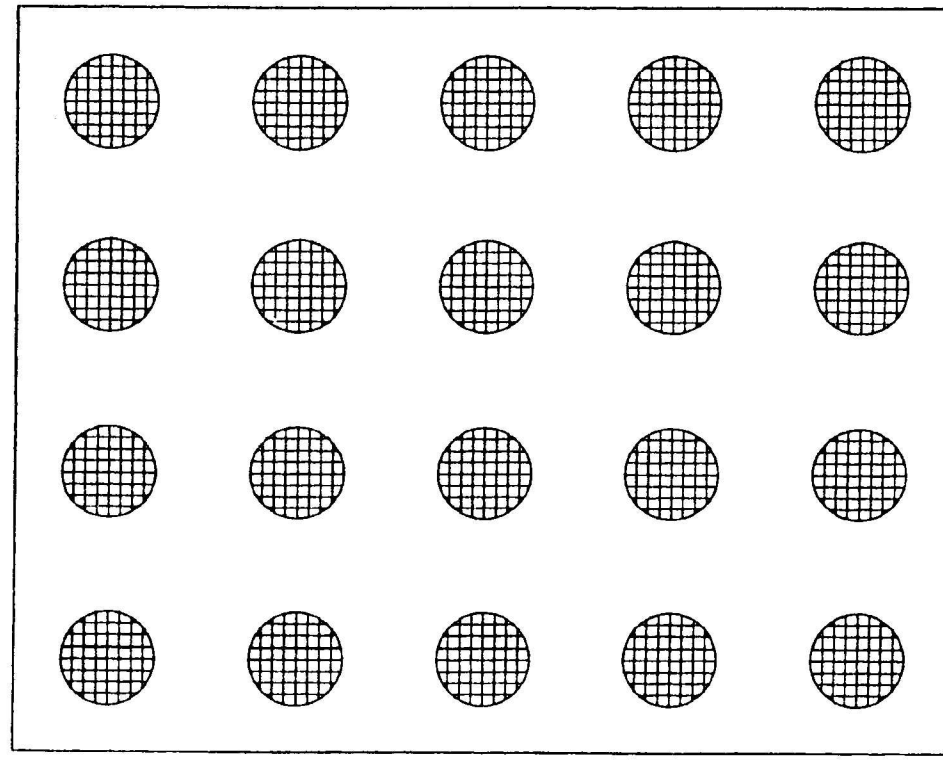


Fig. 2. Modelo para el silicio poroso: cilindros paralelos en un arreglo periódico.

cio amorfo hidrogenado (a-Si:H) son los apropiados. Recuérdese que para el PS las dos componentes son silicio y aire y en contraste con los estudios de transporte de fluidos en medios porosos, aquí el transporte es a través del sólido mientras que el fluido es un aislante.

Para el transporte electrónico las ecuaciones son:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla_s \cdot (\mathbb{P} \cdot \mathbf{J}) = \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}^{cv} \quad \text{en } A^{cv} \qquad (2)$$

sobre la superficie interfacial, A^{cv}, el operador superficial está dado por

$$\mathbf{V}_s = \mathbb{P} \cdot \mathbf{V} = \{\mathbb{I} - \mathbf{n}^{cv}\mathbf{n}^{vc}\} \cdot \mathbf{V} \qquad (3)$$

con $\mathbb{I}$ el tensor unitario y $\mathbf{V}$ cualquier operador tridimensional. En este modelo, ρ_c es la concentración de portadores de carga en el silicio cristalino, $\mathbf{J}$ es la corriente eléctrica, ρ_a y $\mathbf{v}_a$ son la densidad y $\mathbf{n}^{cv}$ velocidad de portadores de carga para el a-Si:H respectivamente, y n^{cv} es el vector normal a la interface cilíndrica Si-aire. En principio debería haber un término para la densidad de portadores de carga en el aire, pero como se ha mencionado, se está considerando como aislante.

Es razonable suponer que $\mathbf{J} = -\sigma_c \Delta\rho_c$ y $\mathbb{P} \cdot \mathbf{J} = -\sigma_a \nabla\rho_a$ donde σ_c y σ_a son las conductividades eléctricas del c-Si y del a-Si:H respectivamente. Esto lleva a

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = \sigma_c \nabla^2 \rho_c \qquad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \nabla_s \cdot (\sigma_a \nabla_s \rho_a) - \mathbf{n}^{cv} \cdot \sigma_c \nabla \rho_c \quad \text{en } A^{cv} \qquad (5)$$

Que junto con condiciones iniciales y de frontera llevarán a un problema bien definido de valores a la frontera.

Estas condiciones son muy difíciles de conocer a nivel microscópico en un medio poroso, aunque macroscópicamente son generalmente conocidas. Y precisamente éstas son la clase de problemas que requieren de la técnica VAM.

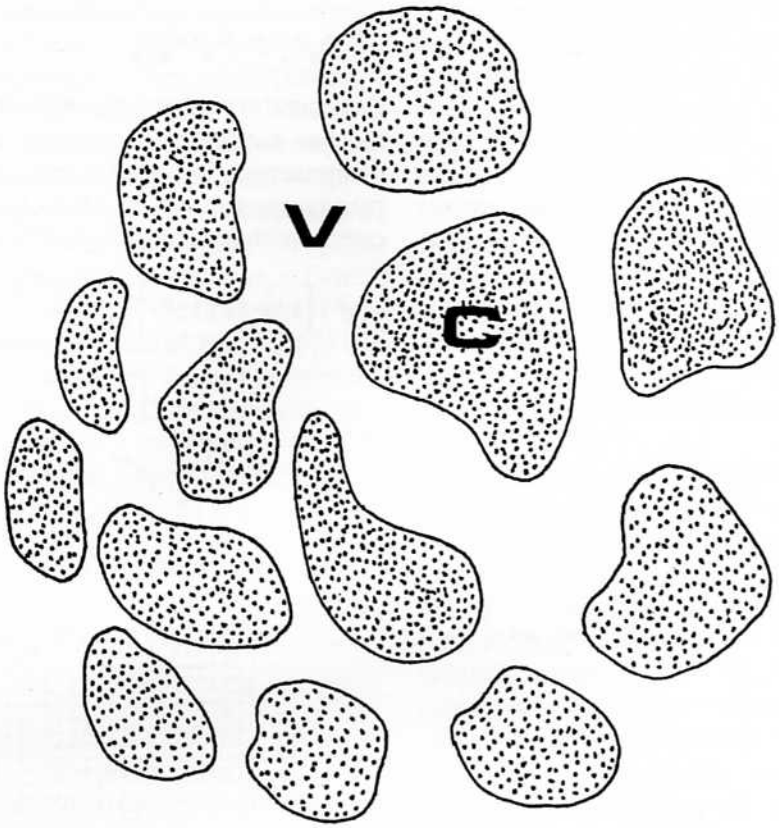


Fig. 3. Sistema de dos componentes: V indica el vacío y C se refiere al medio cristalino, aire y Si en este caso.

Se empezará por definir el problema físico. En la figura 3 se ilustra un sistema de dos componentes, v y c. Estos componentes no pueden ser vistos macroscópicamente, donde v indica el vacío y c señala el medio. Una cantidad ϑ es transportada obedeciendo un conjunto de ecuaciones con sus condiciones iniciales y de frontera.

$$\mathbb{D}^i \vartheta^i = 0 \qquad (6)$$

donde $\mathbb{D}^i$ es un operador diferencial, espaciotemporal y el superíndice se refiere que puede haber un operador diferente para cada componente. En este caso, se tienen tres ecuaciones: una para el silicio cristalino, otra para el aire en el poro y una más para el silicio hidrogenado sobre una superficie cilíndrica.

La hipótesis fundamental de la VAM es que el transporte puede ser representado en términos de variables promedio que dan paso a ecuaciones de transporte con un coeficiente efectivo[9].

El promedio se define como

$$\langle \vartheta^i \rangle^i = \frac{1}{V^i} \int_{V^i} \vartheta^i \, dV \qquad (7)$$

donde V es el volumen promedio total dado por

$$V = V^v(\mathbf{r}, t) + V^c(\mathbf{r}, t) \qquad (8)$$

Existen diferentes caminos para obtener promedios suaves[11] y pueden contener funciones de peso con la finalidad de obtener promedios idempotentes[12]. Sin embargo, en este trabajo el cálculo sólo incluye la función escalón en el promedio, como se indica en la ec. (7).

Es claro que el volumen seleccionado deberá ser pequeño comparado con la escala macroscópica, pero relativamente grande para la microestructura, y como, consecuencia el promedio será dependiente del espacio. El punto de partida es promediar la Ec. (6) y obtener la ecuación macroscópica para la cantidad prome-

dio, entonces se tiene

$$\langle \mathbb{D}^i \vartheta^i \rangle^i = \frac{1}{V^i} \int_{V^i} (\mathbb{D}^i \vartheta^i)\, dV = 0 \qquad (9)$$

Esta expresión depende explícitamente de la forma del operador $\mathbb{D}$. Sin embargo, en este trabajo el operador es lineal y puede ser descrito en términos derivadas espaciales y temporales parciales. Así es suficiente expresar el promedio en términos de estos últimos operadores[11].

$$\left\langle \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \vartheta \rangle \qquad (10)$$

$$\langle \nabla \vartheta^i \rangle^i = \nabla \langle \vartheta^i \rangle^i + \frac{1}{V^i} \int_{A^{ij}} n^{ij} \vartheta^i \, dA \qquad (11)$$

$$\langle \nabla \cdot \vartheta^i \rangle^i = \nabla \cdot \langle \vartheta^i \rangle^i + \frac{1}{V^i} \int_{A^{ij}} n^{ij} \cdot \vartheta^i \, dA \qquad (12)$$

donde n^{ij} es el vector unitario normal a la interface entre el componente i y el componente j. Las ecs. (11) y (12) son formas equivalentes del teorema del promedio volumétrico.

Un paso importante, y la contribución principal de este estudio, es incluir el transporte electrónico en la superficie, por lo tanto se necesita definir el promedio sobre la superficie como

$$\langle \vartheta_s \rangle_s = A^{-1} \int_{A^{ij}} \vartheta_s \, dA \qquad (13)$$

Al usar esta definición el teorema para el promedio superficial para una escalar está dada por[13,14]

$$\langle \nabla_s \vartheta_s \rangle_s = \nabla_s \langle \vartheta_s \rangle_s + V^{-1} \int_{A^{ij}} \vartheta_s \, dA + \frac{2}{A^{ij}} \int_{A^{ij}} H n^{ij} \vartheta_s \, dA \qquad (14)$$

donde H es la curvatura de la superficie. Para el caso de un vector tangente en cada punto de la superficie, el teorema del promedio superficial lleva a[13,14].

$$\langle \nabla_s a_s \rangle_s = \nabla_s \langle a_s \rangle_s \qquad (15)$$

En general el volumen promedio incluye muchas partículas o poros de ambos componentes. Usando las ecs. (10-15) para promediar las ecs. (4) y (5) y después combinar los resultados[14], lleva a

$$(1-P)\left(1 + a_v K/(1-P)\right) \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_c \rangle^c = \nabla \cdot (1-P)\sigma_a \left(\nabla \langle \rho_c \rangle^c + (V_c)^{-1} \int_{A^{ij}} n^{cv} \cdot \tilde{\rho}_c \, dA \right) + \nabla_s \cdot \left[a_v K \sigma_a \left(\nabla_s \langle \rho_c \rangle^c + 2 (A^{cv})^{-1} \int_{A^{ij}} H n^{cv} \tilde{\rho}_c \, dA \right) \right] \qquad (16)$$

donde P es la porosidad (razón del hueco al volumen total V), a_v es el área superficial de la interface por unidad de volumen, $K = \rho_a/\rho_c$ indica la razón de densidades de portadores de carga, y $\tilde{\rho}_c$ identifica a la desviación del valor puntual ρ_c con respecto al valor promedio.

La ec. (16) no es una expresión cerrada, porque contiene cantidades promedios y cantidades puntuales ($\tilde{\rho}_c$). Para resolver este problema se propone una expansión en serie de Taylor para la desviación. Guardando solamente el primer término, se obtiene una ecuación constitutiva

$$\tilde{\rho}_c = \mathbf{f} \cdot \nabla \langle \rho_c \rangle^c \qquad (17)$$

donde el vector **f** depende de los parámetros σ_c, σ_a, K y de la estructura propuesta para el PS. Detalles sobre el problema de cerradura pueden ser encontrados en Crapiste et al [15]. Este vector puede ser evaluado desde un problema bien definido de valores a la frontera[14], pero como se verá en este caso, esto no es necesario. Al sustituir ec. (17) en ec. (16) conduce a

$$(1-P)\left(1 + a_v K/(1-P)\right) \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_c \rangle^c = \nabla \cdot \left(\Sigma \cdot \nabla \langle \rho_c \rangle^c \right) \qquad (18)$$

donde Σ es el tensor de conductividad efectiva dado por

$$\Sigma = (1-P)\sigma \left(\mathbb{I} + V^{-1} \int_{A^{cv}} n^{cv} \Omega \mathbf{f} \, dA \right) + a_v K \sigma_a \mathbb{I} \qquad (19)$$

donde $\Omega = 1 + (2HK\sigma_a/((1-P)\sigma_c)$.

El modelo para el PS, en este trabajo, consiste de una celda unitaria de estructura periódica, con un cilindro en el centro, formado de la siguiente forma: c-Si en su núcleo y una superficie hidrogenada (a-Si:H). Por lo tanto la conductividad efectiva en la dirección **k** es $\Sigma_k = \mathbf{k} \cdot \Sigma \cdot \mathbf{k}$, a saber

$$\Sigma_k = (1-P)\sigma_c + a_v K \sigma_a \qquad (20)$$

Aquí es obvio que el valor de **f** en la ec. (19) no es necesario, ya que el producto $n^{cv} \cdot \mathbf{k}$ es cero para cualquier microestructura de sección transversal constante en la dirección **k**. Además es importante notar que **f** es cero para microgeometrías sin trayectorias conductoras.

Para un modelo de PS que use partículas cilíndricas de radio r en la celda unitaria de tamaño $2l$, el área volumétrica específica esta dada por

$$r a_v = \begin{cases} 2(1-P) & P > 1-\pi/4 \\ \frac{1}{S}\left(\sqrt{2S(1-P) + \sin^2\theta} - \sin\theta \right)^2 & P < 1-\pi/4 \end{cases} \qquad (21)$$

donde S y θ son la longitud de arco $\cos^{-1}(2r/l)$ mostrados en la fig. (4), los cuales dependen de la porosidad.

En este modelo geométrico un cambio en la porosidad significa un cambio en el radio del cilindro. Es decir, se considera un volumen fijo y por lo tanto el incremento en la porosidad implica una reducción del radio del cilindro.

A partir de la ec. (20) es claro que la contribución volumétrica a la conducti-

vidad efectiva es una función monótona decreciente. Sin embargo, la contribución de la superficie puede producir un efecto muy interesante: la conductividad efectiva puede alcanzar un máximo, desde el cual el material comienza a desintegrase, hasta que la conductividad es cero a porosidad uno. De la ec. (21) una expresión analítica para el máximo puede ser obtenida.

RESULTADOS

Para calcular la conductividad efectiva como una función de la porosidad se necesita introducir algunos datos experimentales en la ec. (20). Aquí se usa para el Si cristalino[16, 17] $\sigma_c = 0.01\ (\Omega\text{-cm})^{-1}$, $\rho_c = 1.5\text{x}10^6$ electrones/cm^3. Para el a-Si:H dos conjuntos de datos son empleados, ya que los resultados para los materiales amorfos son muy dependientes de los procesos de fabricación: un "pobre conductor" (muestra 1) con $\sigma_s = 1\text{x}10^{-10}\ (\Omega\text{-cm})^{-1}$, $\rho_s = 10^{13}$ electrones/cm^2 y el otro "buen conductor" (muestra 2) con $\sigma_s = 9\text{x}10^{-9}\ (\Omega\text{-cm})^{-1}$, $\rho_s = 10^{15}$ electrones/cm^2. Se definió la calidad de la muestra de acuerdo a su conductividad[18]. Los datos de la microgeometría son $l = 10^{-8}$ m y r = $(2\text{x}10^{-9}, 10^{-8})$ m.

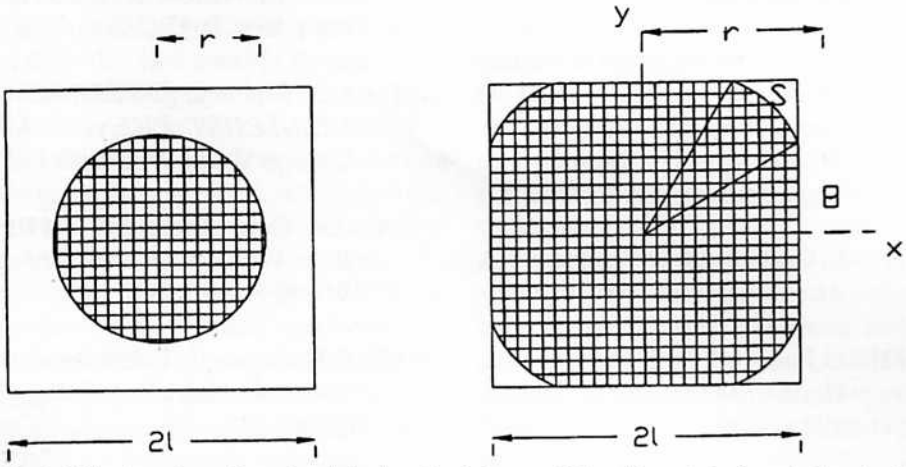


Fig. 4. Cilindros de radio r donde la longitud de arco S ha sido señalada, y la longitud de la celda es 2l.

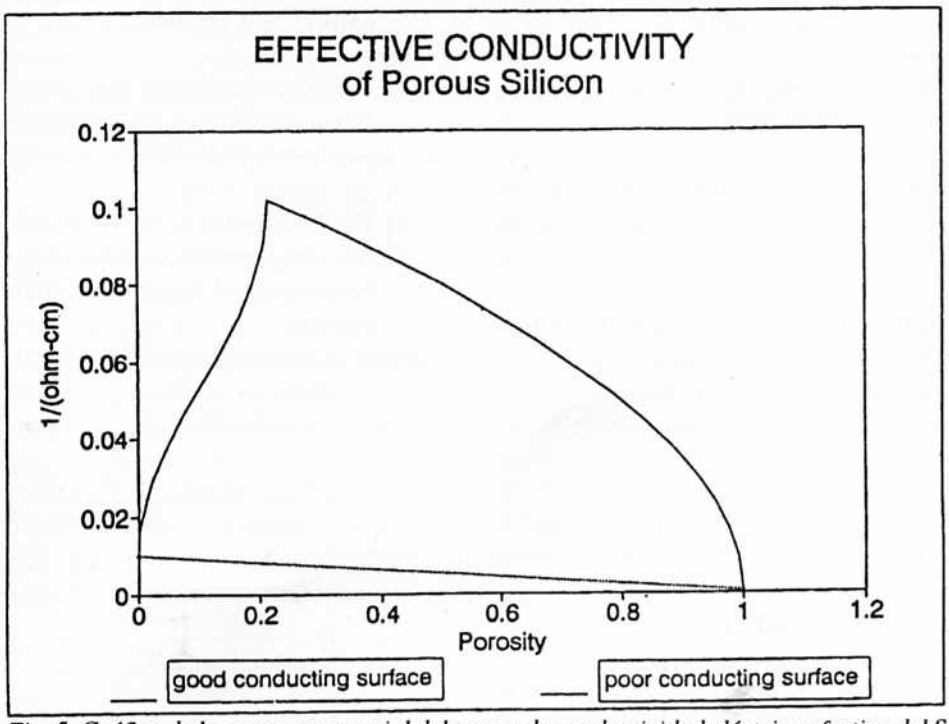


Fig. 5. Gráfica de la componente axial del tensor de conductividad eléctrica efectiva del Si poroso para dos valores de parámetros diferentes.

En la figura 5 se muestran los resultados para ambas muestras. En el ejemplo 1 la contribución superficial es totalmente despreciable y la contribución volumétrica es la única relevante, la cual es por supuesto una función monótona decreciente, que va desde el valor de la conductividad del Si cristalino cuando la porosidad es cero, hasta alcanzar el valor 0 cuando la porosidad es 1. Este resultado es el esperado cuando un material es llenado de agujeros y la superficie no conduce.

En el ejemplo 2, que tiene las características de un buen conductor en la superficie (principalmente gracias a una mejor saturación de hidrógeno en las ligaduras libres), el resultado es muy interesante. La contribución superficial se suma a la volumétrica hasta que se alcanza un máximo, aproximadamente a una porosidad de $1-\pi/4$ (precisamente la porosidad de percolación en el plano transversal a la dirección axial). Desde este punto en adelante la inclusión de más agujeros comienza a destruir al material.

CONCLUSIONES

Dado que el método empleado permite estudiar independientemente las contribuciones volumétrica y superficial a la conductividad efectiva, se puede entender por qué ésta alcanza un máximo cuando la conducción superficial es significativa. Después de alcanzar el valor máximo la conductividad decrece hasta llegar a cero a porosidad uno. Físicamente, cuando la porosidad se incrementa, los radios de los cilíndros decrecen gradualmente hasta desaparecer. El decaimiento suave de la curva es una característica de los métodos de campo medio, los cuales no describen los puntos críticos correctamente.

Es importante establecer los límites de este enfoque. Como cualquier método de integración espacial, los resultados aquí presentados pertenecen a aproximaciones de campo medio, esto es, solamente describen comportamientos globales. Pero cualquier método que pre-

tenda refinar los detalles debe incluir en aproximación cero estos resultados. Dentro de VAM se podría ir un poco más lejos al incluir más términos en las serie de Taylor de las desviaciones microscópicas. Otra mejora podría ser considerar una geometría mas compleja, tridimensional, donde los brazos de PS podrían torcerse y conectarse al mismo tiempo que considerar desviaciones de la estructura de cilíndros. Por supuesto, resta por calcular la componente **i** y **j** (que es la misma dado el modelo, pero para ello se requiere resolver numéricamente el problema de cerradura, ya que la aproximación de Chang [14], que da un resultado analítico, en la celda unitaria no es adecuada para el estudio de la percolación; esta aproximación considera un cilindro dentro de otro cilindro.

Para los parámetros de bulto, se usaron un conjunto de parámetros del silicio cristalino, que son fácilmente reproducibles. Para el caso de película delgada de silicio amorfo, los valores dependen fuertemente del método de preparación. Esta es la razón de por qué se escogieron dos conjuntos diferentes de valores para la conductividad. Ciertamente se puede argumentar que nuestro resultado depende de los parámetros empleados y no hay una comprobación experimental de que estos sean los datos reales de PS.

Análogamente al caso amorfo, el PS conduce mejor si su superficie está bien saturada con hidrógeno. Realmente, la contribución superficial podría no existir si no existe una buena hidrogenación, lo que es remoto ya que el ataque químico es con HF. Aquí se han ignorado los efectos del envenenamiento, que por supuesto, podrían incrementar la conductividad.

Hasta el momento no existen resultados experimentales contundentes para la conductividad eléctrica efectiva del PS, ya que existen grandes dificultades experimentales. Sin embargo, si el modelo resultara adecuado para describir al PS, esta primera aproximación proporciona una interesante perspectiva para aplicaciones fotovoltaicas, porque la conductividad efectiva del PS podría ser unas diez veces mayor que la del silicio cristalino.

REFERENCIAS

[1] Proc. On International Workshop on Amorphous Silicon and Its Application to Solar Cells, Ed. W. Pickin, E. Sansores, J. Tagüeña, Kinam 4-C (1982).

[2] L. Canham, Phys. World (1991), 41.

[3] G.Bomchil, A.Halimaoui, R. Herino, Microelectron Eng. 8 293 (1988).

[4] S.F. Chuang, S.D. Collons & R.L. Smith, Appl.Phys. Lett. 55, (1991) 1540.

[5] C. Tsai, Appl. Phys. Lett. 59 (1991) 2814.

[6] F. Buda, J. Kohanoff & M. Parrinello, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 1272.

[7] M.A. Tschler, R.T. Collins, J.H. Stathis & J.C. Tsang, Appl. Phys. Lett 60 (1992) 639.

[8] S.T. Pantelides, Physics Today 45 (1992) 67.

[9] S. Whitaker, Transport in Porous Media 1, (1986) 3.

[10] M. Quintard & S. Whitaker, Adv. Heat Tranfer (to be publised).

[11] F.A. Howes & S. Whitaker, Chem Engng. Sci. 40, (1985) 1387.

[12] W.L. Mochán & R.G. Barrera, Phys. Rev. B 32 (1985) 4984.

[13] J.C. Slattery, *INTERFACIAL TRANSPORT PHENOMENA*, SpringerVerlag, New York 1990.

[14] J.A. OchoaTapia, J.A. del Río, & S. Whitaker, Chem. Engng. Sci. 48 (1993) 2061.

[15] G.H. Crapistre, E. Rotstein & S. Whitaker, Chem Engng. Sci. 41 (1986) 227.

[16] C. Kittel *Introduction to Solid State Physics*, John Willey & sons (1968) pp. 306.

[17] A.L. Fahrenbruch & R.H. Bube, *Fundaments of Solar Cells*, Academic Press (1983) pp. 271.

[18] K. Takahashi & M. Konagai, *Amorphous Silicon Solar Cells*, North Oxford Academic (1986) pp. 118.

PROBLEMAS DE CONVECCION DOBLEMENTE DIFUSIVA EN ESTANQUES SOLARES

Por: Francisco Avila y
Jorge Rojas *

En lo que aquí se presenta se hablará sobre sistemas convectivos en los que intervienen dos fluidos, inicialmente homogéneos, que en virtud de sus diferentes densidades se encuentran estratificados. La convección de masa, energía y momentum se origina debido a un flujo de calor a través de una de las paredes del recipiente que los contiene. El calor se transmite de la pared caliente del recipiente al fluido en contacto con ella primeramente por conducción a través de una delgada capa de fluido llamada capa límite térmica, cuyo espesor δ_T, depende de las características geométricas de la pared conductora, de las propiedades físicas del fluido y del tiempo al cual se quiera evaluar. La masa de líquido localizada en la capa límite térmica y aquella en la vecindad de ésta, aumentan su temperatura estableciéndose con ello un fuerte gradiente de temperatura en dirección del interior del recipiente en donde el líquido aún se mantiene a la temperatura que tenía al iniciarse el calentamiento. Así, el fluido cercano a la pared caliente comienza a desplazarse verticalmente hacia arriba, ya que su densidad disminuye al aumentar su temperatura. Se observa que, al cabo de cierto tiempo, se establece un patrón de flujo que presenta formaciones que semejan lenguas o celdas que se desplazan hacia la pared que se considera como pared fría (generalmente enfrente de la pared caliente). A éstas se les llama celdas convectivas de penetración y transportan consigo calor, masa y momentum. El conocimiento del patrón de flujo que ellas presentan, nos permite saber de que manera tales propiedades se transportan, por ejemplo: nos indicaría la evolución del frente salino cuando el fluido más denso fuera una solución de sal en agua y el fluido menos denso fuera agua pura.

El caso del ejemplo dado, es en muchos aspectos semejante a la situación que se presenta en los Estanques Solares utilizados para el aprovechamiento de la Energía Solar. En un estanque solar se tiene tres capas de fluido de diferente densidad: la inferior y más densa constituida por una salmuera cuya concentración y temperatura se mantienen aproximadamente constantes y cuyo espesor mide entre 0.3 y 0.6 m; la intermedia constituida por una salmuera cuya densidad y temperatura varian con respecto a la vertical, incrementándose ambas con la profundidad, y cuyo espesor mide entre 0.5 m y 1.2 m; y una capa superior expuesta a la intemperie constituida por agua pura y cuyo espesor mide entre 0.1 y 0.2 m. La zona superior del estanque recibe radiación solar, absorbiendo parte de ella y transmitiendo la mayor cantidad a las zonas inferiores. La zona intermedia actúa como un aislante transparente y permite el desarrollo de altas temperaturas en la zona inferior, es en ésta última, en donde se almacena la energía que ha llegado hasta ella para su posterior aprovechamiento.

En las capas inferior y superior en donde el fluido es homogéneo existen desplazamientos convectivos que se mantienen dentro de sus propios límites, mientras que en la capa intermedia de fluido, el efecto estabilizador producido por el gradiente de concentración que ahí se tiene, se opone al efecto inestabilizador que produciría un gradiente de temperatura horizontalmente aplicado hacia el interior del fluido debido al calentamiento de las paredes (éstas generalmente inclinadas) por la radiación solar. Al fenómeno que se tiene cuando existen dos propiedades difusivas, en este caso concentración salina y calor, se le llama de doble difusión. Sistemas doblemente difusivos se presentan también en otras ciencias tales como la oceanografía, la astrofísica, la cristalografía, etc. [1].

En un estanque solar se procura minimizar la migración de soluto hacia la superficie libre y es por eso que un análisis de los diversos sucesos que ocurren en sus componentes puede llegar o ser de gran relevancia en su diseño (únicamente por difusión emigra hacia la superficie, en un estanque de 1 km^2 hasta 20 toneladas anuales de sal al año [2]).

Por otra parte, se conoce el hecho [3,4] que un gradiente de concentraciones inicialmente lineal puede, bajo ciertas circunstancias, producir celdas convectivas y dar origen a múltiples estratos, cada uno de ellos aproximadamente homogéneo y de diferente concentración que los demás.

Este sería también el caso que se tendría si se analizara la interfaz formada entre dos cualesquiera de las zonas de un estanque solar, por ejemplo; si se analizara dos delgadas capas de fluido a uno y otro lado de la interfaz formada entre la región superior y la región intermedia.

El afán de conocer en sus principios básicos como evolucionen las celdas convectivas y su participación en los efectos llevadas a cabo en las interfaces y aplicar los conocimientos adquiridos para un mejor funcionamiento de los estanques solares ha motivado toda una serie de estudios tanto numéricos como experimentales relacionados con la convección natural en fluidos homogéneos y en pares de fluidos homogéneos estratificados. Tales estudios se han llevado a cabo para diferentes condiciones iniciales y de frontera.

* Laboratorio de Energía Solar del IIM-UNAM
Zona Cultural Xochicalco S/N, A.P. 34
62 580, Temixco, Morelos, México

Los resultados numéricos que aquí se presentan y que deben considerarse como un estudio preliminar a futuros estudios experimentales pertenecen a un problema que tiene que ver con el efecto que produce la variación de la concentración inicial sobre el transporte de las propiedades que se conservan. Para ello se usó el código PHOENICS que resuelve numéricamente las ecuaciones que gobiernan el flujo de los fluidos bajo las condiciones iniciales y de frontera requeridas.

A continuación se discute brevemente el planteamiento del problema:

Se estudia numéricamente la evolución del fenómeno convectivo que sucede (en una cavidad bidimensional con una pared inclinada) en dos sistemas de fluidos formados cada uno de ellos por un par de líquidos de diferente densidad que en virtud de ello se encuentran inicialmente estratificados en capas de igual espesor. En ambos sistemas se tiene en la capa superior agua pura, mientras que para la capa inferior en uno de ellos se tiene salmuera de una concentración en peso del 0.3% (sistema 1) y en el otro se tiene una salmuera de una concentración en peso del 10% (sistema 2). El mecanismo que inicia el fenómeno es un flujo de calor hacia el interior de los fluidos producido por un gradiente de temperatura aplicado a través de la pared inclinada. Comparando los resultados obtenidos para cada sistema puede observarse la influencia de la salinidad en la evolución del fenómeno. Por razones de espacio se seleccionó sólo dos sistemas de pares de fluidos de entre varios de ellos. Asimismo, sólo se presenta aquí, gráficas correspondientes a las distribuciones de velocidad, temperatura y concentración para cada sistema a los 10 seg. después de iniciado el proceso, aunque la etapa transitoria sigue claramente observándose hasta los 140 seg. y más.

A un tiempo inicial, $t_o = 0$ seg., la temperatura de la pared inclinada se incrementa súbitamente de 25 a 30 °C mientras que dentro del recipiente los fluidos se encuentran en reposo y en equilibrio térmico a 25 °C. Todas las demás fronteras que limitan el recipiente se consideran adiabáticas. La figura 1 muestra las características del experimento numérico. Se acepta como válida la suposición de que no hay deslizamiento del fluido en las fronteras sólidas del recipiente. Las ecuaciones que gobiernan el flujo son aquellas correspondientes a los principios de conservación de masa, energía y momentum [5] para las cuales se ha tomado como constantes las propiedades físicas de los fluidos y se ha supuesto que ellos son incompresibles.

Resultados: Las distribuciones de velocidades, temperaturas y concentraciones a los 10 seg. de iniciado el proceso se muestran para el sistema 1 y para el sistema 2 en las figuras 2 y 3, respectiva-

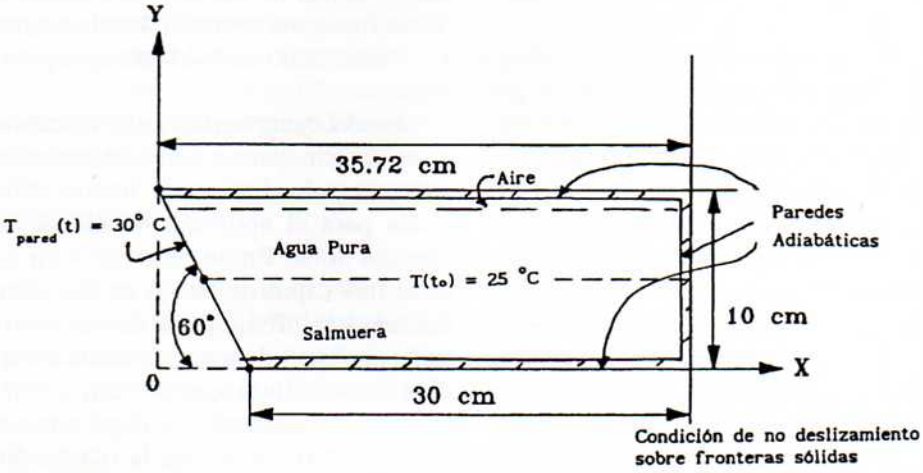


Fig. 1. Diagrama de la cavidad y condiciones

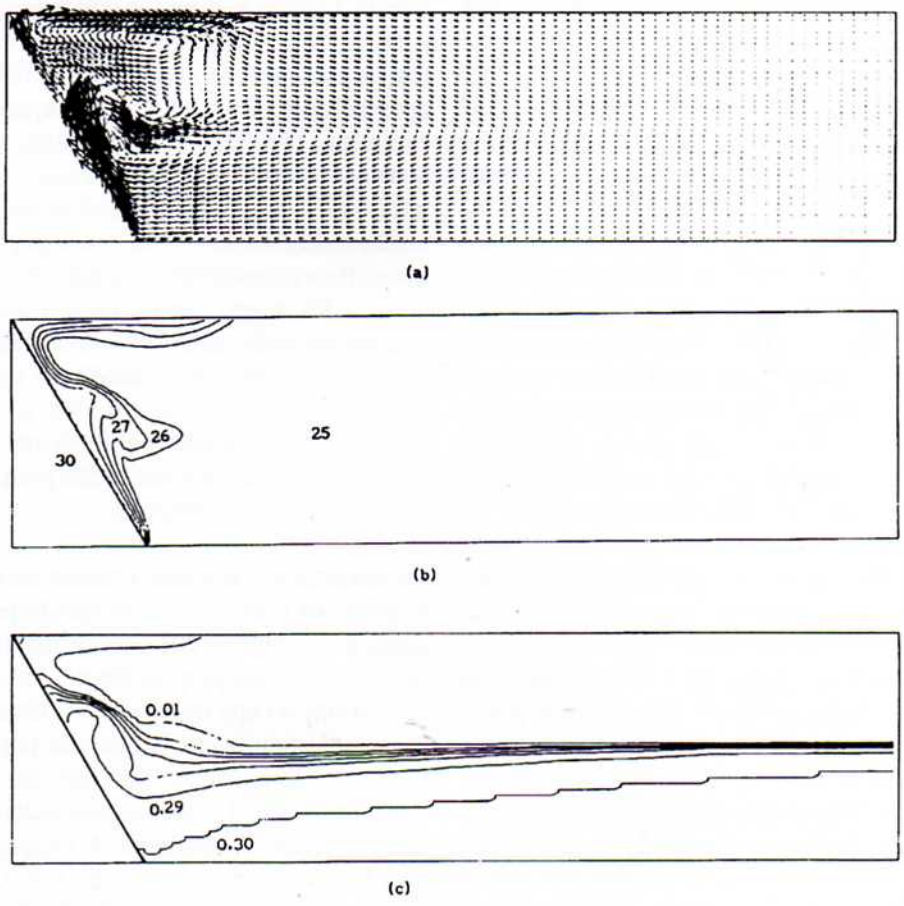


Fig. 2. Sistema 1. Par Agua-Salmuera al 0.3% en peso de concentración. Tiempo, t=10 seg. (a) Distribución de velocidades; (b) Distribución de Temperaturas; (c) Distribución de concentraciones. Nótese que las distribuciones en (b) y (c) siguen a la mostrada en (a) manifestando así la naturaleza predominantemente convectiva del flujo.

mente. En ellas puede observarse lo siguiente:

i) En el sistema 1, véase figura 2, la salmuera, inicialmente localizada por debajo del agua, muestra un gran desplazamiento vertical introduciéndose dentro de la capa superior. Esto ocasiona un avance relativamente mas rápido de la celda de penetración (y consecuentemente de las capas de intrusión térmica y salina) hacia la pared fría en la vecindad de la interfaz líquido-aire (en la capa superior) con respecto al avance de la celda de penetración que se mueve hacia la pared fría en la vecindad de la interfaz líquido-líquido (en la capa inferior).

ii) Por el contrario, para el sistema 2, véase figura 3, la introducción de salmuera hacia la capa superior es mínima. Las distribuciones de las propiedades se resuelven en un desplazamiento a lo largo de la interfaz original líquido-líquido (en la capa inferior) y la interfaz líquido-aire (en la capa superior) casi exclusivamente, produciendo celdas de penetración que se mueven rápidamente hacia la pared fría.

iii) Una comparación entre las gráficas mostradas en la figura 2 y las mostradas en figura 3 pone de manifiesto el más rápido avance de las celdas de penetración (superior e inferior) para el sistema 2. Siendo el proceso dominantemente convectivo, la temperatura también tiende a uniformizarse más rápidamente en el sistema 2 trayendo como consecuencia una disminución en las velocidades (como puede observarse para lapsos de tiempo más largos). Es interesante notar que debido a lo expuesto en ii) el frente salino en el sistema 2 se conserva bastante bien dentro de sus límites originales en comparación con el comportamiento del frente salino.

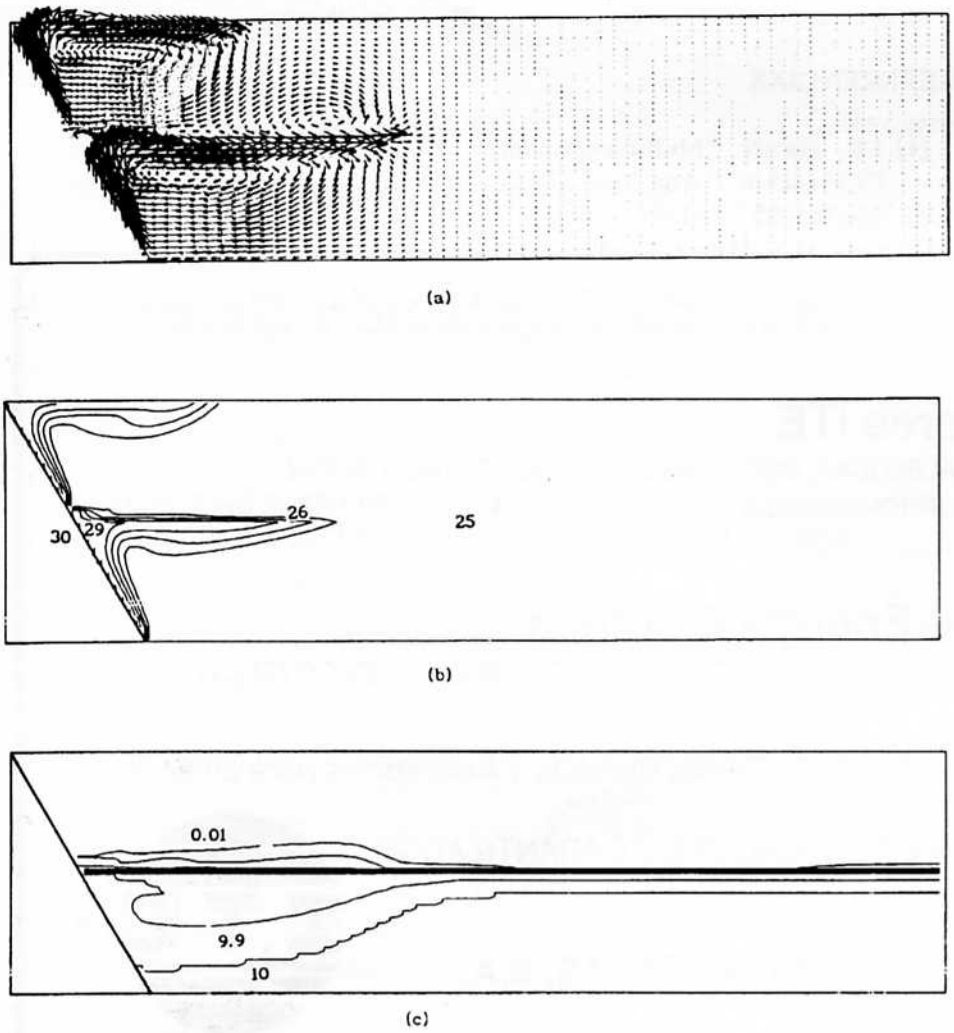


Fig. 3. Sistema 2. Par Agua-Salmuera al 10% en peso de concentración. Tiempo, t=10 seg.. (a) Distribución de concentración. (b) Distribución de Temperaturas; (c) Distribución de concentraciones. Nótese que las distribuciones en (b) y (c) siguen a la mostrada en (a) manifestando así la naturaleza predominantemente convectiva del flujo.

CONCLUSIONES

1. El sistema 1 presenta marcadas diferencias de comportamiento con respecto al sistema 2. Se observó que la evolución del fenómeno hacia el equilibrio térmico (y consecuentemente, a una disminución de los fenómenos convectivos) se efectúa más rápidamente en sistemas de fluidos con concentraciones más altas en comparación con el comportamiento en los sistemas de fluidos con concentraciones más bajas.

2. Para el sistema 1 se observó una drástica penetración vertical de salmuera dentro del espacio destinado inicialmente para el agua, fenómeno que no sucede para el sistema 2 de mayor salinidad. El defecto de momentum, energía y masa en la dirección horizontal en la capa inferior (que implica una ganancia de estas propiedades en la dirección vertical, en la capa superior) explica porqué en el sistema 1 se observa un desplazamiento más rápido de los perfiles de velocidad, temperatura y concentración para la capa superior con respecto a esos mismos perfiles correspondientes a la capa inferior (lo contrario ocurre para el sistema 2, en donde no existe tal defecto de momentum, energía y masa a lo largo de la dirección horizontal en la capa inferior). También explica porqué el sistema 2 tiende al estado estacionario más rápidamente que el sistema 1.

3. El fenómeno descrito como una penetración vertical de la salmuera en el agua, aparentemente tiene su origen en dos características (entre ellas relacionadas) que poseen los fluidos de trabajo utilizados: a).- El carácter "difuso" de la interfaz que los separa (difuso en el sentido que, además de ser esta interfaz una frontera que permite la difusión propiamente dicha de las propiedades de transporte, es una frontera no bien definida por tratarse de dos fluidos miscibles entre ellos y no existir fuerzas de tensión superficial que ayuden a formar un flujo en dos fases); y b).- La "afinidad" entre los fluidos de trabajo (afinidad en el sentido que entre más diluida sea una solución sus propiedades se acercan más y más a aquellas del solvente puro. En un caso límite, se tendría en toda la cavidad únicamente agua (o únicamente una solución salina homogénea). Esto traería como consecuencia que el desplazamiento a lo largo de la pared caliente, fuera principalmente en la dirección vertical hasta llegar a la interfaz líquido-aire en donde dicho desplazamiento tendría que cambiar su dirección y dirigirse hacia la pared fría).

4. Los puntos arriba considerados podrían tener aplicaciones prácticas en el diseño de estanques solares en donde la migración de soluto hacia la superficie es indeseable. Tal migración podría darse en la capa intermedia de un estanque solar en donde el gradiente de concentración con respecto a la vertical puede dar origen, por efectos de doble difusión, a un sistema de celdas escalonadas cada una de ellas formada por una diferente solución de concentración aproximadamente constante.

REFERENCIAS

[1] J.S. Turner. "Multicomponent Convection". Ann.Rev. Fluid Mech.1985.17:11-44

[2] H. Tabor Solar Ponds (Non-Convective) The Scientific Research Foundation Hebrew University Campus, Jerusalem, Israel POB 37450

[3] A. Akbarzadeh y P.C. Manins. "Convective Layers Generated by Side Walls in Solar Ponds Observations". Solar Energy 41(6) p. 521,1988.

[4] S. Geoffrey Schladow, Ellen Thomas and Jeffrey R. Koseff "The dynamics of intrusions into a thermohaline stratification". J. Fluid Mech. (1992) vol. 236 pp. 125-165

[5] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot "Transport Phenomena" Ed. Wiley

Equipos y Sistemas de Captación Solar

• **Calentadores Solares ITE**

PARA AGUA DE ALBERCAS, USO DOMESTICO, INDUSTRIAL Y RURAL

ABSORBEDORES SOLARES 100% DE COBRE

PRONOSTICOS DE TEMPERATURA POR COMPUTADORA

SUPERFICIE SELECTIVA DE CROMO NEGRO

• **Plantas Solares de Energía Eléctrica**

PARA ILUMINACION, BOMBEO DE AGUA Y CUALQUIER APARATO ELECTRICO

• **CUBIERTAS TERMICAS FLOTANTES, Filtros, Bombas y Accesorios para alberca.**

EQUIPOS E INSTALACIONES GARANTIZADOS

ITE

INSTALACIONES TECNICAS ESPECIALIZADAS, S.A.

Bahía de Chachalacas 42 Col. Verónica Anzures 11300, México, D.F.

Tels. 260-0573, 260-5284, 260-2799 Fax 260-2685

PHOENICS
LATINO AMERICA

Promotor, Distribuidor y Sitio de Información de
Concentration, Heat And Momentum Limited

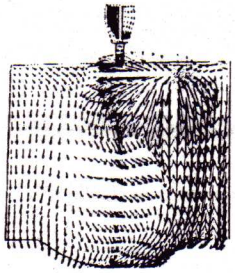
CHAM

"Líder Mundial en la Simulación de Flujo de Fluidos"

Lucerna # 12, Burgos de Cuernavaca,
62 580 Temixco, Mor., MEXICO

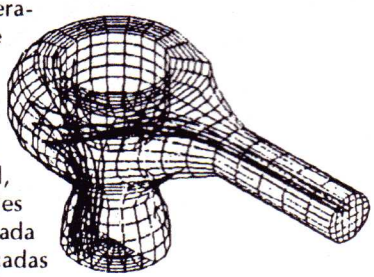
Tel/Fax: 91 (73) 18 54 83

¿Requiere Ud. de predicciones numéricas de dinámica de fluidos, transferencia de calor y/o combustión? Su fenómeno físico está definido por una, dos o tres dimensiones, en un sistema de mallas cartesianas, polares o curvilíneas, los flujos son: transientes o estacionarios, en una fase o multifásico, laminares o turbulentos, elípticos o parabólicos, compresibles o incompresibles, inertes o reactantes (contaminantes), subsónicos o supersónicos, con superficies libres, con transferencia de calor (conducción, convección y/o radiación), con transferencia de masa y reacciones químicas, etc., el código de computadora PHOENICS puede ayudarle a simular y resolver su problema.



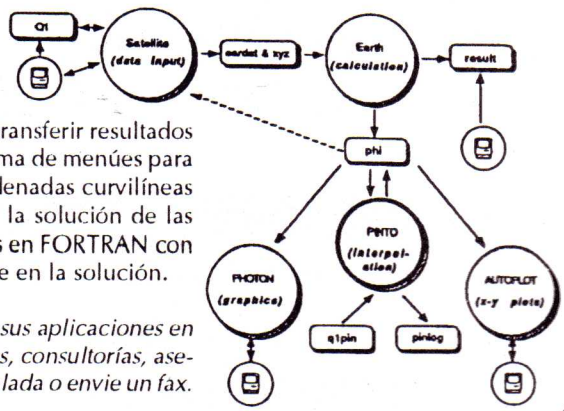
PHOENICS es un código de computadora de propósito general para la simulación de procesos de flujo de fluidos, transferencia de calor y reacciones químicas en equipos de ingeniería o en el ambiente. El significado de las siglas PHOENICS es del inglés *Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series.*

Aplicaciones típicas de PHOENICS incluyen: Reactores químicos; Separadores ciclónicos; Flujo en tuberias, válvulas y bombas; Quemadores y combustores; Equipo para procesamiento de alimentos; Intercambiadores de calor y condensadores; Torres de enfriamiento; Movimiento de aire, fuego y humo en espacios cerrados; Descarga de calor y vapor a la atmósfera; Contaminación del aire, mares, lagos y rios; Estudios de dispersión de plumas de chimeneas; Moldeado y solidificación en la industria metalúrgica; Aerodinámica de edificios, aviones y autos, etc. PHOENICS puede predecir y desplegar valores de parámetros claves, tales como; temperatura, presión, velocidad, concentración,intensidad de turbulencia, esfuerzos de corte, líneas de corriente, trayectorias de partículas, flujo de calor, humedad, cambio de fase, densidad, etc.



El código PHOENICS resuelve las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo de masa, calor, electricidad, magnetismo, etc., en cualquiera de las siguientes formas: Navier-Stokes, Euler, flujo potencial, parabólico, etc. Las ecuaciones son resueltas por el método de volúmenes finitos en el cual, el dominio de solución es subdividida en una malla de celdas acotadas por líneas contínuas o superficies alineadas en la dirección del sistema de coordenadas. Los valores de las variables dependientes en cada celda de la malla son obtenidos por integración algebráica de las ecuaciones diferenciales con adecuadas suposiciones de interpolación. Estas ecuaciones son resueltas iterativamente. El procedimiento de solución es "conservativo" y "completamente implícito". También, PHOENICS provée con tres opciones de sistemas simples de coordenas, y son: las cartesianas, las polares cilíndricas y las esféricas. Adicionalmente, PHOENICS provée con un sistema complejo de coordenadas curvilíneas o generalizadas (BFC, del inglés *Body Fitted Coordinates*), esté es un sistema de mallas no ortogonal, el cual puede ser modificado para ajustarse a fronteras físicas no regulares que varíen suavemente.

PHOENICS le puede ayudar a reducir la escala de tiempo y por lo tanto costos en la investigación de un diseño de ingeniería en desarrollo o en la óptimización de equipos, mediante la predicción numérica de los fenómenos de la dinámica de fluidos. PHOENICS puede ser utilizado por ingenieros, permitiéndoles simular flujo de fluidos reales y evaluar el comportamiento del diseño antes de incurrir en los costos de construcción, reduciendo así, la necesidad de modelos a escala y/o pruebas experimentales. Un rango muy grande de parámetros de diseño pueden ser explorados a través de simulaciones en una fracción del tiempo que tomaría construir un prototipo.



La licencia del código PHOENICS incluye tres módulos mayores que son: SATELLITE el preprocesador de datos, EARTH el resolvedor de ecuaciones, y PHOTON el postprocesador gráfico de resultados, también se incluyen otros tres módulos que son: GUIDE (ayuda en línea), AUTOPLOT que es un programa de graficación del tipo Y vs. X, y PINTO que es un programa de interpolación para transferir resultados entre mallas de diferente tamaños. La nueva versión de PHOENICS tiene un sistema de menúes para facilitar la especificación de los datos del problema, un menu para definir coordenadas curvilíneas para geometrías complejas, un sistema experto para procurar convergencia en la solución de las ecuaciones, un programa de comunicación con EARTH para poder añadir rutinas en FORTRAN con características particulares del problema y de esta forma interactuar directamente en la solución.

Si después de leer esto, Ud. requiere de mayor información acerca de PHOENICS, sus aplicaciones en áreas específicas, cursos de entrenamiento, seminarios, conferencias, publicaciones, consultorías, asesoramiento o arreglos de licenciamiento, por favor escriba a la dirección arriba señalada o envie un fax.

CURSOS SOBRE FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA

4 y 5 de Octubre 1993

ANES

Universidad de Colima

La Asociación Nacional de Energía Solar y la Universidad de Colima, tienen el agrado de invitarlo a sus cursos que impartirá en la ciudad de Colima en la Universidad, sobre los siguientes temas:

- Secado solar de productos agropecuarios
- Diseño y aplicaciones de colectores solares planos
- Bombeo de agua
- Destilación de agua

Los cursos tendrán lugar dentro de la Semana Nacional de la Energía Solar, los días 4 y 5 de octubre de 1993.

TEMARIO

CURSO: ***Secado Solar de Productos Agropecuarios***

• Objetivo
Proporcionar al alumno los elementos básicos para el diseño, construcción y operación de Secadores Solares. Poner al alcance del alumno las experiencias disponibles en Iberoamérica sobre el uso de estos sistemas.

CURSO: ***Diseño y aplicaciones de colectores solares planos***

• Objetivo
Proporcionar los conocimientos fundamentales para la selección y diseño de colectores solares planos, en base a los materiales de construcción y de las curvas de comportamiento. También se informará sobre las aplicaciones típicas y los métodos de cálculo para el diseño de sistemas.

CURSO: ***Bombeo de Agua***

• Objetivo
Informar a estudiantes de ingeniería, promotores agropecuarios, funcionarios de agencias y bancos de fomento, financiamiento y aseguradoras, de las posibilidades técnicas y viabilidad económica del bombeo de agua e irrigación, utilizando la energía eólica y fotovoltaica como energético primario.

CURSO: ***Destilación de Agua***

• Objetivos
Analizar los procesos involucrados en la destilación de agua a través de diversos tipos de destiladores solares, sus diseños, así como ventajas y desventajas que ofrecen.

DURACIÓN

Cada curso tendrá una duración de 16 horas.

COSTOS DE RECUPERACIÓN

N$ 150.00	Profesionales
N$ 75.00	Estudiantes

INFORMES

En la Cd. de México:

Fís. Adolfo Finck Pastrana
Departamento de Física, Universidad Iberoamericana
Prol. Paseo de la Reforma Nº 880, Col. Lomas de Sta. Fe
C.P. 01210 México, D.F.
Tel. (5) 570 7303

En la Cd. de Colima:

M.C. Leandro Sandoval Alvarez
Universidad de Colima, A.P. 22, C.P. 28 000, Colima, Col.
Tel. (331) 4 11 33, 2 58 18
Fax. (331) 2 75 81

En Morelos:

M.I. Minerva Gpe. Vargas Vega
Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Zacatepec
Calz. Tecnológico Nº 27, Zacatepec, Morelos
Tel. (734) 3 13 94, 3 21 11, 3 07 23
Fax. (734) 3 21 10