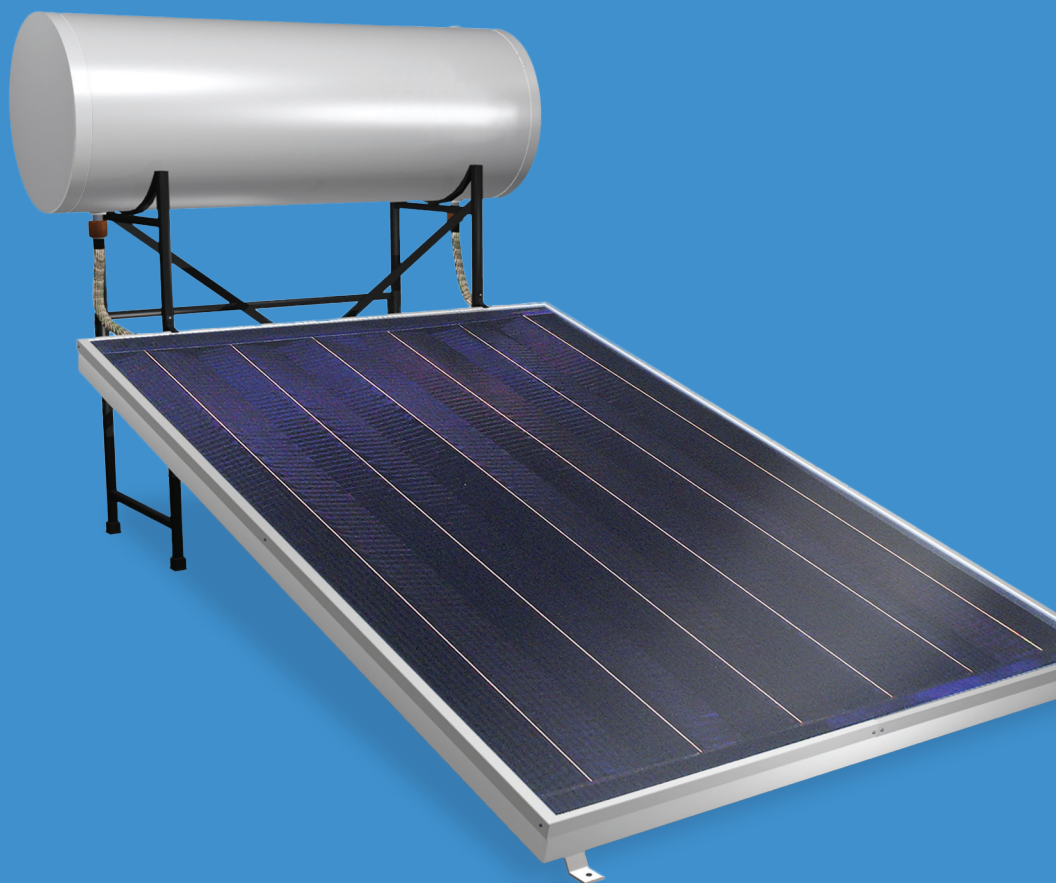


Aplicaciones térmicas de la energía solar

en los sectores residencial,
servicios e industrial



IER

Instituto de Energías
Renovables

Octavio García Valladares
e Isaac Pilatowsky Figueroa
Coordinadores

Aplicaciones térmicas de la energía solar

en los sectores residencial,
servicios e industrial

Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial / coordinadores Octavio García Valladares e Isaac Pilatowsky Figueroa. -- Primera edición. -- Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables 2017.
160 páginas : ilustraciones ; 23 cm.

Incluye bibliografías
ISBN 978-607-02-8952-0

1. Energía solar térmica -- Innovaciones tecnológicas -- México.
2. Calefacción solar -- Innovaciones tecnológicas -- México. 3. Ingeniería térmica -- México. 4. Energía solar -- Innovaciones tecnológicas -- México. 5. Derecho de acceso a la energía solar. I. García Valladares, Octavio, coordinador. II. Pilatowsky Figueroa, Isaac, coordinador. III. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Energías Renovables, editor.

621.40280972scdd21

Biblioteca Nacional de México

Instituto de Energías Renovables, UNAM

Director: Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

Secretaría Académica: Dra. Marina E. Rincón González

Secretaría de Gestión Tecnológica y Vinculación: Dra. Karla G. Cedano Villavicencio

Coordinadores: Dr. Octavio García Valladares y Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

Edición: Juan Tonda Mazón

Diseño y formación: Georgina Reyes Coria

Corrección: Edgar Gómez Marín

Portada y figuras: Georgina Reyes Coria

Imagen de portada: Módulo solar

Primera edición: 9 de abril de 2017

D.R. © 2017 Universidad Nacional Autónoma de México

Av. Universidad 3000 Ciudad Universitaria

Col. Universidad Nacional Autónoma de México

Coyoacán, 04510, Ciudad de México

Instituto de Energías Renovables

© Octavio García Valladares, Isaac Pilatowsky Figueroa, Rafael Enrique Cabanillas López, Carlos Ramos Bertúmen, Juan Rafael Ramírez Benítez, José Beltrán Adán, Adriana Elizabeth González Cabrera, Álvaro Zamudio Lara, Margarita Castillo Téllez, Carolina Aidé Menchaca Valdez, Roxana Berenice Recio Colmenares.

ISBN: 978-607-02-9005-3



Agradecemos el apoyo a Conacyt por financiar esta publicación a través de PROYECTO FORDECYT 190603, Estudio sobre el uso de la energía solar en aplicaciones residenciales, industriales y comerciales en diferentes estados del país.

Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, transmitida o almacenada de manera alguna sin el permiso previo del editor.

Impreso y hecho en México

Aplicaciones térmicas de la energía solar

en los sectores residencial,
servicios e industrial

Octavio García Valladares
e Isaac Pilatowsky Figueroa
Coordinadores



Con cariño y profundo agradecimiento
para Lydia, Priscila y Patrick
Isaac Pilatowsky Figueroa

Dedicado con mucho cariño a
Marycarmen, Kenia y Jordi
Octavio García Valladares

ÍNDICE

Directorio de autores	13
Presentación	17
1 El recurso solar	21
Dr. Rafael Enrique Cabanillas López	
1.1 Introducción	21
1.2 El Sol	22
1.3 Sistema Sol-Tierra	24
1.4 Atmósfera	26
1.5 Conceptos generales	27
1.6 Instrumentos de medición	31
1.7 Estimación teórica y base de datos del recurso solar	33
2 Principios y dispositivos conversores termosolares	39
2.1 Principios de la conversión fototérmica	39
Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa	

2.2	Dispositivos conversores termosolares de baja temperatura	47
	Dr. Octavio García Valladares	
2.3	Calentamiento solar de aire	54
	Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa	
2.4	Captador solar de canal parabólico y captador parabólico compuesto	66
	M en I. Carlos Ramos Berúmen, M en C. Juan Rafael Ramírez Benítez, M en C. José Beltrán Adán	

3 Sistemas termosolares para el sector residencial y servicios 79

3.1	Sistemas termosolares para el sector residencial y de servicios	79
	Dr. Octavio García Valladares	
3.2	Climatización de espacios	93
	Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa	
3.3	Almacenamiento térmico	98
	Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa	

4 Sistemas termosolares para el sector industrial 101

4.1	Aplicaciones en el sector agroindustrial y pecuario: sistemas acuícolas, criaderos y acondicionamiento de biodigestores	101
	Dr. Víctor Manuel García Saldívar	
	M. en C.I. Adriana Elizabeth González Cabrera	
4.2	Esterilización de instrumentos, suelos y la detoxificación de efluentes utilizando captadores solares de concentración	110
	Dr. Álvaro Zamudio Lara	
4.3	Destilación solar	117
	Dra. Margarita Castillo Téllez	

4.4	Secado solar de alimentos	126
	M. en I. Carolina Aidé Menchaca Valdez	
	M. en I. Roxana Berenice Recio Colmenares	
4.5	Refrigeración solar	134
	Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa	

5 Normalización, legislación y recomendaciones para usuarios **147**

Dr. Octavio García Valladares

5.1	Normas nacionales e internacionales para la determinación del comportamiento térmico e integridad de dispositivos conversores y sistemas	147
5.2	Legislación. Leyes internacionales y nacionales que favorecen el desarrollo de la energía solar térmica	154
5.3	Recomendaciones para el usuario que desee adquirir un sistema solar	156

DIRECTORIO DE AUTORES

Dr. Octavio García Valladares y Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor

Instituto de Energías Renovables,

Universidad Nacional Autónoma de México

ogv@ier.unam.mx, ipf@ier.unam.mx

Dr. Rafael Enrique Cabanillas López

Plataforma Solar de Hermosillo

Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia

Universidad de Sonora

rcabani@iq.uson.mx

M. en C. Carlos Ramos Berúmen

M. en C. Juan Rafael Ramírez Benítez

M. en C. José Beltrán Adán

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

cramos@iie.org.mx, rramirez@iie.org.mx, jose.beltran@iie.org.mx

Dr. Víctor Manuel García Saldívar

Unidad Académica de Ciencias Químicas

Universidad Autónoma de Zacatecas

vmgarcia@uaz.edu.mx

M. en C. I. Adriana Elizabeth González Cabrera

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas

aeglecabrera@gmail.com

Dr. Álvaro Zamudio Lara

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

azamudio@uaem.mx

Dra. Margarita Castillo Téllez

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Campeche

mcastill@uacam.mx

M. en I. Carolina Aidé Menchaca Valdez

Instituto de Energías Renovables,

Universidad Nacional Autónoma de México

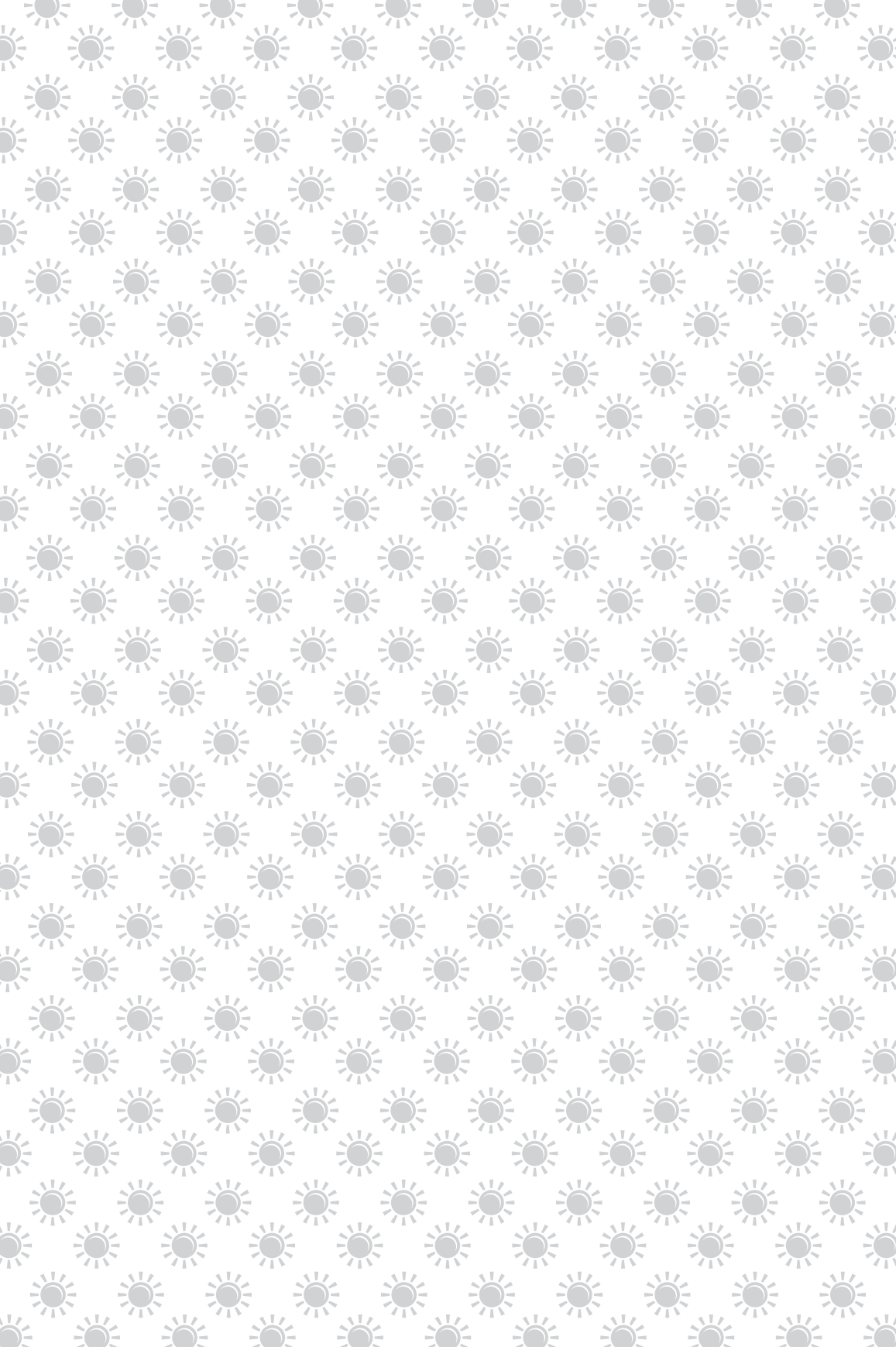
menchaca.caro@gmail.com

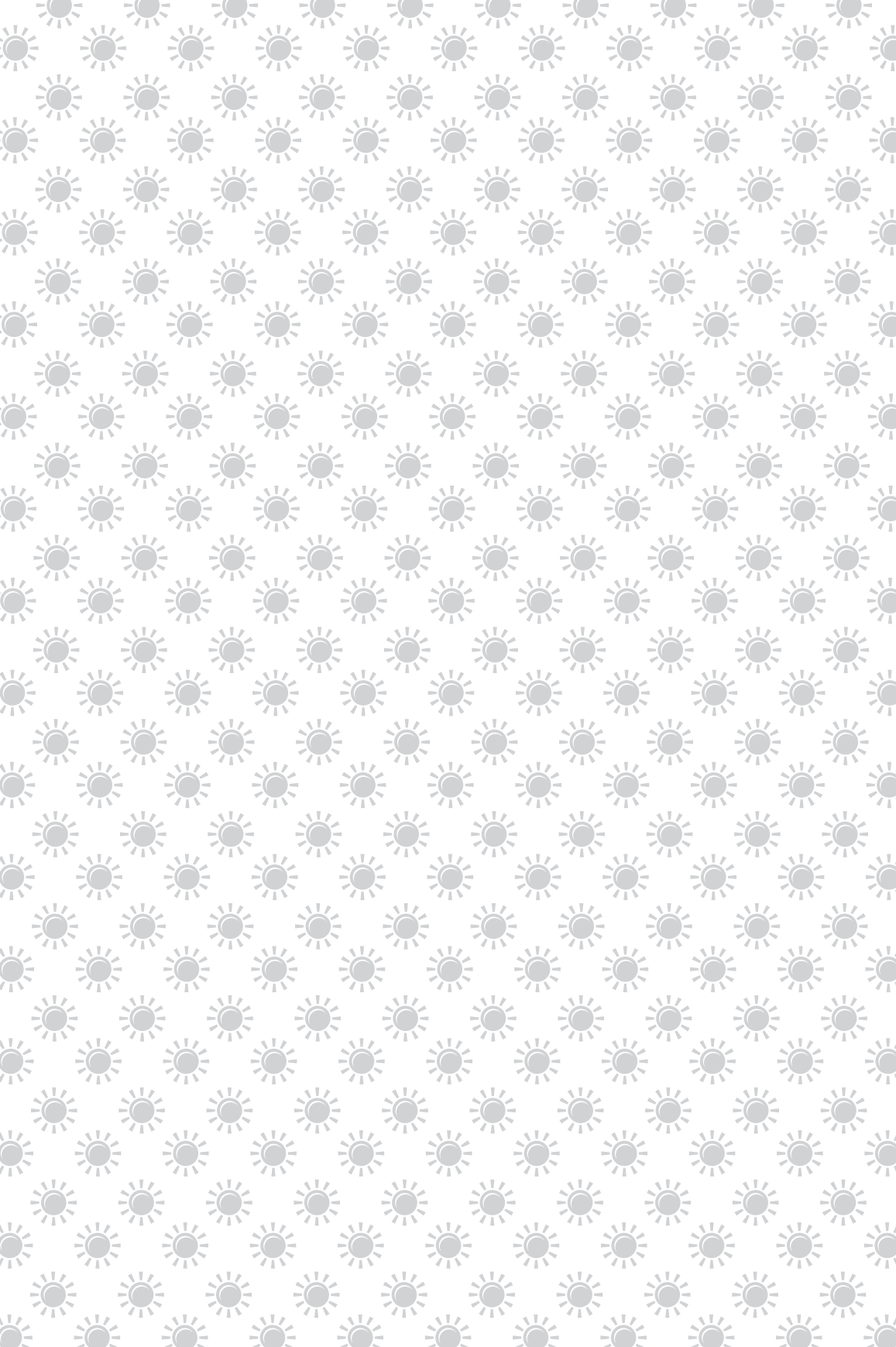
M. en C. Roxana Berenice Recio Colmenares

Doctorado en Agua y Energía

Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara

recio.roxana@gmail.com





PRESENTACIÓN

A través de sus diversas manifestaciones y transformaciones, así como de su aprovechamiento, la energía ha permitido el desarrollo de la vida en todas sus variantes y ha contribuido cada vez más a mejorar las condiciones de existencia y de bienestar de la humanidad. Nuestro planeta cuenta con una gran diversidad de recursos energéticos, con una distribución aleatoria, clasificados en función de su naturaleza, a saber: aquellos recursos que se fueron acumulando a través de complejas transformaciones durante miles de años, como el petróleo, el gas, el carbón, la geotermia y los materiales radiactivos.

El descubrimiento del fuego marcó un parteaguas en la historia de la humanidad, en donde la energía en forma de calor y de luz permitió un avance sustancial en el desarrollo social y económico. La historia de la humanidad va a la par de la disponibilidad del recurso energético y su aprovechamiento; así, las primeras comunidades cazadoras y recolectoras se fueron transformando en agrícolas sedentarias, posteriormente en incipientes sociedades industriales, hasta la actualidad, en la que el incesante avance tecnológico transforma día a día nuestra cotidiana existencia.

La energía solar es la fuente de energía de mayor disponibilidad en un amplio dominio de latitudes, con índices de

incidencia máximos (zonas ecuatoriales) y mínimos (regiones polares). Es una energía muy dispersa que puede alcanzar valores máximos de mil watts por cada metro cuadrado de superficie y varía en función de la época del año; es posible almacenarla y convertirla en calor y en electricidad, y ser aprovechada por sus efectos en materiales que presentan propiedades ópticas y eléctricas.

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer, de una manera sencilla, los principios del aprovechamiento de la energía solar térmica y cómo se puede aplicar en una gran diversidad de procesos, tanto domésticos, como comerciales e industriales. Su contenido está dividido en cinco capítulos.

En el primero se presenta el recurso solar. El contenido se basa primeramente en un estudio sobre la radiación solar, su distribución y características durante su trayecto hacia la superficie de la Tierra, los flujos radiativos y sus intercambios entre la Tierra y el Sol, las diferentes tecnologías para su medición y las fuentes de información para su estimación.

En el segundo capítulo se presenta el principio de la conversión fototérmica, así como los principios básicos para el aprovechamiento de la radiación termosolar, el balance de energía, el concepto de eficiencia en los dispositivos convertidores, y las diferentes tecnologías para aumentar el nivel de la temperatura de operación manteniendo en lo posible una eficiencia de conversión aceptable. Se describen los sistemas de calentamiento solar de agua y de aire, así como las tecnologías de concentración, en particular la de canal parabólico y la de parabólico compuesto.

En el tercer capítulo se aborda el tema de los sistemas termosolares aplicados al sector residencial y de servicios. Su contenido se refiere a varias aplicaciones, tales como el calentamiento de agua para piscinas, para uso sanitario, doméstico, de servicios, para sistemas de climatización, etcétera.

En el capítulo cuarto, se describen algunas aplicaciones industriales, sobre todo en el sector agroindustrial, pecuario

y acuícola, incluyendo las referentes al acondicionamiento de criaderos de aves y de biodigestores. En el caso de sistemas de concentración, destacan las aplicaciones de esterilización de instrumentos y de suelos, así como la detoxificación de efluentes. Se incluyen además las tecnologías solares de destilación de agua de mar y salobre, el secado de alimentos, la refrigeración y el aire acondicionado.

En el capítulo quinto, se tratan los aspectos normativos, de legislación y algunas recomendaciones a los usuarios para la adquisición de un equipo para calentamiento solar. Se presentan las normas nacionales e internacionales para la determinación del comportamiento térmico e integridad de los dispositivos conversores y sistemas; las leyes nacionales e internacionales que promueven la aplicación de las energías renovables, en particular la energía solar térmica, programas de fomento, políticas subsidiarias, normas de competencia laboral, y finalmente, una serie de recomendaciones para que el usuario adquiera el equipo de calentamiento solar que más le convenga desde el punto de vista económico y de eficiencia energética.

Octavio García Valladares e Isaac Pilatowsky Figueroa
Coordinadores

1

EL RECURSO SOLAR

Dr. Rafael Enrique Cabanillas López

1.1 Introducción

La radiación solar es la energía electromagnética que se recibe del Sol en forma natural y que ha permitido la existencia de la vida en la Tierra. Parte de esta energía es la responsable del clima en la Tierra y otra parte origina la mayoría de los procesos biológicos conocidos. Es tan abundante esta energía que puede aprovecharse para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad.

El recurso solar se entiende como la energía que en forma de radiación térmica procedente del Sol llega a la superficie terrestre y se puede utilizar para algún proceso energético. A diferencia de otras energías renovables, la energía solar es en principio predecible ya que su disponibilidad primaria es función de un buen conocido sistema astronómico Sol-Tierra, cuyos aspectos generales se describirán más adelante. Además del aspecto astronómico, la radiación solar disponible para una determinada región depende del comportamiento de la radiación electromagnética al incidir y penetrar la atmósfera terrestre; varios fenómenos se presentan a lo largo de la trayectoria de los rayos solares antes de llegar a la superficie de la Tierra. Conjuntamente la presencia de humedad (vapor de agua), aerosoles (humo, polvo, *smog*) y nubes son factores

que determinan la transparencia atmosférica y por consecuencia la cantidad de energía solar disponible.

Existen varias formas de estimar la cantidad de radiación solar que se recibe en alguna región; las dos formas más comunes son: la medición *in situ* y la estimación mediante imágenes de satélite. Los instrumentos de medición de radiación solar han sido normalizados a nivel internacional, por lo que hay mucha concordancia entre los datos de diferentes estaciones del mundo. Por otra parte, la estimación vía satélite también ha sido mejorada en los últimos años, por lo que sus estimaciones se van aproximando progresivamente a las mediciones en tierra. Esto ha permitido no sólo que se vayan formando bases de datos de regiones cada vez más amplias sino también que estas bases estén disponibles para un mayor número de usuarios, tanto en el ámbito de la investigación como en el del desarrollo de aplicaciones solares.

1.2 El Sol

El Sol es una estrella que genera energía bajo un proceso nuclear de fusión, por medio del cual se convierte hidrógeno en helio, como se observa en la figura 1.1.

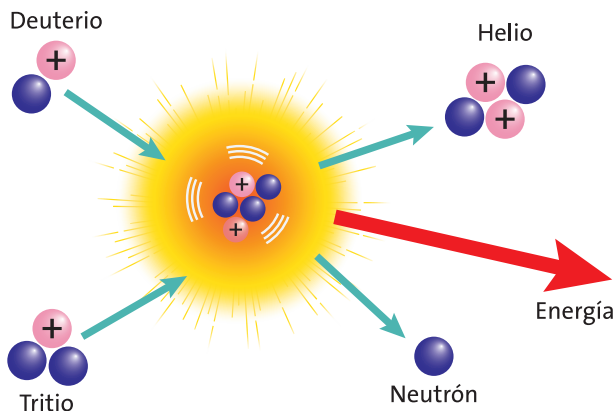


Figura 1.1. Reacción de fusión nuclear en el Sol.

La estructura general del Sol puede dividirse en núcleo, zona convectiva-radiativa y corona. En el núcleo es donde sucede la reacción de fusión, y en la zona convectiva-radiativa es donde ocurre la transferencia de energía a la corona, que es la superficie que observamos desde la Tierra (figura 1.2).

Las temperaturas del interior del núcleo sobrepasan los millones de kelvin, pero se estima que en la superficie del Sol la temperatura promedio es de casi 5,778 K.

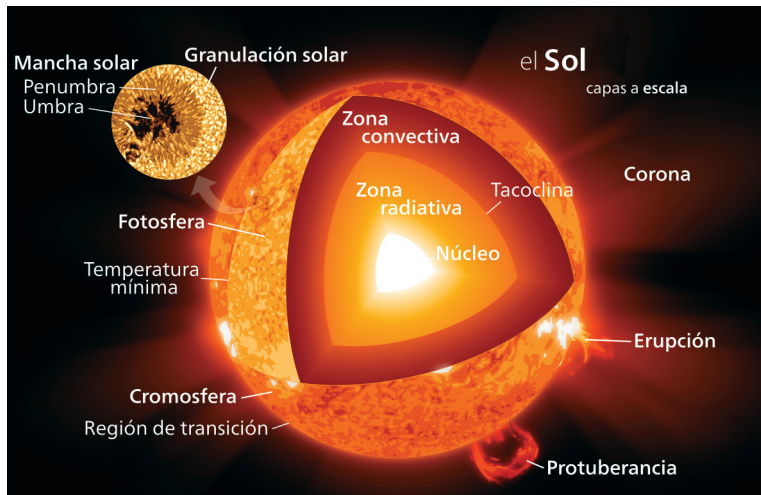


Figura 1.2. Estructura solar.

La cantidad de radiación por unidad de área que recibe la Tierra en el tope de la atmósfera es casi una constante, puede variar ligeramente a lo largo del año debido a que la órbita terrestre alrededor del Sol es elíptica, por lo que presenta acercamientos o alejamientos del astro, y también a causa de la actividad solar cuyo ciclo es de 11 años. El valor actualizado y más preciso es de $1,360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ ⁽¹⁾; este valor se conoce en la literatura ingenieril como la “constante solar”, pero se sabe que no es precisamente una constante universal en el sentido científico y que esas pequeñas variaciones pueden incidir en el clima terrestre pero son poco importantes en aplicaciones de energía solar.

La radiación emitida por la superficie del Sol tiene una distribución espectral que se asemeja a la de un cuerpo negro a 5,778 K, como se observa en la figura 1.3.

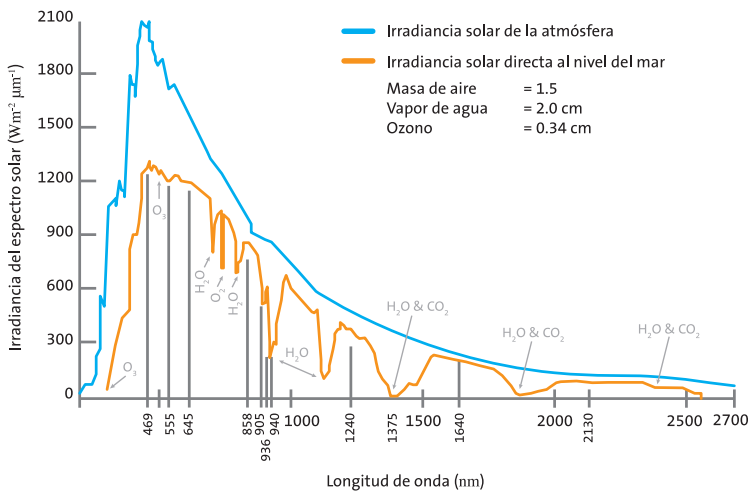


Figura 1.3. Espectro solar en el tope de la atmósfera y al nivel del mar. (Fuente: NASA images).

1.3 Sistema Sol-Tierra

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, casi esférica, en la que éste está en uno de los focos. Un ciclo se completa en 365 días y se denomina movimiento de traslación (figura 1.4). A su vez, la Tierra gira alrededor de su propio eje con una duración de aproximadamente 24 horas y este giro se denomina movimiento de rotación. El eje de la Tierra está ligeramente desplazado ($23^\circ 26' 13.7''$) con respecto al plano de la órbita. Este plano recibe el nombre eclíptica. El movimiento de traslación en conjunción con la oblicuidad terrestre produce las estaciones del año; y el de rotación, el día y la noche. De estos dos movimientos depende cuánta energía solar se recibe en una determinada región de la Tierra a lo largo del año.

De esta forma en el solsticio de diciembre los rayos del Sol caen perpendicularmente en el trópico de Capricornio, y en el solsticio de junio en el trópico de Cáncer. De los trópicos hacia los polos los rayos solares nunca caen perpendicularmente sobre la superficie de la Tierra, de modo que esas regiones reciben menos radiación solar (figura 1.5).

La distancia más grande entre el Sol y la Tierra durante el año sucede en el solsticio de verano, y la más corta en el solsticio de invierno. Esta es una de las razones de que la Antártida sea el continente más frío del planeta.

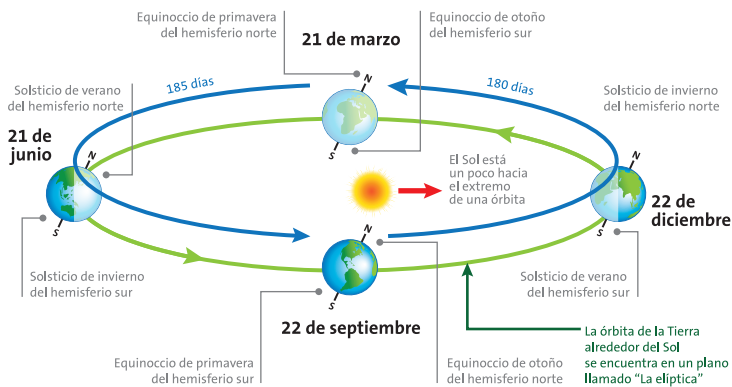


Figura 1.4. Órbita de la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año.

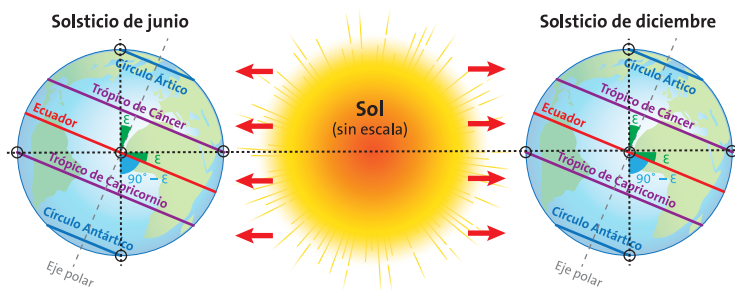


Figura 1.5. Variación de la dirección de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra a lo largo del año.

1.4 Atmósfera

No sólo de la interacción del sistema astronómico Sol-Tierra depende la cantidad de radiación solar que recibe una determinada región sobre la superficie de la Tierra, sino también de las condiciones de la atmósfera. Varios fenómenos se presentan durante la trayectoria de la radiación electromagnética proveniente del Sol a través de la atmósfera: la dispersión, la reflexión y la absorción son los principales factores que atenúan la cantidad de radiación que viaja por las distintas capas atmosféricas (figura 1.6).

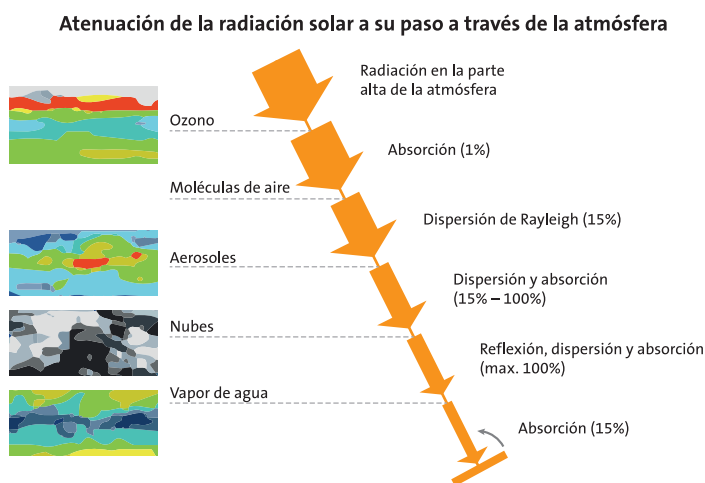


Figura 1.6. Factores que influyen en la atenuación de la radiación solar incidente. (Basado en el mapa de IRSoLaV).

La dispersión. Se refiere al fenómeno que ocurre cuando la radiación electromagnética interacciona con partículas o moléculas de los gases presentes en la atmósfera, y una parte de aquella es redireccionada en forma aleatoria sin cambiar la longitud de onda (dispersión de Rayleigh), y otra parte, considerable, es devuelta al espacio por este fenómeno. El tamaño de

las partículas y de las moléculas afectan de diferente manera a las distintas longitudes de onda; dadas las características de la atmósfera terrestre, las longitudes de ondas pequeñas (cercanas al azul) son más dispersadas (esto origina el color del cielo, de lo contrario sería transparente, como en la noche).

La absorción. Se presenta cuando moléculas de ozono (O_3), de vapor de agua (H_2O) o de dióxido de carbono (CO_2) junto con los aerosoles de partículas de polvo, hielo y otras sustancias, reciben radiación solar que aumenta su temperatura (y que se reemite por radiación térmica). Esta fracción de la energía total puede llegar a ser del 15%, dependiendo de las condiciones atmosféricas.

La reflexión. Las nubes conformadas por aerosoles de agua y de hielo reflejan una gran cantidad de radiación incidente, por lo que bloquean el paso de la misma a la Tierra; dependiendo del espesor de la capa de nube el bloqueo puede llegar a ser total. Las nubes presentan al mismo tiempo el fenómeno de absorción.

En términos generales se calcula que alrededor del 23% de la radiación solar extraterrestre incidente en la atmósfera será atenuada por estos fenómenos antes de llegar a la superficie de la Tierra (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page6.php>).

1.5 Conceptos generales

Para comprender mejor la nomenclatura utilizada en la literatura especializada sobre energía solar y sus aplicaciones se presentan a continuación algunas definiciones generales.

Como se vio en las secciones anteriores, la radiación solar sufre algunas transformaciones al atravesar la atmósfera terrestre, por lo que es necesario definir los diferentes componentes de la misma.

Radiación directa. Es la que se recibe directamente del Sol y que no ha variado su dirección, es decir, es la parte

de la radiación extraterrestre que logra atravesar la atmósfera sin cambiar su dirección (pero sí su magnitud). La radiación extraterrestre es por tanto radiación directa por excelencia, este tipo de radiación es la que produce sombra en los objetos en los que incide. Suele indicarse con el subíndice “b”.

Radiación difusa. Es la que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión en la atmósfera, la que atraviesa las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa el cielo sería transparente, como sucede por ejemplo en la Luna. Esta radiación se indica el subíndice “d”.

Radiación terrestre. Es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, lo que refleja una pared blanca, un lago, el suelo, etcétera.

Radiación total. Es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

Radiación global. Es la radiación total que incide sobre una superficie horizontal, y es igual a la suma de la difusa y la directa.

Irradiancia. Se refiere a la potencia solar y es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie por unidad de área. Se representa generalmente con el símbolo “G”, junto con los subíndices adecuados: G_o , G_b , G_d , para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa, respectivamente. Las unidades más comúnmente utilizadas para la irradiancia son W/m^2 , que es la energía que incide instantáneamente sobre una superficie. Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede referirse entonces a una cierta cantidad de energía.

Irradiación. Es la cantidad de energía por unidad de área (J/m^2) que incide durante un periodo dado, y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período de tiempo en cuestión. Generalmente se usa el símbolo “I” para la irradiación por hora, y “H” para la irradiación en el periodo de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo: H_o simboliza la irradiación extraterrestre; I_d , la irradiación difusa

en una hora, etcétera. La ecuación 1.1 representa la relación entre la irradiancia y la irradiación en el período de tiempo de t_1 a t_2 .

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) \quad 1.1$$

Masa de aire (m). Se refiere a la razón del espesor de atmósfera a través de la cual el haz de radiación solar llega a la Tierra. La masa de aire es igual a uno cuando el Sol está en el zenit de un determinado punto sobre la Tierra a nivel del mar. Cuando el Sol está en un ángulo de 60° con respecto al zenit (Θ_z), $m = 2$. Para ángulos de zenit de 0° a 70° a nivel del mar, una buena aproximación es:

$$m = \frac{1}{\cos\Theta_z} \quad 1.2$$

Para ángulos más grandes el efecto de la curvatura de la Tierra llega a ser significativo y se debe tomar en cuenta.

Tiempo solar. Es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol en el cielo; el mediodía solar ocurre cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador.

Tiempo civil o tiempo estándar. También llamado tiempo local, no coincide con el solar. Para convertir el tiempo estándar a tiempo solar se realizan dos correlaciones. La primera consiste en corregir por la diferencia de longitudes entre la que se encuentra el observador y en la que está basado el tiempo civil, el cual es fijado en forma de decreto gubernamental. El Sol tarda 4 minutos en desplazarse 1° de longitud. La segunda corrección es la ecuación del tiempo en donde se consideran las variaciones del tiempo de rotación de la Tierra, el cual afecta el tiempo en que el Sol cruza el meridiano del observador. La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el civil es:

$$\text{Tiempo solar} - \text{Tiempo civil} = 4 (L_{st} - L_{loc}) + E \quad 1.3$$

Donde L_{st} es el meridiano estándar para el cual está basado el tiempo local, L_{loc} es la longitud del lugar en cuestión (en grados) y E es la ecuación del tiempo en minutos:

$$E = 229.2 (0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sen B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sen 2B) \quad 1.4$$

Donde B está dado por:

$$B = (n-1) \left(\frac{360}{365} \right) \quad 1.5$$

y n es el día juliano del año (Duffie&Beckman¹).

Trayectoria solar. Es el movimiento aparente que sigue el Sol según lo ve un observador sobre la superficie terrestre (Figura 1.7).

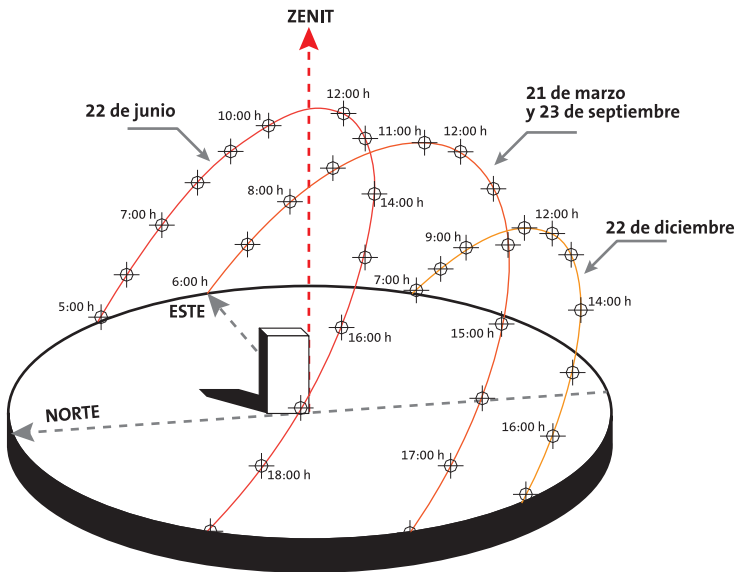


Figura 1.7. Trayectorias solares estacionales a 40° N de latitud.

1.6 Instrumentos de medición

Los instrumentos utilizados para medir la radiación solar se pueden clasificar en dos tipos: piranómetros y pirheliómetros; ambos pueden denominarse radiómetros solares, pero difieren en sus funciones, como se explicará más adelante. Además, ambos comparten el mismo tipo de sensor que por lo general consiste en una termopila (unión de varios termopares en un arreglo que optimiza la señal de salida). La termopila es de un color negro mate que permite absorber casi toda la radiación solar incidente, prácticamente en todas las longitudes de onda de la radiación térmica. La temperatura de la termopila aumenta con rapidez sobre la temperatura de referencia, y esa diferencia permite estimar la potencia de la radiación solar en un instante determinado, por lo que ambos dispositivos miden la *irradiancia* comúnmente en W/m^2 .

El **piranómetro** consiste en una termopila montada en una base de gran masa con inercia térmica y está protegida por una cúpula de vidrio transparente para evitar tanto las pérdidas de calor por convección como los efectos de la intemperie (polvo, lluvia, nieve, etc., figura 1.8). Los piranómetros son los instrumentos utilizados para medir la radiación global sobre una superficie plana. Con los accesorios especiales también miden la radiación difusa y la total sobre una superficie no horizontal incluyendo la reflejada por otras superficies.

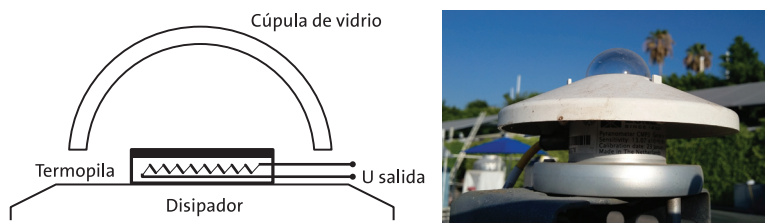
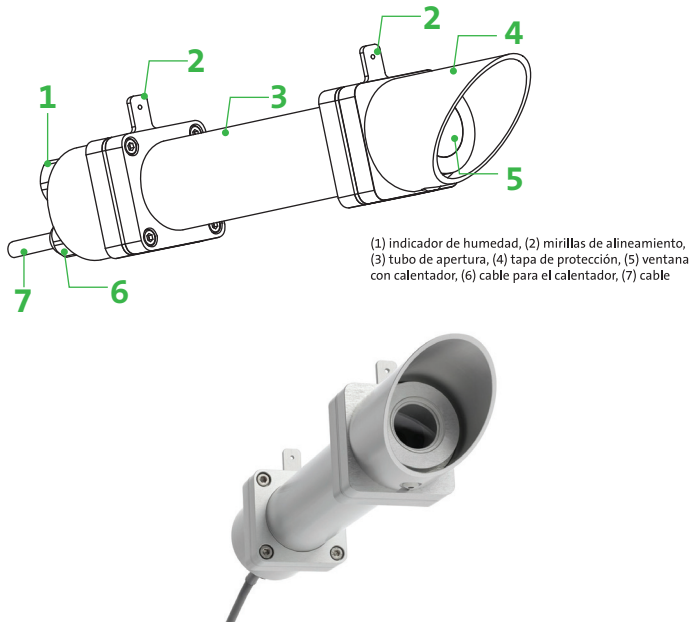


Figura 1.8. Diagrama y foto de un piranómetro.

El **pirheliómetro** es un instrumento diseñado para medir la radiación solar directa, y consiste en una termopila, al igual que el piranómetro, pero con la diferencia de que ésta se encuentra colocada al final de un cilindro a fin de sólo dejar entrar al sensor los rayos que vienen directamente del Sol, como se observa en la figura 1.9. La apertura de la lente es de sólo 5° como lo marca la norma respectiva (Norma Internacional ISO 9060 y la Organización Meteorológica Mundial).



Figuras 1.9. Diagrama y fotografía de un pirheliómetro.

Ambos equipos miden irradiancia en W/m^2 que son las unidades internacionales para la medición de la radiación solar.

Otros equipos que también se utilizan pero en aplicaciones donde no se requiere gran precisión incorporan sensores fotovoltaicos, que son muy prácticos y de bajo costo. Su principal inconveniente es que no son sensibles en todo el rango de radia-

ción solar por lo que sus lecturas arrojan una incertidumbre que varía entre 3 y 5 %, contra el 1 % en el caso de los térmicos.

En la figura 1.10 se muestra una estación solarimétrica común donde se observan los distintos sensores de radiación, tanto de global horizontal, difusa, directa normal y otros parámetros climatológicos.



Figura 1.10. Estación solarimétrica automatizada.

1.7 Estimación teórica y base de datos del recurso solar

En los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a determinar con mayor precisión la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. Los instrumentos que se analizaron en la sección anterior pueden medir la radiación pero

sólo para un punto, y está claro que mientras más sensores se tengan más precisa será la estimación del recurso solar, pero resulta imposible disponer de una densa red de estos equipos, por sus costos y por lo demandantes que son en cuanto a vigilancia, limpieza, etc., y en cuanto a calibración, además de la inaccesibilidad para instalaciones remotas. Con esto se concluye que para un país o una región determinados sólo se podrá contar con algunas estaciones solarimétricas colocadas en puntos que pudieran no ser los idóneos, sino donde se garantice cierta seguridad de operación. Por lo tanto se requiere desarrollar algunas otras formas de estimar el recurso solar en áreas entre puntos de medición; dos son los métodos más empleados: mediante modelos matemáticos que extrapolen desde esos puntos de medición hasta cubrir áreas más extensas, y mediante lecturas de satélites. Ambos métodos han mostrado ser consistentes y sus algoritmos de cálculo son cada vez más sofisticados y han estado mejorando sustancialmente en los últimos años². No es el objetivo de este texto profundizar en estos métodos, sino presentar al lector aspectos de importancia general para aprovechar la información del recurso solar disponible.

La información sobre la radiación solar puede obtenerse a partir de bases de datos de diversas formas y es necesario comprender su significado para darle el uso correcto; si la información es medida instantáneamente (irradiancia) o si es integrada en un periodo de tiempo (irradiación); la primera es en unidades de potencia, generalmente en W/m^2 , y la segunda en unidades de energía, ya sean MJ/m^2 o kWh/m^2 .

Con mucha frecuencia estos datos se reportan en forma de promedios diarios, por lo que las unidades están en MJ/m^2 día o en kWh/m^2 día. También pueden encontrarse integrados en todo el año. En la figura 1.11 se observa un mapamundi de la irradiancia a partir de datos solares acumulados.

De la figura 1.11 se pueden desprender varias observaciones; primero, las áreas del mundo donde se cuenta con mayor

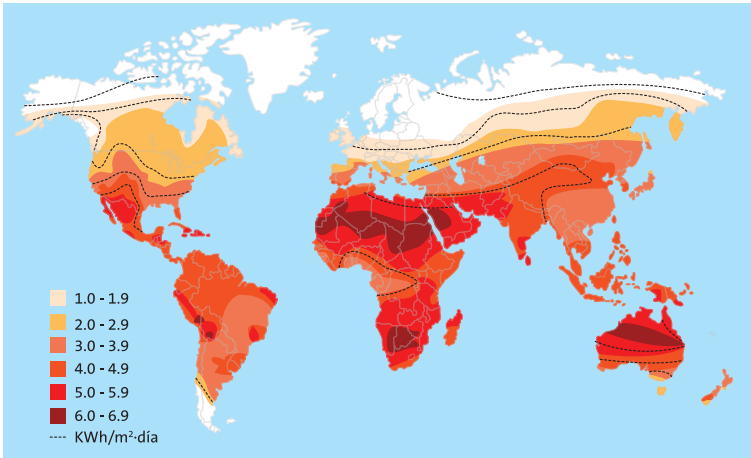


Figura 1.11. Radiación solar promedio diaria (kWh/m²-día).

recurso solar (gran parte de América, todo el continente Africano, buena parte de Asia y toda Oceanía y algunas regiones de Europa); segundo, los valores más altos de radiación global horizontal pasan ligeramente de 7.5 kWh/m² día; tercero, la limitante de este modelo de cálculo del recurso solar es que no funciona en los polos, ni en lugares con nieve (obsérvese al norte y al sur de América, donde aparecen franjas sin color, y que el mapa se trunca en los círculos polares). Los modelos satelitales acusan una limitación en el ángulo de vista del satélite, por lo que en la actualidad no se puede discriminar en la información satelital entre nieve-hielo y nubes. Finalmente el valor de esta información, al ser calculada en promedios y en forma muy agregada, debe manejarse como información indicativa general, para determinar extensiones con mayor o menor radiación. En la figura 1.12 se muestra el mapa de la república mexicana de la radiación solar diaria promedio anual elaborado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (antes IIE). De esta información se puede ubicar con mucha certeza las áreas con mayor potencial para la aplicación de plantas de tecnologías termosolares.

rology and Solar Energy (SSE) (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>), el cual está basado en un mínimo de 10 años, pero puede llegar hasta los 22, de información tanto satelital como de mediciones en Tierra. Esta base de datos está pensada para usarse en los cálculos de diseño de sistemas solares, tanto fotovoltaicos como térmicos, además de que es de fácil manejo y cuenta con varias opciones dependiendo de la información requerida. La única información que se necesita introducir son las coordenadas del lugar objeto de estudio, en donde las tres componentes principales de la radiación solar (global, directa y difusa) se pueden obtener para superficies horizontales o inclinadas a varios ángulos determinados.

Aparentemente para cualquier ubicación del mundo la irradiancia puede estimarse en este sitio, lo que resulta especialmente ventajoso para los usuarios latinoamericanos dada la limitada información confiable del recurso solar disponible.

Cabe señalar que la información sobre el recurso solar para una determinada localidad debe ser evaluado en sitio ya que es la forma más segura de obtener esta información, sin embargo los métodos antes expuestos pueden suplir o complementar considerablemente la información requerida para la elaboración de un proyecto de aplicaciones solares.

Referencias

1. Duffie, John A., William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.
2. Bojanowski, J.S., Skidmore, A.K. and Vrieling, A. (2014) Quantifying solar radiation at the earth surface with meteorological and satellite data. Enschede, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 2014. ITC Dissertation 242, ISBN: 978-90-6164-371-5.)

2

PRINCIPIOS Y DISPOSITIVOS CONVERSORES TERMOSOLARES

2.1 Principios de la conversión fototérmica

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

2.1.1 Principio de conversión fototérmica

La energía que se recibe del Sol se propaga en forma ondulatoria con un espectro continuo de emisión, en un intervalo de longitud de onda característico. Su contenido energético depende precisamente de la frecuencia, de acuerdo con la figura 2.1. El elemento principal de un dispositivo termoconversor es una superficie, normalmente metálica, recubierta con un material de alta absorción (absortividad) de la radiación solar, lo que provoca una elevación de la temperatura.

2.1.2 Principios básicos para el aprovechamiento de la energía solar

Existen algunos principios básicos para el mejor aprovechamiento de la energía solar. El primero se basa en elegir la mejor época del año, determinar la inclinación y orientación correctas y seleccionar los materiales de construcción más adecuados. El segundo principio consiste en conservar durante el mayor tiempo posible la energía almacenada por el absorbe-

dor. En este caso se debe proveer al absorbedor con aislamientos térmicos: convectivos, radiativos y conductivos para disminuir las pérdidas térmicas. Para seleccionar adecuadamente los diferentes materiales que permitan estos aislamientos es necesario conocer su interacción con la radiación, que es de dos tipos: la solar, cuya longitud de onda es corta (entre 0.25 y 2.5 micras) y la que emiten los cuerpos terrestres, cuya longitud de onda es larga (entre 2.0 y 100 micras)¹.

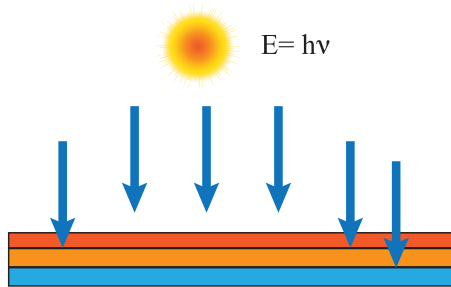


Figura 2.1. Energía radiante recibida sobre una superficie absorbente.

El aislamiento convectivo consiste en colocar una cubierta transparente a la radiación solar sobre el absorbedor para disminuir el efecto de intercambio térmico con el aire circundante. Algunos materiales transparentes presentan cierta selectividad, es decir, son transparentes a la onda corta y opaca o reflectora a la radiación de onda larga como es el caso del vidrio y algunos materiales plásticos. Esta propiedad genera el efecto invernadero, que permite la acumulación de calor y disminuye al mismo tiempo las pérdidas convectivas y las radiativas. A medida que se aumenta el número de cubiertas, disminuye la convección térmica, pero también la transparencia. Esto produce aumento de la temperatura, pero disminución sensible de la eficiencia de conversión².

En cuanto a las pérdidas radiativas, no existe un material que de manera natural absorba mucha radiación y emita

poca. La mayoría de los absorbedores se aproximan a un cuerpo negro, el cual absorbe y emite en la misma proporción la radiación incidente. Existe una gran cantidad de técnicas para generar depósitos de materiales sobre el sustrato metálico del absorbedor para darle la propiedad de selectividad espectral al tener una alta absorptividad de la radiación solar y una baja emisividad térmica en el infrarrojo, como es el caso de ciertos óxidos metálicos. Cabe mencionar que las pérdidas térmicas ocurren de manera simultánea cuando el absorbedor se somete a la radiación solar durante el día. Durante la noche los intercambios térmicos se efectúan entre la radiación emitida por la atmósfera y la del absorbedor³.

Las pérdidas por conducción térmica pueden disminuirse utilizando materiales de baja conductividad térmica, como fibras naturales o minerales, espumas plásticas, etc. El tipo de material así como el espesor requerido son función de la conductividad térmica y de la diferencia en temperatura entre la del interior del absorbedor y la del ambiente. Además debe considerarse su exposición a la radiación ultravioleta en donde algunos aislamientos se pueden degradar. La figura 2.2, ejemplifica las diferentes pérdidas térmicas que pueden ocurrir en un convertidor térmico².

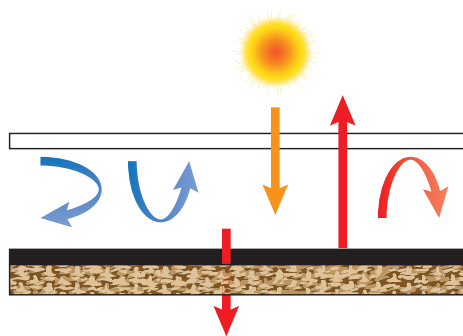


Figura 2.2. Representación esquemática de las pérdidas térmicas de un absorbedor solar.

Otro principio básico para el mejor aprovechamiento de la energía solar se refiere a extraer el calor almacenado de la forma más eficiente posible. En este caso, se utiliza un fluido que por sus características permita optimizar la recuperación de la energía térmica; el mejor de ellos es el agua, seguido de algunas soluciones acuosas y aceites que posibilitan elevar los puntos de ebullición, y finalmente el aire, aunque sus propiedades térmicas no son adecuadas, permite tener un sistema de calentamiento simple, sin problemas de corrosión y de afectación por las bajas temperaturas².

2.1.3 Técnicas para aumentar la temperatura en un captador solar

Existe un límite teórico de la máxima temperatura que se puede alcanzar en un absorbedor solar, dependiendo del tipo de tecnología y materiales utilizados. Las pérdidas térmicas más importantes son las debidas a la convección del aire. Si quisiéramos aumentar la temperatura, podríamos incrementar el número de cubiertas, pero disminuiría en consecuencia la trasmittancia¹. Otras técnicas consisten en la incorporación de barreras anticonvectivas a fin de reducir el contenido del aire interior, y finalmente en aumentar la densidad de la energía solar mediante dispositivos concentradores, como lentes, lentillas o espejos con diferentes geometrías.

2.1.3.1 Barreras anticonvectivas

Si las cubiertas se colocan paralelas a la superficie, la radiación reflejada sale de la superficie absorbidora por la cubierta exterior; mientras que si se colocan perpendicularmente, la radiación se dirige hacia el absorbedor y no se pierde (véase figura 2.3). Por otro lado, debido a que las particiones se pueden hacer bastante delgadas, es posible evitar las absorciones en las particiones con el resultado neto de que la transmisión solar del aislamiento convectivo llega a ser bastante alta. Considerando que están debidamente diseñadas

las particiones verticales, estas pueden suprimir las corrientes de convección natural. Si son opacas a la radiación de longitud de onda larga, pueden también reducir sustancialmente las pérdidas radiativas del absorbedor. Si son transparentes, se debe usar una superficie selectiva en el absorbedor, y las particiones verticales se limitarán a suprimir la convección. En un principio las particiones eran hexagonales, por lo que originalmente este tipo de captadores se conoce con el nombre de captadores solares planos tipo panel⁴. La figura 2.3 muestra las diferentes formas de las barreras anticonvectivas, las cubiertas transparentes horizontales (a) y las correspondientes verticales (b).

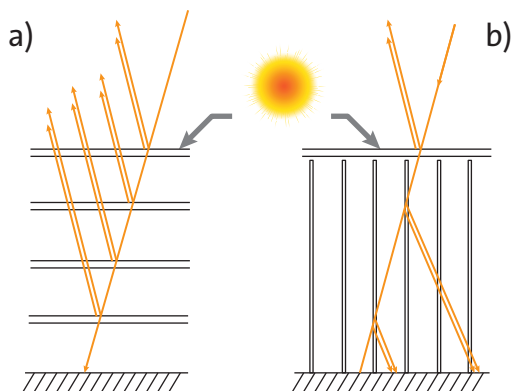


Figura 2.3. Disposición de barreras anticonvectivas (a) paralelas horizontales y (b) verticales.

2.1.3.2 Disminución del contenido del aire interior

Otra técnica para disminuir las pérdidas convectivas del aire consiste en reducir su contenido en las inmediaciones del absorbedor solar. A este tipo de absorbedor solar se le conoce como captador tubular al vacío. Está compuesto por una serie de tubos transparentes por lo general de vidrio. En cada uno de ellos hay un absorbedor que capta la energía solar y un intercambiador para permitir la transferencia de la energía

térmica. A todos los tubos se les hace vacío para disminuir en lo posible las pérdidas térmicas convectivas del absorbedor, el cual contiene un tratamiento selectivo para disminuir a su vez las pérdidas térmicas radiativas³. Las tecnologías de los captadores solares planos, evacuados y con concentración óptica, se tratarán en capítulos posteriores.

2.1.3.3 Balance térmico en un absorbedor solar

Por lo general, el bance térmico en un absorbedor solar está representado por:

$$Q_{\text{ABS}} = Q_{\text{U}} + Q_{\text{P}} + Q_{\text{AL}} \quad 2.1$$

En donde Q_{ABS} es el calor absorbido, Q_{U} el calor utilizable, Q_{P} el calor total perdido y finalmente Q_{AL} el calor almacenado.

2.1.3.4 El concepto de eficiencia

La eficiencia de conversión térmica de un dispositivo solar depende de: a) las propiedades ópticas de los materiales, en particular de la absorptancia (α) del absorbedor y de la transmitancia (τ) de la cubierta, en donde la eficiencia máxima corresponde a la eficiencia óptica, es decir, el producto de la absorptancia por la transmitancia (por ejemplo, en el caso de un absorbedor con propiedades ópticas promedio de un 90% de absorptancia y una transmitancia del 80%, la eficiencia máxima será del 72%); b) la diferencia entre la temperatura promedio del fluido térmico y la del medio ambiente ($\Delta T = T_{\text{fav}} - T_{\text{amb}}$); c) la radiación solar incidente por unidad de superficie (I_{T}); d) el coeficiente total de pérdidas térmicas (U_{C}), y e) la eficiencia de extracción del calor acumulado (F'). Todos estos parámetros se pueden correlacionar en una expresión generalizada de la eficiencia (η):

$$\eta = F' \left[\tau \alpha - \frac{U_{\text{C}}}{I_{\text{T}}} (T_{\text{fav}} - T_{\text{amb}}) \right] \quad 2.2$$

La figura 2.4 muestra los resultados experimentales obtenidos para un captador solar con la norma ISO 9806 (véase referencia 1 del capítulo 5). Como se observa en la gráfica, la eficiencia térmica instantánea del captador (eje Y) cuando la incidencia de la radiación solar directa es perpendicular al plano del captador se obtiene en función de parámetros climatológicos y de funcionamiento (eje X), como son la diferencia de la temperatura promedio del agua en el captador (T_{fav}) menos la temperatura ambiente (T_{amb}), entre la irradiancia solar incidente en el plano del captador por unidad de superficie (I_T). A partir de los puntos experimentales y de una regresión lineal, o bien cuadrática, se obtiene la curva característica del captador:

$$\eta = \eta_0 + \eta_1(\Delta T / I_T) \quad 2.3$$

$$\eta = \eta_0 + \eta_1(\Delta T / I_T) + \eta_2(\Delta T^2 / I_T) \quad 2.4$$

Donde η_0 , η_1 y η_2 son las constantes de la curva y ΔT es la diferencia entre T_{fav} y T_{amb} en el caso de la norma ISO 9806 (en el caso de la NMX-ES-001-NORMEX-2005⁵, tanto en la gráfica como en la curva, $\Delta T = T_{fi} - T_{amb}$, donde T_{fi} es la temperatura del agua a la entrada del captador). Es importante referir con qué norma se ha obtenido la curva para evitar confusiones en cuanto a la temperatura del fluido que se utiliza en el cálculo.

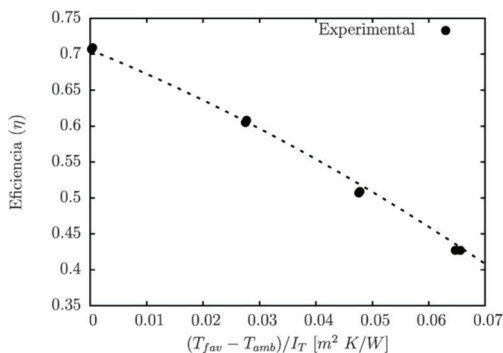


Figura 2.4. Eficiencia instantánea de un captador.

2.1.3.5 El concepto del factor modificador del ángulo de incidencia

Con objeto de establecer el rendimiento del captador solar a diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar directa sobre el plano del captador, se deben llevar a cabo las pruebas experimentales pertinentes. La figura 2.5 muestra el valor del ángulo modificador ($K_{\tau\alpha}$) obtenido experimentalmente en función del ángulo de incidencia con respecto a la perpendicular (θ). Para el cálculo correcto de la eficiencia instantánea en los casos en que el ángulo de incidencia de la luz solar no es perpendicular al captador, el valor de $K_{\tau\alpha}$ obtenido se debe multiplicar por el término η_0 de la ecuación de rendimiento térmico del captador.

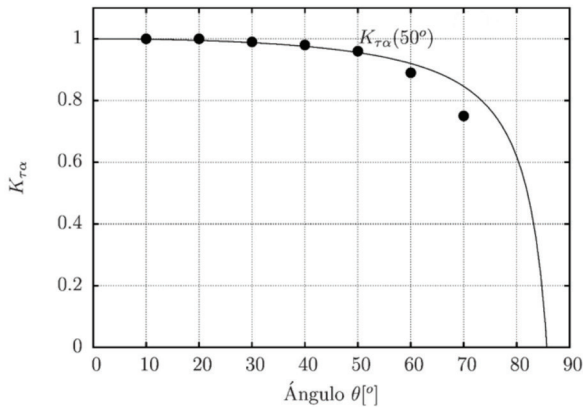


Figura 2.5. Modificador del ángulo de incidencia.

Referencias

1. Duffie, John A., William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.
2. Almanza, S. R. y G.F. Muñoz, *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, 1994.

3. Manrique, José A., *Energía solar: fundamentos y aplicaciones fototérmicas*, Harper & Row Latinoamericana, 1984.
4. Meinel, A.B., Y M.P Meinel, *Aplicaciones de la energía solar*, Ed, Reverté, España, 1982.
5. Norma Mexicana: NMX-ES-001-NORMEX-2005. *Energía Solar- Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua- Métodos de Prueba y Etiquetado*. (Publicacion de declaratoria de vigencia en el DOF: 15 de agosto de 2005; vigente a partir del 14 de octubre de 2005).

2.2 Dispositivos conversores termosolares de baja temperatura

Dr. Octavio García Valladares

La radiación solar se transforma en energía térmica, ya sea en forma de agua caliente, aire caliente, etc., por medio de los llamados captadores solares de temperatura (el principio fundamental de funcionamiento de un captador solar se basa en el aprovechamiento de la propiedad que posee una superficie revestida de negro o de una sustancia de material selectivo, de absorber la radiación solar en un alta proporción), que pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **Captador solar plano.** También llamado panel solar térmico, está formado en general por una superficie plana a la que se adhiere una serie de tubos por los que circula un fluido que se calienta a su paso por el panel. Todo el conjunto está revestido de una superficie negra absorbente selectiva. Pueden ser, a su vez:
 - a) Captador plano descubierto (figura 2.2.1b). Sistema más económico y de bajo rendimiento, cuando se operan a temperaturas de uso de menos de 40°C, utilizado esencialmente para el calentamiento de agua en piscinas.

- b) Captador plano protegido (figura 2.2.1a). Para evitar las pérdidas de calor por convección (pérdidas térmicas), y además proteger al conjunto de las condiciones atmosféricas, se coloca una cubierta transparente (vidrio, policarbonato, etc.) entre la superficie de absorción y el medio ambiente. Para evitar la pérdida de calor por conducción, el conjunto lleva en su parte posterior una capa de material aislante térmico que puede ser de poliuretano expandido, fibra de vidrio, etc. Finalmente cuenta con un marco o caja para darle rigidez al captador.

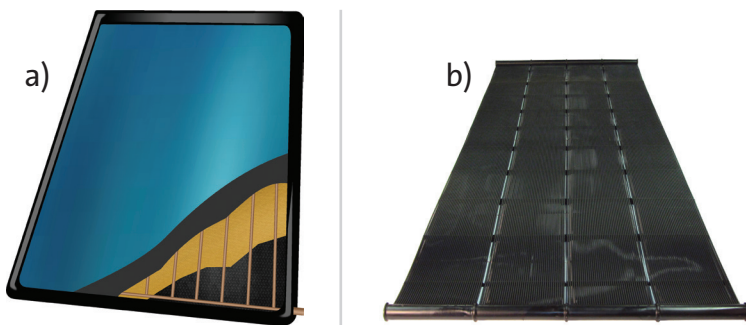


Figura 2.2.1. Captador solar plano: (a) captador plano protegido; (b) captador plano descubierto.

- **Captador de tubos de vacío.** La superficie captadora está aislada del exterior por uno o un doble tubo de vidrio que crea una cámara al vacío. Existen dos tipos¹:
 - a) Flujo directo (figura 2.2.2a). El fluido circula por los tubos, como en los captadores planos.
 - b) Flujo indirecto o *Heat pipe* (figura 2.2.2b). El calor evapora un fluido en el tubo (tubo de calor), y éste transmite su energía al condensarse en el extremo.

- **Captador parabólico compuesto (CPC).** Al concentrar la radiación solar en el receptor puede utilizarse en rangos de baja y mediana temperatura. Contiene un recep-

tor cilíndrico, mostrado en la figura 2.2.3a, el cual está formado por dos segmentos, una sección de involuta y un segmento de una parábola. El primer segmento va de la parte inferior del receptor al punto P, que es la involuta de la sección transversal del receptor, mientras que el segundo segmento va del punto P a la parte superior de la curva. En la figura 2.2.3b se muestra un captador plano tipo CPC.

De acuerdo con su funcionamiento los captadores solares se clasifican en dos tipos:

Activos. Cuentan con una bomba o algún tipo de energía externa para mover el agua o fluido dentro de su circuito.

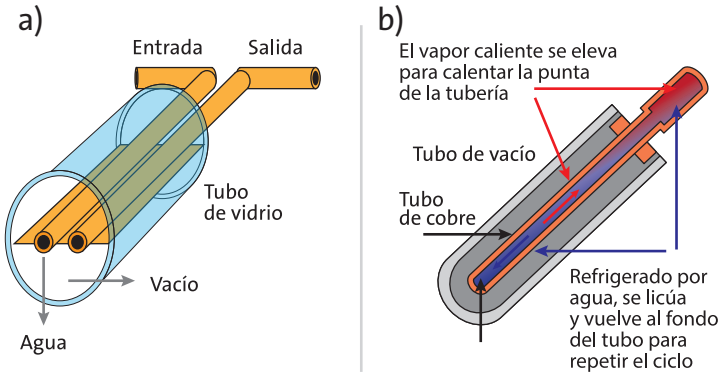


Figura 2.2.2. Captador de tubos de vacío: (a) flujo indirecto, (b) flujo directo.

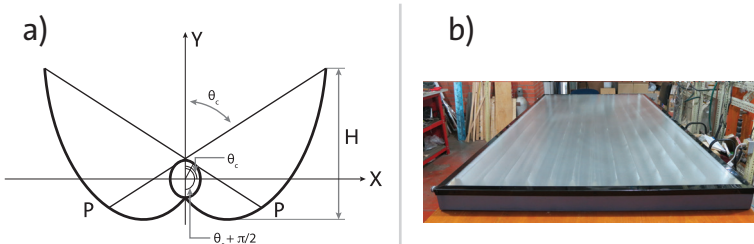


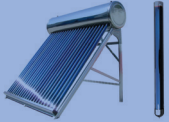
Figura 2.2.3. Captador parabólico compuesto (CPC): (a) geometría, (b) equipo comercial.

Pasivos. No requieren energía externa para funcionar.

Mueven el agua o fluido dentro del sistema por virtud del principio de convección natural (sistemas termosifónicos).

Los calentadores solares más comunes en México para calentamiento de agua en vivienda son los **sistemas termosifónicos** que integran un tanque de acumulación del agua caliente en la parte superior del captador solar. El agua en el captador se calienta debido a la radiación solar y, por diferencia de densidades, el agua o fluido caliente de la parte superior del captador fluye hacia el tanque de almacenamiento localizado por encima del captador, mientras que el agua o fluido menos caliente y con mayor densidad por la parte inferior del tanque hacia la parte inferior del captador para completar el ciclo. Las diferencias en los sistemas termosifónicos más utilizados se muestran en la tabla 2.2.1.

Tabla 2.2.1 Sistemas termosifónicos.

			
<p>Sistema con captador solar plano</p>	<p>Sistema con tubo al vacío de flujo directo</p>	<p>Sistema con tubo al vacío de flujo indirecto (heat pipe)</p>	
<p>Países de fabricación</p>	<p>México, EE.UU., Alemania, España, Israel, Grecia, China, Brasil, Turquía, etc. Fabricantes mexicanos con más de 50 años de experiencia</p>	<p>Prácticamente sólo en China; existen fábricas en México que hacen los tanques pero importan los tubos de vacío</p>	<p>China, Alemania, Austria, Australia, Inglaterra, etc.</p>

<p>¿Resisten la presión?</p>	<p>Sí. Pueden conectarse a tinaco, hidroneumático o presión municipal sin ningún riesgo</p>	<p>No. Sólo pueden operarse a presión atmosférica. Hay proveedores que le adicionan un tanque flotador que rompe la presión, pudiendo ocasionar un desbalance en la red hidráulica del domicilio donde se instale</p>	<p>Sí. Pueden conectarse a tinaco, hidroneumático o presión municipal sin ningún riesgo</p>
<p>¿Pueden quedarse sin agua o llenarse cuando están calientes por causa de la radiación solar?</p>	<p>Sí. No hay ningún riesgo si falta el agua en el sistema y resisten choques térmicos sin problemas</p>	<p>No. Pierden su garantía y los sellos se dañan. Los tubos pueden romperse ya que no son tubos pyrex que resisten choques térmicos</p>	<p>Sí. No hay ningún riesgo si falta el agua en el sistema y resisten choques térmicos sin problemas</p>
<p>¿Resisten granizo?</p>	<p>Sí. Los equipos que cuentan con vidrio templado son resistentes a impactos severos, granizo, pedradas y vandalismo</p>	<p>En general puede resistir granizo de hasta 25 mm, pero una granizada fuerte rompe los tubos. No son vidrios templados.</p>	<p>En general puede resistir granizo de hasta 25 mm, pero una granizada fuerte rompe los tubos. No son vidrios templados.</p>
<p>¿Resisten congelamiento?</p>	<p>Pueden resistir si se utilizan por ejemplo válvulas anticongelantes en los sistemas o cuentan con algún sistema de protección anti-congelamiento</p>	<p>No tienen problemas de congelamiento a menos que los tubos pierdan el vacío</p>	<p>No tienen problemas de congelamiento a menos que los tubos pierdan el vacío</p>
<p>¿Son fáciles de instalar?</p>	<p>Tan sencillo como colocar el tanque sobre la base, colocar dos conexiones y conectar entrada y salida de agua fría y caliente</p>	<p>Requieren una gran cantidad de uniones, una por cada tubo al vacío que contenga el equipo, lo que incrementa la posibilidad de fugas o daños</p>	<p>Requieren una gran cantidad de uniones, una por cada tubo al vacío que contenga el equipo.</p>

Espesor de la cubierta exterior	Existen equipos con vidrio y policarbonato. En el caso del vidrio, éste debe ser templado y de al menos 3.2 mm. En el caso del policarbonato, éste suele ser de 6 mm	El espesor de la pared de los tubos suele ser de vidrio de 1.6 mm no templado, lo que los hace de frágil manejo. Hay equipos más resistentes con espesores de 2 y hasta 3 mm	El espesor de la pared de los tubos suele ser vidrio de 1.6 mm no templado, lo que los hace de frágil manejo. Hay equipos más resistentes con espesores de 2 y hasta 3 mm
Conexión entre tanque y captador	Conexiones roscadas o soldadas muy seguras	Vidrio contra empaque de silicón. Si se rompe un sello se vacía el sistema	Conexiones roscadas o a presión de cobre insertadas al tanque. Muy seguras
Tanque termo	De acero fabricado en placa robusta con acabado vidriado anticorrosivo. Para operar a presión	De acero inoxidable fabricado en lámina de espesores bajos, en varios casos inferiores a 0.5 mm	De acero inoxidable fabricado en placa que les permite operar a presión
Temperatura que entrega el sistema en un día soleado estándar	50-60 °C. Ningún riesgo de daño en tuberías o quemaduras	65-70 °C. Riesgo de quemaduras y daños en tuberías si no son las adecuadas	65-70 °C. Riesgo de quemaduras y daños en tuberías si no son las adecuadas

Además de los sistemas termosifónicos existen en el mercado, sobre todo para regiones cálidas, los *sistemas autocontenidos*² (figura 2.2.4), que son los calentadores solares más simples que se pueden concebir, ya que consisten simplemente en un recipiente (uno grande o varios pequeños, etc.) dispuesto de tal manera que presente su mayor área de exposición al Sol. Esta superficie se pinta de negro o se cubre con una superficie selectiva y hace las veces de captador solar. El recipiente se llena con agua, que se calienta directamente por contacto con la cara expuesta al Sol. Por los lados y el fondo se aísla térmicamente para evitar las pérdidas de calor. La eficiencia térmica de este tipo de calenta-

dores es relativamente alta, del orden de 45%, si se evalúa únicamente para el período diurno. Esta eficiencia cae drásticamente en general si se toma en cuenta la pérdida nocturna.

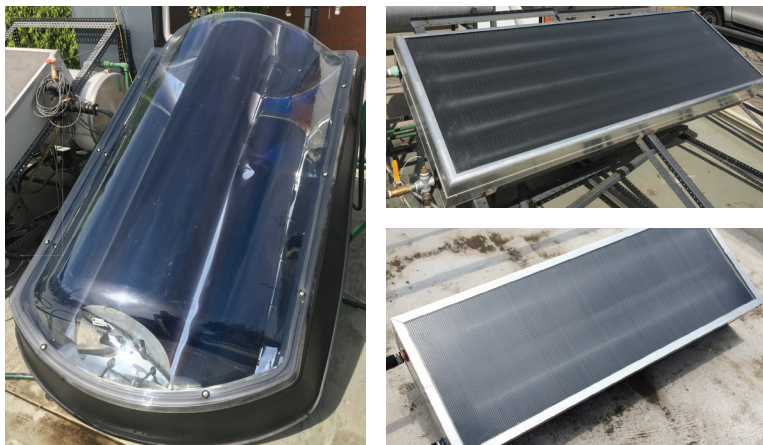


Figura 2.2.4. Sistemas solares autocontenidos.

2.2.4 Situación de la tecnología

En 2013 la superficie mundial de *captadores solares* de agua ³ en operación fue de 535,000,000 m², distribuidos de la siguiente manera: captadores planos descubiertos (6.7%), captadores planos cubiertos (22.4%), captadores de tubos de vacío (70.5%) y captadores solares para calentamiento de aire (0.4%). En el caso particular de México, a fines de 2013⁴ se estimaba una superficie de captadores de agua en operación de 2,506,602 m² (lo que representa tan sólo el 0.47% del total mundial), distribuidos de la siguiente manera: captadores planos descubiertos (34.1%), captadores planos cubiertos (37.6%), captadores de tubos de vacío (27.9%) y captadores de aire (0.4%). De la superficie de captadores de tubos de vacío en operación en el mundo, China tiene el 91.9% del total.

De los sistemas instalados hasta 2013, los sistemas termo-sifónicos de agua caliente representan en Europa el 37%, en Asia (sin considerar China) el 78%, en China el 85%, en África el 94%, y en Estados Unidos y Canadá el 3%.

Referencias

1. <http://www.thermomax.com/downloads/vacuuntubepaper.pdf>
2. C. Marken, *Solar collectors: Behind the glass*. HomePower, 2009, 133,70–76.
3. F. Mauthner, W. Weiss, M. Spörk-Dür, *Solar Heat Worldwide, Markets and Contribution to the Energy Supply 2013*, Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency, 2015 edition.
4. Pilatowsky Figueroa, Isaac y Rodolfo Martínez Strevel, *Sistemas de Calentamiento Solar de Agua: Una Guía para el Consumidor*, 4ª edición, Editorial Trillas, 2017.

2.3 Calentamiento solar de aire

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

2.3.1 Introducción

El termoconvertor solar (TCS) es un dispositivo cuya función principal es convertir la radiación solar incidente en calor y transferirlo a un fluido para su aprovechamiento. La selección del fluido de trabajo, sea un líquido o un gas, depende de sus propiedades físicas y químicas y la forma de calentamiento puede ser directa o indirecta, en función de las condiciones de operación. Debido a sus inmejorables propiedades, el agua es el mejor fluido de trabajo a pesar de ciertas condiciones límite en sus cambios de estado, como son la evaporación y la solidificación, ya que en estos procesos se presentan altas temperaturas y presiones o muy bajas temperaturas, lo que puede dificultar la transferencia de calor.

El elemento principal de un TCS, como se ha dicho, es una superficie con capacidad absorbente de la radiación solar en donde se incrementa su energía y permite que la temperatura se eleve. Los demás componentes son materiales que disminuyen las pérdidas de la energía térmica acumulada. La cubierta transparente permite el paso de la radiación de onda

corta, pero no de la radiación de onda larga, lo que produce el efecto invernadero, así como también disminuye el efecto convectivo del aire. En lo referente a las pérdidas radiativas, éstas pueden limitarse si se disminuye la emisividad térmica del absorbedor y finalmente se aísla de las pérdidas conductivas tanto en el fondo como en las partes laterales, como se mencionó en la sección 2.1.3¹.

La mayor parte de las aplicaciones de los captadores solares se destinan al calentamiento de agua, sobre todo para uso sanitario. Existe un gran potencial de desarrollo de captadores solares para el calentamiento de aire, pero estos dispositivos no representan más del 1% del mercado mundial de las tecnologías solares. Hay muchas aplicaciones basadas en el acondicionamiento térmico de espacios (secado de alimentos, incubación, agricultura protegida, salas climatizadas, calentamiento de espacios habitacionales y laborales), en las cuales el aire puede calentarse de manera indirecta a través de un sistema de intercambio térmico aire/agua o de manera directa^{2,3}.

2.3.2 Captador solar para el calentamiento directo de aire, CSCAi

El CSCAi de tipo directo incluye prácticamente los mismos elementos que el de calentamiento de agua: una superficie absorbedora, una o varias cubiertas transparentes, ductos en donde circula el aire y un aislamiento térmico conductivo.

2.3.2.1 Componentes y materiales⁴

2.3.2.1.1 Superficie absorbedora

La superficie absorbedora, o el absorbedor, es el componente principal de cualquier termoconvertor solar, ya que debe presentar una alta absorción de la radiación de onda corta, como el caso de un recubrimiento con una pintura de tono oscuro (no necesariamente negra, ya que el efecto de otros colores oscuros es muy similar). Las pérdidas térmicas por radiación se pueden minimizar modificando la estructura de

la superficie, integrando materiales que reduzcan la emisividad y dándole al absorbedor un carácter selectivo. Por lo general se pueden obtener absorptancia entre 0.85 y 0.90 y rangos de emitancia menores a 0.15.

Conviene construir el absorbedor con materiales metálicos para aprovechar la alta conductividad térmica y rigidez, aunque pueden preferirse materiales plásticos para aplicaciones a baja temperatura. En el caso del calentamiento de aire, no importa la naturaleza del material, ya que no presenta ningún problema de una posible corrosión, como es el caso de la mayoría de los líquidos. Lo que hay que considerar en el material del absorbedor es su estabilidad mecánica, térmica y química, así como cubrir los aspectos de seguridad con relación a la exposición al fuego y no representar ningún riesgo en su manejo.

Para mejorar las condiciones de transferencia de calor, es posible aumentar el área superficial de intercambio, aplicando una cierta rugosidad, o modificar las estructuras en diferentes formas geométricas: cuadradas, rectangulares, triangulares, trapezoidales, onduladas, aletadas, entre otras, platos perforados o materiales con matrices capilares o porosas, como fibras naturales o minerales. La figura 2.3.1 presenta algunas de las diversas formas que puede adoptar la superficie absorbidora.

2.3.2.1.2 Cubierta transparente

La cubierta transparente más adecuada por costo y durabilidad es el vidrio, normal o templado, cuya alta transparencia se determina por un bajo contenido de hierro. Pueden utilizarse plásticos como el policarbonato en placa, o en una o más capas, o el acrílico; sin embargo, este último se debilita con el tiempo, por lo que puede fracturarse con algún impacto o debido, sobre todo, a la expansión provocada por altas temperaturas. Además, los materiales plásticos suelen verse afectados por la radiación ultravioleta (UV) o por fuertes variaciones de temperatura, por lo que deben estar protegidos de la conta-

minación ambiental, de la condensación y de las altas humedades relativas.

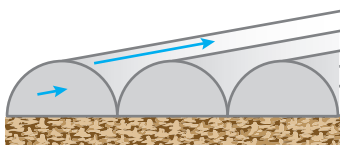


Figura 2.3.1a.
Absorbedor medio cilindro.

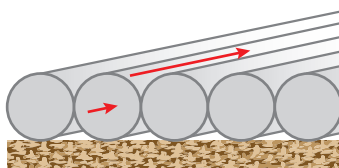


Figura 2.3.1b.
Absorbedor cilindrico.

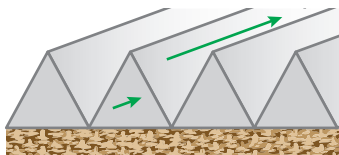


Figura 2.3.1c.
Absorbedor triangular.

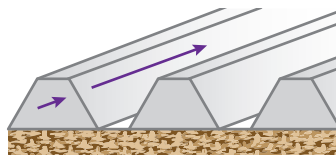


Figura 2.3.1d.
Absorbedor trapezoidal.

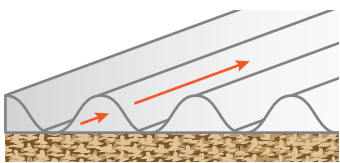


Figura 2.3.1e.
Absorbedor ondulado.



Figura 2.3.1f. Absorbedor cuadrado o rectangular.



Figura 2.3.1g. Absorbedor perforado de una o dos placas.

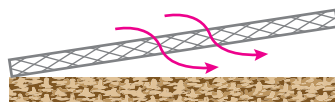


Figura 2.3.1h. Absorbedor con matriz (metal, plástico, tela, etc.).

2.3.2.1.3 Aislamiento térmico

En el caso de los CSCAi, el nivel de temperaturas alcanzado no es muy alto, por lo que no se requieren aislamientos térmicos de alta resistencia ni grandes espesores. Se pueden utilizar prácticamente todos los tipos disponibles en el mercado. Los de mejores propiedades son las espumas plásticas,

aunque deben protegerse de la exposición directa a la radiación ultravioleta y en algunos casos de las altas temperaturas para evitar su fusión, y fuga de gases. En el caso de las fibras vegetales o minerales, hay que evitar que se humedezcan ya que el agua disminuye el efecto aislante.

2.3.2.1.4 Sellos

La función principal del sello es evitar la introducción de agua y las fugas de aire. Para garantizar un buen sellado entre la superficie transparente y la estructura del captador es necesario que los sellos sean elásticos, resistentes a la temperatura y a la radiación ultravioleta.

2.3.2.1.5 Elementos distribuidores de flujo

Uno de los aspectos importantes en los calentadores solares de aire es su distribución en el interior, la cual debe ser lo más homogénea posible. Este tipo de calentador puede funcionar en cualquier posición: horizontal, vertical o intermedia. En posición vertical opera bajo el principio de la convección natural aprovechando el efecto chimenea o utilizando un ventilador para forzar la convección y mejorar la transferencia de calor. Existen además dispositivos que provocan una distribución de flujo tipo laminar, es decir que el aire ocupa la mayor parte de la superficie para su calentamiento.

2.3.2.1.6 Filtros

Los sistemas de calentamiento solar de aire operan con el aire ambiente, por lo cual es necesario integrar filtros para limitar el acceso a partículas, insectos y sustancias nocivas que pudieran contaminar productos orgánicos —como en el caso del secado de alimentos con aire caliente— o afectar el funcionamiento de los ventiladores. La selección del tipo de filtro depende del tamaño de partículas que se deban filtrar y de la caída de presión permisible. Dependiendo de la calidad del aire, se tienen que revisar y en su caso reemplazar estos dispositivos.

2.3.2.1.9 Ventiladores

El aire puede fluir a lo largo de superficies planas, corrugadas, cuadradas, rectangulares, triangulares, trapezoidales, onduladas, aletadas, entre otras, con uno o varios pasos, a través de estructuras superpuestas, platos perforados o materiales con matrices porosas, como fibras naturales o minerales. Los ventiladores controlan la dirección del flujo de aire y aumentan la transferencia de calor, el ventilador tendrá la potencia suficiente para vencer las diferentes caídas de presión y lograr una distribución uniforme a lo largo del sistema de calentamiento solar. Los ventiladores se clasifican de acuerdo con la forma en que se direcciona el aire o con el tipo de uso. Se cuenta con ventiladores axiales, en donde el aire entra y sale axialmente a lo largo del ventilador; radiales, en los que el aire entra y sale radialmente y cuyas aspas presentan diferentes formas, curvadas hacia afuera o hacia atrás, además de la posibilidad de que el motor sea externo. Por lo general, el tipo radial maneja flujos bajos de aire y altas caídas de presión en comparación con el axial.

También se cuenta con ventiladores de flujo cruzado, en donde el impulso es transversal; éstos se aplican para volúmenes pequeños ya que su eficiencia es moderada; su ventaja es su bajo nivel de ruido.

2.3.3 Trayectorias del flujo de aire

Existen diferentes formas de las trayectorias del flujo de aire, las más comunes son las siguientes⁵:

- El aire pasa entre la cubierta transparente y el absorbedor. En este caso, la eficiencia no es mucha debido a la alta transferencia de calor a la cubierta, pero la construcción es sencilla y económica. Sólo se cuenta con una superficie de transferencia; las pérdidas térmicas son mayores, sobre todo cuando la diferencia entre las temperaturas del absorbedor y del aire son altas, y la eficiencia decae cuando aumenta la velocidad del aire; si bien el uso de las dobles cubier-

tas reduce estas pérdidas, también disminuye la cantidad de radiación solar incidente. La figura 2.3.2 muestra un ejemplo del paso del aire entre la cubierta y el absorbedor.

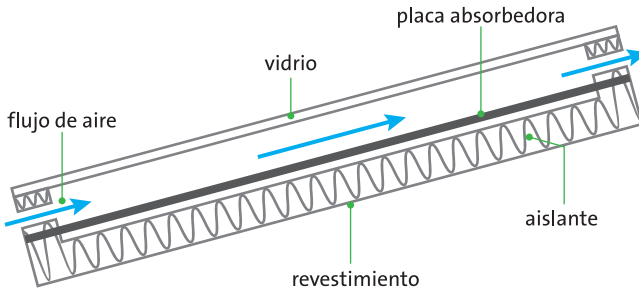


Figura 2.3.2. Paso del aire entre el absorbedor y la cubierta transparente.

- El flujo de aire pasa por debajo del absorbedor y entre el aislamiento térmico. La capa de aire que se forma entre el absorbedor y el aislante provee un aislamiento y es posible que geoméricamente incremente el área superficial a la corriente de aire. Sólo una superficie se usa como área efectiva de transferencia de calor. Este patrón de flujo es probablemente la solución más común, y generalmente se aplica a diferentes tipos de absorbedores. En este caso las pérdidas térmicas son menores. La figura 2.3.3 representa la circulación del aire entre el absorbedor y el aislamiento térmico.

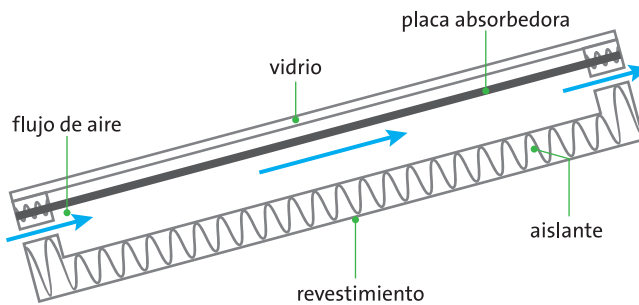


Figura 2.3.3. Circulación del aire entre el absorbedor y el aislamiento térmico.

- El aire fluye a ambos lados del absorbedor. Este patrón se aplica en sistemas en donde es posible el precalentamiento del flujo del aire exterior. En este caso la eficiencia es menor cuando es alta la diferencia entre la temperatura del absorbedor y la del ambiente. La figura 2.3.4 representa el flujo del aire al interior del calentador solar en ambos lados del absorbedor en un flujo de tipo paralelo (a) y en un doble paso (b).

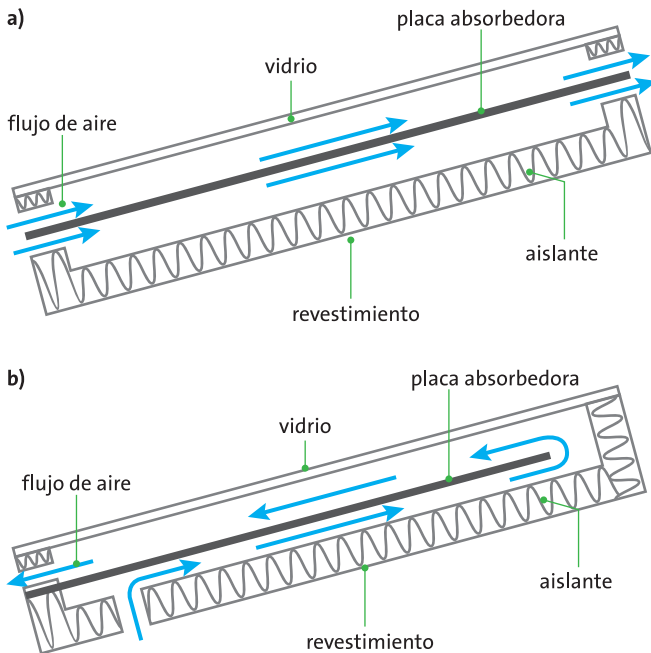


Figura 2.3.4. Circulación de aire en ambos lados del absorbedor en flujo en paralelo (a) y en doble paso en un absorbedor suspendido (b).

- El aire pasa a través de un absorbedor tipo poroso o perforado. Están contruidos por lo general, con un absorbedor altamente poroso, como una gasa ennegrecida o viruta de madera. Debido a su porosidad hay un incremento en el área de transferencia de calor entre el aire y la placa absorbedora. En este caso ocurren altas caídas de presión y, dependiendo de

las condiciones del aire ambiente (polvo o contaminación), el absorbedor puede obstruirse. El absorbedor también puede estar perforado para facilitar el contacto con el aire y disminuir la caída de presión⁶. La figura 2.3.5 representa la circulación de aire a través de un absorbedor perforado.

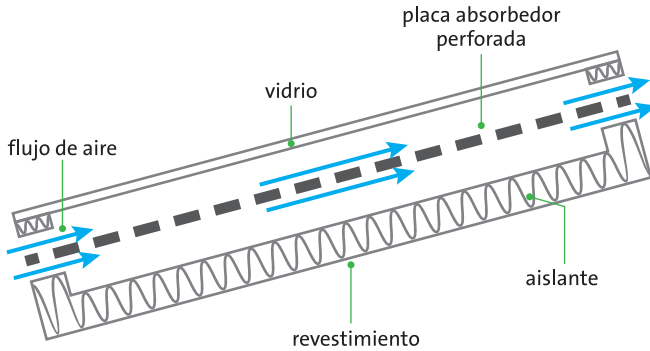


Figura 2.3.5. Captador de aire para calentamiento de aire con cubierta y placa perforada.

La trayectoria del flujo de aire en estos captadores depende de la posición en que se instale (hacia arriba, hacia abajo y horizontalmente). Hay que considerar las fuerzas de flotación; generalmente no hay problema en los sistemas de convección forzada, pero se deben de considerar en la convección natural.

- Efecto del flujo de aire⁴. El flujo de aire determina la eficiencia del captador. En general, si hay altas velocidades se consume mucha energía para mover el aire a través de los ventiladores, y a bajas velocidades la eficiencia térmica es menor. Cabe mencionar que las posibles fugas aumentan con un flujo más grande. Para efectos de calentamiento se requiere un cierto nivel de temperatura.

Los captadores pueden interconectarse en serie o en paralelo. Si se supone que el flujo de aire total es el mismo en una interconexión en serie o en paralelo, la eficiencia térmica del arreglo se verá influida por las siguientes consideraciones:

- a) La transferencia total de calor de los captadores en serie es mayor debido a que el total del flujo de aire pasa a través de todos los captadores.
- b) La elevación de la temperatura en los captadores reduce la eficiencia de cada captador progresivo cuando están en serie.
- c) La caída de presión total en una conexión en serie es la suma de la caída en cada uno de ellos. La caída de presión en captadores conectados en serie es mucho mayor que en los conectados en paralelo. En una conexión en paralelo el flujo de masa total es igual a la suma del flujo de masa que pasa por cada uno de los captadores. Mientras que en una conexión en serie el flujo de masa total pasa por cada uno de los captadores.
- d) Para disminuir la caída de presión en conexiones en serie, se propone aumentar el área de la sección transversal del captador por medio de un ensanchamiento de los perfiles o alargar el alto o escoger diferentes perfiles del absorbedor. Un captador con una capa fija de aire sólo se puede usar bajo el dominio de la velocidad de flujo total de diseño.

Existen configuraciones en las cuales se combina el calentamiento de agua y de aire de manera simultánea, con la posibilidad de recuperar el calor disipado en los módulos fotovoltaicos para calentar aire y al mismo tiempo mejorar la eficiencia de la conversión fotovoltaica⁷. La figura 2.3.6 representa un sistema de calentamiento de aire utilizando la disipación térmica de un sistema fotovoltaico.

El aire puede circular por medio de la convección natural originada por los cambios de densidad debidos a las diferencias entre temperaturas (efecto de chimenea térmica) o de manera forzada, utilizando diferentes tipos de ventiladores de impulsión o de succión.

La temperatura de operación del calentador solar de aire es función de las condiciones del aire ambiental y del flujo de aire que se hace circular en su interior.

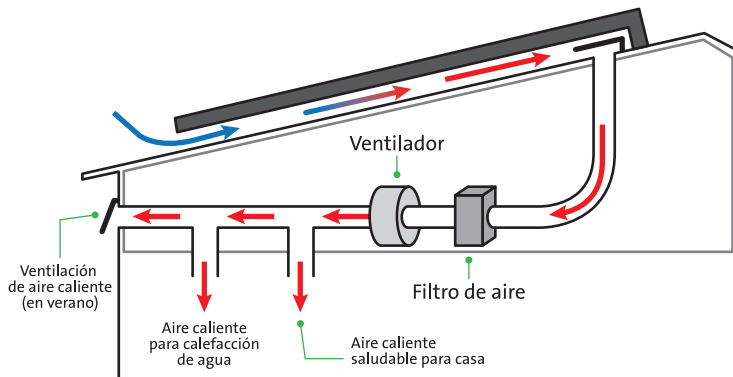


Figura 2.3.6. Calentamiento de aire utilizando la disipación de calor de un sistema fotovoltaico.

2.3.3.7 Eficiencia de conversión

El balance general de energía está representado por la siguiente fórmula:

$$\text{cantidad de flujo térmico útil} = \text{flujo térmico absorbido} - \text{flujo térmico disipado}$$

La interpretación de la eficiencia térmica es prácticamente la misma que en el caso del captador solar de agua, es decir que la eficiencia instantánea se puede expresar directamente como la relación entre el flujo de calor útil proveniente del fluido de trabajo (aire) y el flujo de calor incidente sobre la superficie del absorbedor (energía solar). La eficiencia depende de las condiciones de operación del captador y disminuye cuando la temperatura se incrementa, debido a que también aumentan las pérdidas térmicas.

En la mayoría de las expresiones de la eficiencia térmica, los modelos teóricos suponen que el coeficiente total de transferencia de calor tiene un valor constante y depende poco de la temperatura. Esto puede causar errores, ya que la transferencia de calor es un proceso no lineal y comple-

jo. El valor de este coeficiente global depende de los valores de la temperatura del aire ambiente, de la temperatura del cielo, del flujo másico del fluido de trabajo y de las condiciones climáticas. El coeficiente global de pérdidas térmicas es entonces la suma de tres coeficientes: el de la transferencia de calor desde la cubierta, desde el fondo y desde las partes laterales⁸.

Referencias

1. D. Yogi Goswami, Frank Kreit, Jan F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 2da. Edición, Taylor & Francis, 2000.
2. Duffie, John A., William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.
3. Almanza, S. R. y G.F. Muñoz, *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, 1994.
4. S. Robert Hastings, Ove Morck, *Solar air systems, A Design Handbook*, IEA, Solar Heating and Cooling Programme, Flat Plate air collectors, 2000.
5. B.F.Parker, *Solar Energy in Agriculture*, Vol.4., Elsevier Sciences Ltd.. 1991
6. Alfred P. Brunger, *Low Cost, High Performance solar air-heating systems using Perforated Absorbers*. IEA-Solar Heating and Cooling Report No. SHC14 Air I Final Reports of Task 14 Air Systems Working Group, 1999.
7. Víctor Hugo Borda-Yepes, *Sistema híbrido Termo-foto-voltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (Manihot esculenta, Crantz)*. Magister en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, Medellín, Colombia, 2012.
8. Rajendra Karwa, *Heat and Mass Transfer. Special Topic: Performance of solar air heater*, pag. 949-977, Springer Singapore, 2017.

2.4 Captador solar de canal parabólico y captador parabólico compuesto

M en I. Carlos Ramos Berúmen

M en C. Juan Rafael Ramírez Benítez

M en C. José Beltrán Adán

2.4.1 Captador solar de canal parabólico

2.4.1.1 Introducción

La energía solar es una importante fuente energética que además de ser limpia, abundante e inagotable a escala humana, viene con un plus: es gratis y se encuentra en todo el territorio nacional. El sistema energético que permite la vida en la sociedad actual está basado en el uso de energía convencional proveniente de los hidrocarburos, fuente primaria finita que no podrá abastecer las necesidades humanas eternamente, lo que ha fomentado una importante motivación gubernamental para recurrir a energías limpias como fuente primaria de energía, entre las que se encuentra la energía solar. Dadas las bondades de este recurso se han desarrollado tecnologías que lo aprovechan en aplicaciones prácticas, con beneficios para el medio ambiente, reduciendo el consumo de combustibles fósiles, tanto para la generación de electricidad como para la producción de calor necesario en los procesos industriales.

Una forma de aprovechamiento de la energía solar se da en forma natural en la vegetación, otra forma es la recolección artificial mediante diferentes tecnologías como lo es la fotovoltaica y la termosolar. Entre las aplicaciones de la energía solar están las actividades cotidianas (calentamiento de agua, generación de biocombustibles, fotosíntesis) e industriales (generación de electricidad y calor de proceso). En este tema nos interesa el uso de sistemas termosolares, que permiten alcanzar temperaturas requeridas en los procesos industriales que van de 60 a 280 °C, y hasta 400 °C para los sistemas de generación de electricidad.

2.4.1.2 Sistemas termosolares para generación de calor de proceso

Los sistemas termosolares para generación de calor de proceso se dividen en sistemas sin concentración, en donde se cuentan los captadores planos, y de concentración, en donde se ubican los sistemas de concentrador parabólico compuesto, canal parabólico, concentrador tipo Fresnel, receptor de torre central y plato parabólico. A reserva de considerar las demás características de cada sistema para alguna aplicación en particular, la característica más distintiva entre estas tecnologías puede ser la temperatura que logran generar (tabla y figura 2.4.1).

Tabla 2.4.1. Sistemas termosolares

Movimiento	Tipo de captador	Tipo de absorbedor	Factor de concentración	Rango de temperatura de operación °C
Estacionario	Captador plano	Plano	1	30-90
	Tubos evacuados	Tubular	1	50-200
	Concentrador parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Seguimiento en un eje	Concentrador tipo Fresnel	Tubular	10-40	60-400
	Canal parabólico	Tubular	15-45	60-400
Seguimiento en dos ejes	Plato parabólico	Puntual	100-1000	100-1000
	Receptor de torre central	Puntual	100-1500	150-1000

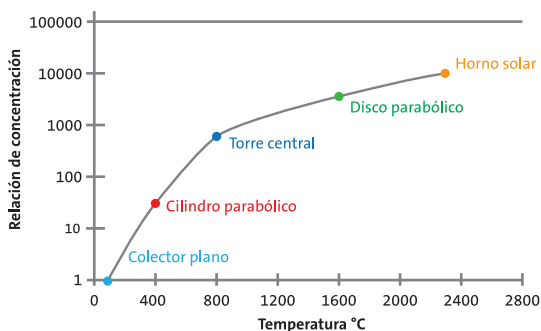


Figura 2.4.1. Sistemas termosolares con y sin concentración.

2.4.1.3 Breve descripción de los captadores solares

Los captadores planos son dispositivos fijos con una superficie que absorbe la energía solar, tanto directa como difusa, transformándola en energía térmica en rangos que van de 30 a 90 °C. Los rangos de temperatura que van de 50 a 200 °C se alcanzan con una variante de captador plano con una eficiencia y temperaturas de operación mayores: el captador de tubos evacuados, que consiste en un tubo de calor concéntrico dentro de un tubo de vidrio sellado al vacío. La combinación del uso de superficies selectivas y la eliminación de la convección y conducción, por efecto del vacío del tubo de vidrio envolvente, dan como resultado un captador de funcionamiento adecuado para medianas temperaturas. Las principales aplicaciones de estos captadores son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico y en menor escala en la industria. Otra tecnología que no requiere de seguimiento solar es conocida como captador parabólico compuesto, que puede alcanzar temperaturas de hasta 240 °C debido a su comportamiento óptico y geométrico. Este captador es capaz de reflejar al foco lineal toda la radiación incidente que capta, a través de las múltiples reflexiones internas de la radiación solar que entra al captador.

Dentro de la categoría de las tecnologías termosolares con concentración se encuentran los concentradores tipo Fresnel, los cuales incluyen un mecanismo de seguimiento solar que permite enfocar la energía solar en un receptor a lo largo de la superficie reflejante y pueden alcanzar temperaturas de hasta 400 °C. Para lograr mayores temperaturas de operación y relativamente más altas eficiencias, se requieren concentradores que aumenten la densidad de energía colectada, entre los que se encuentran el plato parabólico y el receptor central. Por su configuración, dimensiones y seguimiento en dos ejes pueden alcanzar temperaturas próximas a los 1000 °C, por lo que supera sobradamente los requerimientos de la mayor parte de la industria nacional para generar calor de proceso, cuyos rangos están entre 60 y 280 °C. Los canales parabólicos

pueden operar a temperaturas de hasta 400 °C como resultado de la concentración de la radiación solar. El factor de concentración (véase tabla 2.4.1) reduce la superficie del absorbedor con relación al área de apertura, y en consecuencia se reducen sustancialmente las pérdidas térmicas. Sin embargo, este tipo de concentradores requiere seguimiento del Sol que típicamente se realiza en un eje. Tanto económica como técnicamente, este tipo de concentradores son los más favorables para aplicaciones de calor de procesos industriales.

2.4.1.4 Concentrador solar de canal parabólico

La tecnología termosolar de concentración de canal parabólico es considerada una tecnología limpia, madura y con instalaciones a gran escala. Desde la década de 1980 ha sido la tecnología termosolar de concentración más utilizada a temperatura mediana; su aplicación más común es la generación de electricidad en los sistemas conocidos como centrales energéticas termosolares (*SEGS, Solar Electric Generating Station*). Son 9 centrales de diversos tamaños y potencias que en total representan 354 MW instalados. Esta tecnología recurre a concentradores en forma de parábolas, cuyo funcionamiento se basa en concentrar mediante procedimientos ópticos la energía que irradia el Sol, manteniendo perpendicular la superficie reflectante de acabado espejo por medio de un mecanismo de seguimiento solar; así, en el receptor que lleva un fluido caloportador (aceite térmico) se alcanzan temperaturas cercanas a los 400 °C, y mediante intercambiadores de calor se genera vapor, el cual es inyectado a una turbina a fin de generar electricidad a través de un ciclo termodinámico Rankine. Las instalaciones de las conocidas estaciones solares de generación eléctrica que dieron la madurez y confianza a esta tecnología se encuentran en Estados Unidos en el desierto de Mojave.

Los captadores solares de concentración de canal parabólico para generación de calor de proceso adoptan una forma geométrica de parábola que permite a la radiación solar para-

lela al eje de la superficie del espejo parabólico ser reflejada a un punto focal en cualquier punto a lo largo de la curva. Es decir, toda la radiación solar que incide en forma normal a la apertura de la curva de la parábola, podrá ser reflejada a un punto focal a lo largo del eje (receptor). Las dimensiones de estos concentradores son menores que las de los concentradores para generación de electricidad; en función de la aplicación alcanzan en el fluido caloportador temperaturas cercanas a los 280 °C (figura 2.4.2).

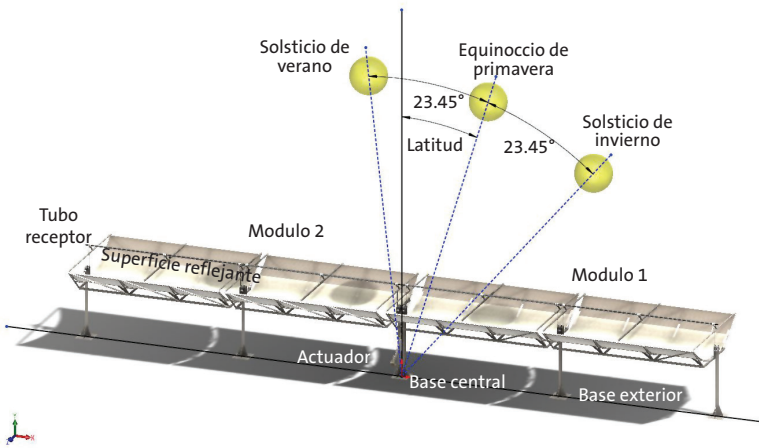


Figura 2.4.2. Principio de operación.

2.4.1.4.1 Elementos principales de la tecnología termosolar de canal parabólico

La tecnología termosolar de concentración de canal parabólico se diseña de forma modular, lo que permite realizar propuestas de campos solares adecuados a las necesidades de cada usuario. Cada módulo de captación y conversión de la energía solar en calor cuenta con los siguientes elementos principales para transformar la energía solar en energía térmica (calor): el concentrador-receptor (estructura, bases, superficie reflectante, tubo receptor con superficie absorbadora y cobertura de vidrio),

mecanismo-control de seguimiento solar, sistema hidráulico y un bloque de intercambio de energía (véase figura 2.4.3).

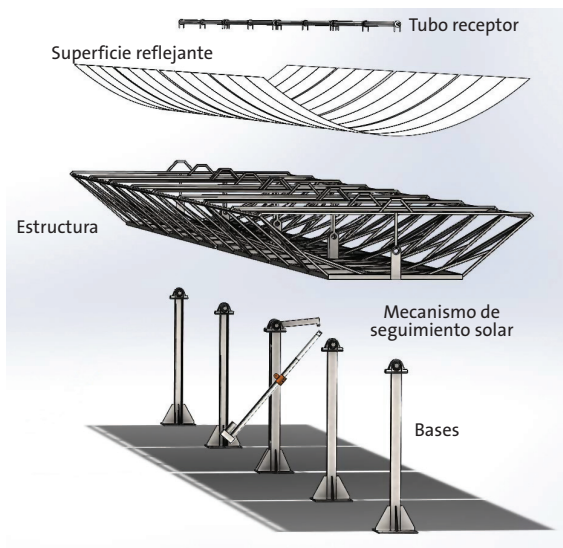


Figura 2.4.3. Elementos del concentrador solar de canal parabólico.

2.4.1.4.1.1 El concentrador-receptor

2.4.1.4.1.1.1 Estructura de soporte: Diseñada con materiales metálicos convencionales, mantiene un perfil parabólico que permite colocar la superficie reflectante y captar la máxima cantidad de rayos solares en el receptor que se encuentra en el punto focal de la parábola, además de estar soportado por bases metálicas resistentes a las condiciones ambientales de la zona de instalación. Se diseña en forma modular, lo que permite plantear estaciones de canal parabólico en función de las necesidades de calor de proceso específicas. El acoplamiento es mediante un sistema de conexiones entre módulos y la dimensión del campo de captadores solares depende del espacio con que cuenta el usuario (figura 2.4.4).

Visto transversalmente adopta la geometría de una parábola, donde se coloca la superficie reflectante acabado espejo que concentra la radiación solar en el receptor, median-

te dispositivos mecánicos para el seguimiento del Sol. La apertura del canal parabólico se refiere a la distancia entre cada uno de los vértices de la curva que forma la parábola, que multiplicada por la longitud nos da el área de apertura.



Figura 2.4. 4. Estructura de soporte. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).

2.4.1.4.1.1.2 Receptor. Es el encargado de absorber los rayos solares concentrados por la superficie reflejante; se encuentra en el punto focal del perfil parabólico y consta de un tubo metálico encapsulado en un tubo de vidrio; el metal está recubierto con material de alta absorptividad y baja emisividad, de color negro opaco; el vidrio es de alta transmisividad para aumentar la captación de energía y disminuir las pérdidas de calor por radiación (figura 2.4.5).



Figura 2.4.5. Receptor-absorbedor. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).

Mediante unos soportes resistentes a altas temperaturas se logra un espacio entre el tubo metálico y el vidrio, generalmente se realiza un vacío, para reducir las pérdidas de calor al ambiente. En algunos concentradores para aplicaciones de calor de proceso se opta por no incluir vacío, pero se logra que las pérdidas por convección entre ambos tubos sean bastante menores al no haber contacto del tubo receptor con el exterior. Por el interior del tubo metálico circula el fluido caloportador, por lo general un aceite térmico para los casos que así lo requiera el proceso. Cuando se trata de la generación de calor de proceso, se ha planteado utilizar agua y una mezcla de etilenglicol para temperaturas de hasta 280 °C, mientras que para temperaturas cercanas a los 400 °C es ampliamente recomendable el aceite sintético. Existe también la posibilidad de generar vapor en forma directa en el receptor.

El receptor convierte la energía solar concentrada en energía térmica mediante el calentamiento de un fluido de trabajo que corre a través del circuito hidráulico hacia el bloque de intercambio de energía, el cual transfiere la energía ganada en el receptor al proceso que lo requiera. El diseño de este elemento contribuye ampliamente con el rendimiento del concentrador, debido a que su función es absorber la energía solar transformándola en energía térmica.

Las longitudes de los receptores, al igual que el módulo de captación, pueden ir desde unos cuantos metros (aplicaciones industriales) hasta varias filas de casi 100 m de longitud (aplicaciones para generación eléctrica). Una ventaja del receptor de menor tamaño es que evita las pérdidas por radiación de la superficie receptora y así el fluido que circula por el receptor alcanza temperaturas mayores. El diseño y selección de un receptor solar está en función de la eficiencia del material, su rentabilidad, el costo de mantenimiento, la razón de concentración de la radiación, el medio de transferencia de calor, el uso de la energía térmica. El receptor del canal parabólico

está colocado en el punto focal o de incidencia de la radiación emitida por el Sol y reflejada por la cubierta de acabado espejo de la parábola, que tiene una reflectividad entre 86 y 92%. El receptor solar absorbe la radiación concentrada, lo cual causa densidades (W/m^2) mucho más altas del flujo de calor que tecnologías industriales convencionales de intercambiador de calor.

2.4.1.4.1.1.3 Superficie reflejante. Compuesta de materiales con acabado espejo soportados por estructuras metálicas en forma de parábola, reflejan y concentran la energía solar sobre un receptor lineal colocado en el foco de la parábola. Para que la concentración de los rayos solares sea eficiente, los materiales de fabricación de la superficie reflejante deben reunir ciertas características, como son: maleabilidad, durabilidad, resistencia a los rayos UV, poco peso, facilidad de limpieza y alta reflectancia. El material más utilizado es vidrio con recubrimientos plateados o aluminizados como superficies reflejantes. Actualmente se está experimentando con superficies plásticas y láminas de aluminio delgadas, con objeto de alcanzar estructuras más ligeras y por consiguiente menores costos en la fabricación de los módulos de captación (figura 2.4.6).

2.4.1.4.1.1.4 Mecanismo de control de seguimiento. El mecanismo de seguimiento solar para los sistemas termosolares de concentración puede ser en uno o dos ejes. El primero es el más común para los canales parabólicos. El movimiento del eje de giro está orientado en el eje este-oeste para una colocación del concentrador en dirección al eje norte-sur. Si consideramos un seguimiento en dos ejes, el área de apertura se mantiene constantemente en el plano perpendicular a los rayos solares. Sin embargo, el exceso de energía ganada en este tipo de seguimiento parece no compensar el incremento en el costo por concepto de energía para su movimiento y de sistemas de seguimiento más complejos. En la tecnología mostrada, un actuador lineal con servomotor

mantiene el movimiento aparente del Sol en forma automática mediante un sistema de control (figura 2.4.7).



Figura 2.4.6. Superficie reflejante. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).



Figura 2.4.7. Mecanismo de seguimiento solar. (Cortesía del INEEL).

El control electrónico del mecanismo de seguimiento solar controla el movimiento de la estructura de un concentrador solar de canal parabólico, con la finalidad de mantener la superficie reflejante perpendicular a los rayos solares para absorber el máximo de energía solar y convertirla en calor de proceso para aplicaciones industriales (figura 2.4.8).



Figura 2.4.8. Control automático. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).

2.4.1.4.1.1.5 Transporte y uso de la energía térmica. El sistema hidráulico se diseña para cada tipo de aplicación y área de trabajo; está constituido básicamente por tuberías aisladas que conducen el fluido caloportador del receptor hacia los intercambiadores de calor o tanques de almacenamiento (figura 2.4.9), ya sea para producir vapor (para generar energía eléctrica) o para ser almacenado o transportado con miras a su aplicación en algún proceso industrial. Para esto último se requiere un análisis previo a fin de poder diseñar la cantidad de captadores necesarios así como su distribución en el área seleccionada, ya que los captadores se distribuyen en x-filas paralelas de acuerdo con la cantidad de energía captada (figura 2.4.10).

2.4.1.5 Conclusiones. Captador solar de canal parabólico

Los canales parabólicos reflejan la radiación solar y la concentran sobre el receptor que capta la energía. El receptor es una tubería de acero al carbón con un recubrimiento especial encapsulado en un tubo de vidrio, por donde se transporta la energía térmica a través de un fluido caloportador a una temperatura de entre 130 y 280 °C, el cual puede ser envia-

do hacia un intercambiador de calor, almacenado o destinado directamente a alguna aplicación práctica.

Hay una vasta experiencia mundial en la aplicación de los captadores solares de canal parabólico para la generación de potencia eléctrica; sin embargo, aún no se ha explotado suficientemente en el área de la generación de calor de proceso para usos industriales cuando se requieren temperaturas menores a 280°C . El diseño mostrado alcanza temperaturas entre 130 y 280°C , que son las más utilizadas en la mayor parte de los procesos industriales.



Figura 2.4.9. Transporte y almacenamiento térmico. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).



Figura 2.4.10. Captadores solares a concentración de canal parabólico. (Planta Experimental de Secado Solar en Zacatecas).

3

SISTEMAS TERMOSOLARES PARA EL SECTOR RESIDENCIAL Y SERVICIOS

3.1 Sistemas termosolares para el sector residencial y de servicios

Dr. Octavio García Valladares

3.1.1 Acondicionamiento de agua para piscinas

Las piscinas, sean residenciales o de servicios, requieren temperaturas normalmente de 26 a 30 °C.

Los captadores más recomendables para este fin son los captadores planos desnudos (sin cubierta) de materiales poliméricos, debido a que son más económicos, sumamente ligeros y muy fáciles de instalar (estos captadores son muy adecuados para el calentamiento de agua a temperaturas inferiores a los 40 °C). Como se ve en la figura 3.1.1, estos captadores tienen un mejor rendimiento que las otras tecnologías, debido a que la temperatura a la cual se requiere el agua de la piscina es bastante baja comparada con la que se necesita para otro tipo de procesos o servicios. Con lo cual, el gradiente de temperatura suministrado por el sistema solar es de apenas de unos cuantos grados Celsius por encima de la temperatura de la piscina. El rango de uso para piscinas en general en México es para valores en el eje X menores a 0.015 °C/W/m²

(véase la fig. 3.1.1); de tal forma que escogiendo el captador más eficiente y barato se reducirán los costos finales del sistema completo para calentamiento de la piscina. Para valores mayores a la cantidad anterior, la eficiencia de esta tecnología decae drásticamente.

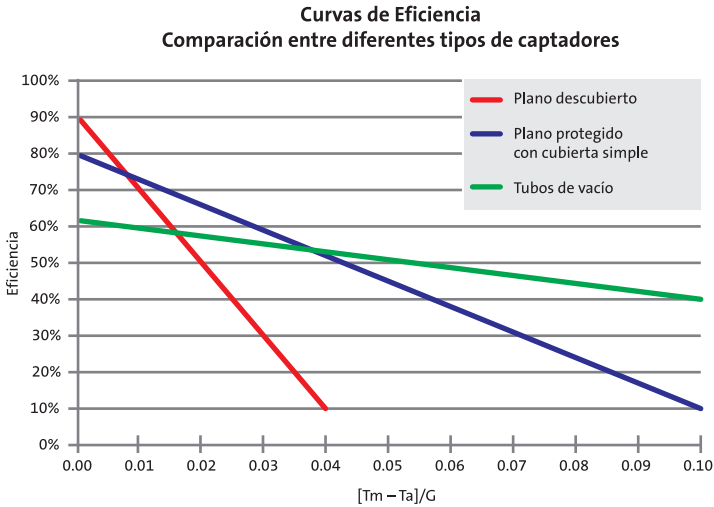


Figura 3.1.1. Eficiencia típica de captadores solares.

Los únicos casos en que se justificaría una tecnología diferente a la de captador plano descubierto en piscina son en zonas de vientos fuertes donde el captador no está protegido por un alerón del mismo techo, o bien en zonas de climas muy extremos en piscinas techadas y cerradas donde se utilice durante todo el año. Lo anterior, previa evaluación de que la aportación de los captadores en la temporada de invierno pueda ser importante y rentable; bajo estas premisas, los captadores planos con cubiertas pudieran ser una buena opción, o bien los tubos evacuados, en los lugares de climas muy extremos.

En la figura 3.1.2 se muestra el diagrama típico de una instalación de captadores solares en una piscina. En gene-

ral, una piscina bien construida y acondicionada cuenta con un sistema de filtrado y recirculación del agua con una bomba. En estos casos y después de un cálculo hidráulico se puede utilizar en varias ocasiones la misma bomba para llevar el agua de la piscina hacia los captadores y retornarla a la piscina. Es indispensable en estos sistemas un control de temperatura que arranque la bomba de forma automática, lo que incrementa la eficiencia del sistema. Los captadores solares se colocan sobre las azoteas de la instalación y se calculan la superficie necesaria del captador en función de las dimensiones de la alberca, las condiciones climatológicas del lugar y de las zonas disponibles no sombreadas de las azoteas. Los captadores descubiertos poliméricos tendrán la inclinación del techo en que se montan, por lo que hay que tener cuidado únicamente de no instalarlas en techos de dos aguas por el riesgo de que queden en dirección opuesta al Ecuador, en cuyo caso no funcionarían de manera adecuada y su rendimiento decaería drásticamente.

En el caso de piscinas es altamente recomendable colocar una cubierta flotante nocturna, ya que durante la noche, cuando las temperaturas decaen, las pérdidas evaporativas a través de su superficie son muy elevadas. La colocación de una cubierta flotante nocturna reduce de manera considerable estas pérdidas, con lo que el sistema solar diseñado en estos casos puede ser de hasta la mitad del tamaño comparado con uno que no cuente con dicha cubierta. Además, la cubierta también reduce considerablemente el requerimiento de cloro y otros productos en la alberca, pues se evaporan también durante la noche, y evita la acumulación de basura u hojarasca.

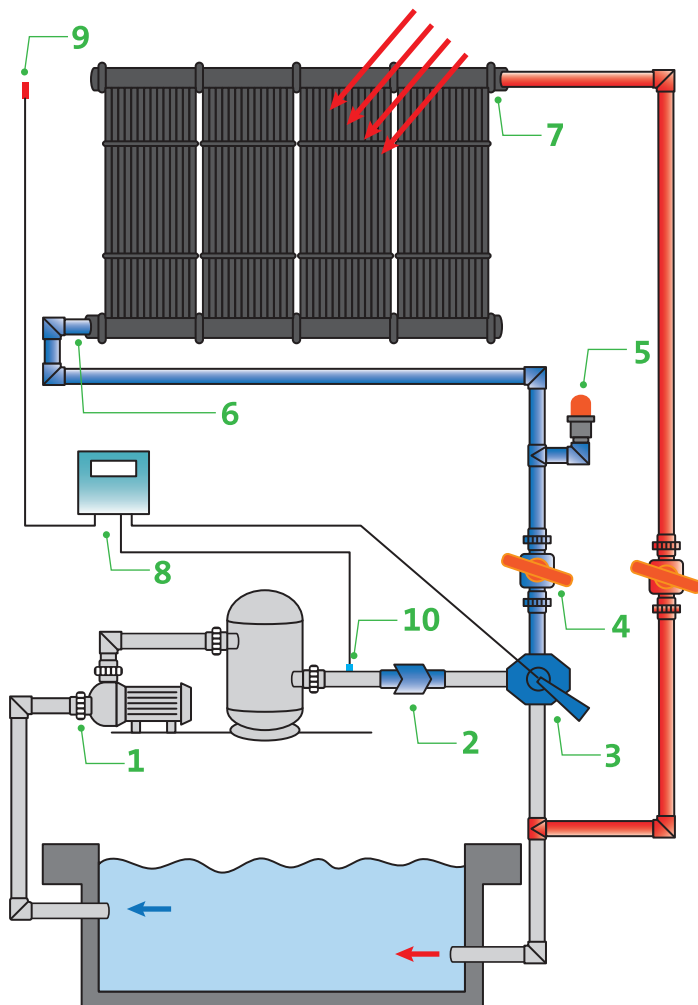


Fig. 3.1.2. Esquema de instalación de un sistema solar en una piscina: 1) bomba de recirculación del sistema solar; 2) válvula check; 3) válvula de tres vías que automáticamente dirige el agua hacia los paneles o recircula hacia el filtro ; 4) válvulas esfera para habilitar o deshabilitar el sistema solar de forma manual; 5) válvula eliminadora de aire; 6) entrada de agua fría a los paneles; 7) salida de agua caliente de los captadores; 8) control diferencial que controla la válvula de tres vías y/o la bomba; 9) sensor de radiación solar; 10) sensor de temperatura en la tubería de agua fría de la piscina.

En general, la utilización de sistemas solares para calentamiento de piscinas puede ser de dos tipos:

Piscina doméstica. En este caso la piscina normalmente no cuenta con un calentador y se diseña el sistema para que el usuario disponga de una temperatura confortable (en general se fija una temperatura de 28 °C). En climas fríos y con piscinas no techadas, la utilización de la piscina se puede reducir a 8 meses. En estos sistemas lo que se le brinda al usuario final es confort y la posibilidad de ampliar el aprovechamiento de su piscina unos 2 meses más, de lo que lo haría si no contara con el sistema solar de calentamiento.

Piscinas comerciales. En este caso la piscina normalmente cuenta con un calentador y se diseña el sistema para que el usuario consiga una temperatura confortable durante todo el año (en general se fija una temperatura de 28 °C). En estos casos, se diseña el sistema solar para que aporte un cierto porcentaje de la energía, el restante lo sigue aportando el calentador que se utiliza principalmente en la temporada de invierno. De esta manera, se diseña para el valor óptimo de este factor solar (normalmente entre 70 y 85%) en función de la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión, comparado contra el costo de los combustibles o la electricidad para un calentador o una bomba de calor. Es imposible diseñar un sistema que pueda dar el 100% de factor solar, ya que sería muy costoso, y aún así no cumpliría su objetivo en el caso de que se presenten varios días consecutivos nublados.

Las instalaciones de calentamiento de agua para piscinas son sin lugar a dudas las más económicamente viables que se pueden realizar con captadores solares. En estas instalaciones, los retornos de inversión son prácticamente en todos los casos inferiores a un año, se pueden reducir aún más si se complementan estos sistemas con cubiertas flotantes para cuando la piscina no está en servicio. Los sistemas no requieren en general de mayor mantenimiento y su arranque y paro es automático mediante un control diferencial.

Las instalaciones de sistemas solares para piscinas son muy habituales en México, tanto para uso residencial como para el comercial. Muestra de esto lo podemos apreciar en las fotografías de la figura 3.1.3.



Fig 3.1.3. Instalaciones de sistemas solares para piscinas. (Fotos cortesía de Módulo Solar S.A de C.V).

3.1.2 Calentamiento de agua para uso sanitario

Existen dos grandes ramas para el calentamiento de agua con fines sanitarios, una es la referida al sector doméstico (viviendas unifamiliares o multifamiliares) y otra al sector comercial y de servicios (hoteles, clubes deportivos, hospitales, etc.). En cada una de ellas por lo general se emplean sistemas solares con diferentes configuraciones para el calentamiento de agua.

3.1.3 Calentamiento de agua para el sector doméstico

Para este sector, y para viviendas de clase media y baja en general, los requerimientos de agua calientes no son muy grandes, por lo que pueden cubrirse por lo general con sistemas termosifónicos, ya sea de placa plana o de tubos evacuados (descritos en la sección 2.2). Estos sistemas presentan la ventaja de no requerir una bomba y trabajan de manera automática. Los sistemas más comunes en México, y que pueden en general satisfacer los requerimientos de agua caliente para una familia de entre 3 y 4 personas, son los termosifónicos con tanques termos de 150 litros y un captador solar de aproximadamente 2 m²; en caso de ser mayores los requerimientos de agua, se pueden instalar dos de estos sistemas en paralelo para que proporcionen el doble de capacidad. La instalación típica de estos sistemas se puede ver en la figura 3.1.4; estos sistemas suelen instalarse en serie con el calentador auxiliar (*boiler* o calentador de gas normalmente), con el objeto de que aún en días nublados o cuando aumente la demanda de agua caliente en la vivienda (si hay visitas en casa, por ejemplo) el usuario pueda seguir recibiendo agua caliente sin problemas; así, el ahorro de combustible es notorio y el usuario recibe agua caliente siempre que lo requiera, independientemente de las condiciones climatológicas o de la cantidad de agua caliente que necesite. Es importante también revisar el acoplamiento entre el sistema solar termosifónico y el sistema de respaldo para que su rendimiento sea óptimo. El mejor acoplamiento de los sistemas solares, y por tanto un mayor ahorro, se alcanza con sistemas de rápida recuperación o bien con sistemas instantáneos dotados de control termostático; en caso de usar calentadores de depósito es importante que el termostato se coloque en una posición media o baja para conseguir ahorros significativos del sistema solar (véase figura 3.1.4).

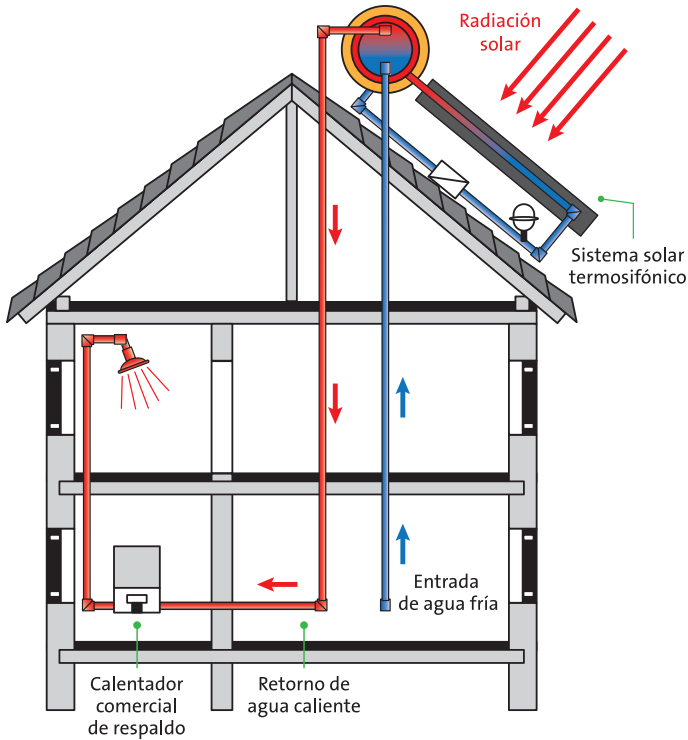


Figura 3.1.4. Instalación típica de un sistema solar termosifónico para vivienda.

Los sistemas termosifónicos se instalan en la azotea de la vivienda cuidando que no queden bajo sombras y de preferencia que el captador solar del sistema esté orientado hacia el Ecuador (nunca en sentido opuesto) con una inclinación igual a la latitud del lugar $\pm 10^\circ$ para lograr la mayor ganancia de energía a lo largo del año. En el caso de que la vivienda cuente con un tanque elevado, es indispensable que el tanque termo del sistema termosifónico esté por debajo de la parte inferior de dicho tanque, para asegurar que en todo momento el sistema solar se encuentra lleno de agua y evitar de esta manera problemas en su funcionamiento.

En México, estos sistemas han probado un retorno de la inversión (derivado de los ahorros que se obtienen en la reducción del consumo de gas LP) en general inferior a tres años, y una vida útil garantizada por más de 10 años, por lo que representan una inversión atractiva.

3.1.4 Calentamiento de agua para el sector comercial y de servicios

Este sector (hoteles, hospitales, centros deportivos, baños públicos, centros comerciales, etc.) en general requiere volúmenes de agua caliente superiores a los 1,000 litros por día, por lo que ya no son recomendables los sistemas termosifónicos, porque resultarían más costosos que instalar un sistema de convección forzada con una bomba acoplada a un conjunto de captadores solares colocados en serie o en paralelo según las necesidades y un termotanque con una capacidad suficiente para los requerimientos de consumo de agua caliente. La figura 3.1.5 muestra un esquema de una instalación típica para este sector.

Los captadores del sistema se instalan en las azoteas cuidando que no queden bajo sombras (y que no se sombreen entre sí) y que estén orientados hacia el Ecuador (nunca en sentido opuesto) con una inclinación igual a la latitud del lugar $\pm 10^\circ$ para lograr la mayor ganancia de energía a lo largo del año. Se requiere un control automático de arranque y paro de la bomba para que el sistema pueda dar la mayor cantidad de energía de acuerdo con los requerimientos de volumen y temperatura de agua caliente. Al igual que en el caso de los sistemas domésticos, estos sistemas tienen que ir conectados en serie a una caldera o calentador de respaldo con el objetivo de que el usuario final disponga siempre de agua caliente para los requerimientos que se le puedan presentar.

En estos sistemas es muy importante diseñar con cuidado la red hidráulica para asegurar que el flujo de agua se reparte equitativamente entre todos los captadores, ya que en caso

contrario se reduce por un lado la eficiencia del sistema y por el otro se corre el riesgo de que a causa del bajo flujo en algunas zonas se alcancen temperaturas de evaporación que aumenten la presión y hagan reventar las tuberías. Debido a su tamaño y peso (superior en general a una tonelada), los termotanques de este tipo de sistemas se instalan generalmente en el piso dentro de un cuarto de máquinas donde también se encuentra la bomba y los calentadores de respaldo o la caldera.

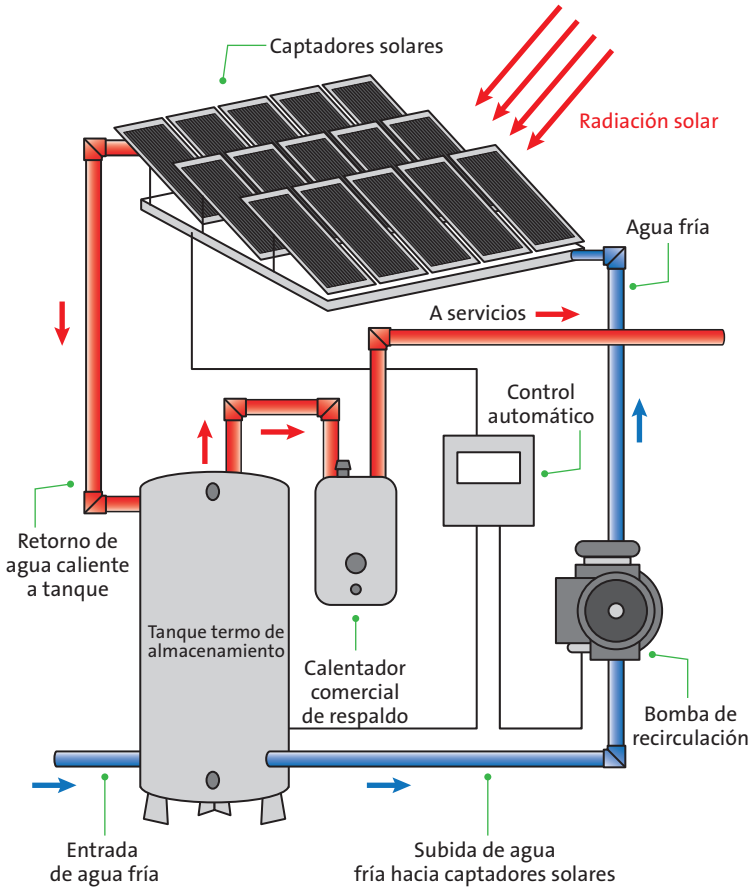


Figura 3.1.5. Instalación típica de un sistema solar de convección forzada para el sector comercial.

Para este sector, el sistema solar se diseña para que aporte un cierto porcentaje de la energía, el restante lo sigue aportando la caldera o calentador de respaldo, en función de los requerimientos de agua caliente (cantidad de litros y temperatura deseada), verificando si estos consumos son más o menos constantes o presentan una estacionalidad marcada (como en el caso de los hoteles en temporadas vacacionales). Se diseña generalmente para el valor óptimo de este factor solar (normalmente entre 70 y 85%) en función de la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión, comparado contra el costo de los combustibles para una caldera o un calentador de respaldo. Es imposible diseñar un sistema solar que pueda dar el 100% del factor solar, ya que sería muy costoso, y aún así no cumpliría su objetivo en el caso de que se presenten varios días consecutivos nublados.

En México, estos sistemas han probado un retorno de la inversión (derivado de los ahorros que se obtienen en la reducción del consumo de combustible) en general inferior a tres años, y una vida útil garantizada por más de 10 años, por lo que representan una inversión atractiva.

En la figura 3.1.6 se muestran fotografías de instalaciones típicas en el sector comercial y de servicios.

3.1.3. Sistemas de climatización de espacios del tipo termohidrónico (radiadores, pisos, paredes y techos radiantes)

Aunque debido a las condiciones climatológicas no son muy habituales en México (salvo en zonas frías, como el norte del país en temporadas invernales), los sistemas solares se pueden utilizar también para el calentamiento de espacios. La figura 3.1.7 muestra un esquema típico de un sistema de climatización solar del tipo termohidrónico, como es el caso del calentamiento de agua para el sector servicios. Se cuenta en general con un sistema solar de convección forzada con una bomba y bancos de captadores solares, planos o de tubos evacuados,

así como un termostanque de almacenamiento de agua caliente y un circuito adicional para acondicionar el espacio deseado, consistente en otra bomba y, dependiendo del caso, pisos, paredes o techos radiantes, o bien, radiadores.



Fig. 3.1.6. Instalaciones de sistemas solares para sector servicios. (Fotos cortesía de Módulo Solar S.A de C.V).

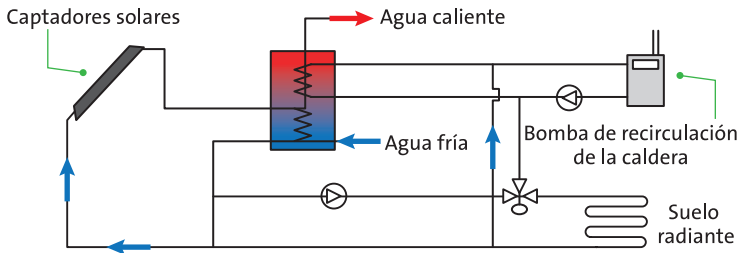


Fig 3.1.7. Sistema de climatización solar del tipo termohidrónico.

En el caso de los sistemas con radiadores (figura 3.1.8a), el agua caliente que pasa por ellos se encuentra normalmente a una temperatura entre 70 y 90 °C con lo que el sistemas solar debe considerar estas temperaturas de uso y diseñarse para que los captadores solares tengan una eficiencia adecuada en este rango de condiciones de operación (los tubos evacuados pueden ser una buena opción para este caso).

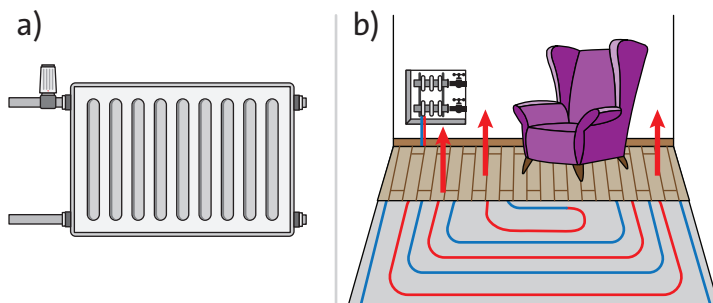


Fig 3.1.8. Dispositivos para climatización termohidráulica: (a) radiadores; (b) pisos radiantes.

En el caso de pisos radiantes (más comunes en comparación con paredes o techos), que actúan como un emisor de calor de gran extensión (figura 3.1.8b), hay normas que limitan la temperatura del suelo a 28 o 29 °C (por comodidad de los usuarios), por lo que se requieren temperaturas de agua caliente no muy elevadas, pero, en contraparte, se requieren grandes cantidades de agua para cumplir esta función de manera correcta. La ventaja de este tipo de sistemas comparados con los de radiadores es que su menor diferencia de temperatura respecto al ambiente, reduce considerablemente las pérdidas de calor del local al exterior sin disminuir las comodidades térmicas. Adicionalmente, produce menos viento que los de tipo radiador, y logra una temperatura del recinto más uniforme. Cuando se requieren temperaturas de agua caliente de sólo 30 a 45 °C es muy recomendable acoplar estos

sistemas con los solares, dado que los captadores solares son muy eficaces para producir estas temperaturas.

La desventaja fundamental de los sistemas radiantes es que se deben planear con antelación, ya que no se puede adaptar a lugares ya existentes, y se tiene que cuidar que no existan asentamientos que puedan dañar la tubería y producir fugas, muy difíciles de encontrar.

Otra desventaja de estos sistemas es que su rendimiento cae notablemente con bajas temperaturas ambientales, por lo que cuando más calor se necesita (días fríos) el rendimiento es menor y normalmente coinciden con los días más cortos del año (cuando es menor la irradiancia), por lo que es obligatorio conectarlos en serie con un sistema de respaldo convencional para asegurar el confort del recinto en todo momento.

Dado que en épocas cálidas los captadores siguen generando calor y las necesidades de climatización termohidráulica del recinto disminuyen considerablemente o desaparecen, es conveniente diseñar este tipo de sistemas para que provean agua caliente a servicios o procesos, o bien, que puedan operar un sistema de refrigeración por absorción para producir frío en épocas cálidas.

Estos sistemas, al igual que los descritos anteriormente, se deben diseñar cuidadosamente para ver el porcentaje óptimo del factor solar, disminuir el plazo de retorno de la inversión y, en caso de destinarse únicamente a la climatización termohidráulica, determinar los meses reales de uso y así evaluar confiablemente el plazo de recuperación de la inversión. De preferencia se debe buscar, para amortizar el capital lo antes posible, que el calor generado por el sistema solar se aproveche durante todo el año, es decir, que en épocas en que no se requiera este sistema, opere otro sistema que use agua caliente.

3.2 Climatización de espacios

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

3.2.1 Introducción

El aire es un fluido natural que puede transportar calor, está disponible y hasta ahora no cuesta, no presenta problemas de corrosión ni requiere sistemas para evitar la congelación, y las posibles fugas no representan ningún peligro comparado con otros sistemas; sin embargo, sus propiedades termofísicas no son favorables y presenta problemas técnicos para su almacenamiento térmico.

El aire puede crear condiciones de bienestar al climatizar los espacios con calentamiento, enfriamiento o simplemente renovación del ambiente climatizado. Cabe destacar la extensión de sus aplicaciones al acondicionamiento controlado de espacios en las agroindustrias, acondicionamiento de incubadoras, criaderos de aves y reptiles, climatización de establos y de espacios destinados a animales de zoológicos que requieran un control térmico.

El aire se puede calentar con energía térmica solar de dos maneras básicas: directa, conduciéndolo al interior de un captador solar, que puede ser plano o evacuado, o indirecta, utilizando agua proveniente de un captador solar de agua, la cual intercambia calor con el aire por medio de un intercambiador de calor aire-agua, como ocurre con los sistemas de calentamiento del tipo termohidrónico (véase el apartado 3.1.3)^{1,2}.

3.2.2 Sistemas de calentamiento de aire para la climatización

Los sistemas de calentamiento solar de aire, SCSAi, presentan algunas ventajas: en el calentamiento de edificaciones pueden formar parte de la propia estructura, y así servir como medio de almacenamiento térmico, pudiendo crear una envolvente caliente cuando no haya suficiente radiación solar, y facilitar

su distribución, tanto si se requiere enfriamiento en verano como calentamiento en invierno. Estos sistemas se controlan con relativa facilidad por medio de ventiladores que pueden impulsar o succionar el aire e integrarse a un sistema convencional de calentamiento, aire acondicionado y ventilación. Una ventaja adicional es que los SCSAi calientan rápidamente cuando incide la radiación solar.

Sin embargo presentan algunos inconvenientes, como la necesidad de grandes secciones transversales de flujo para mover los enormes volúmenes de aire caliente requeridos, si bien el consumo de energía eléctrica se puede minimizar reduciendo desde un principio las pérdidas de presión. Se deben prever los problemas de ruido que generan las altas velocidades del aire y disminuir el ingreso de polvo, insectos, partículas y humedad, mediante filtros adecuados que no provoquen una caída de presión importante³.

3.2.2 Sistemas de calentamiento solar de aire^{3,4}

Existen varios. A continuación se describen algunos sistemas típicos.

3.2.2.1 Tipo A: SCSAi con ventilación

Este tipo de sistema de calentamiento es el más común, más económico y el de mayor superficie instalado en el mundo. En el verano, su funcionamiento se basa en introducir por medio de la convección natural o forzada un cierto flujo de aire a través de un captador solar y distribuirlo uniformemente en el espacio programado y ventilarlo adecuadamente. Este sistema es muy eficiente porque el captador solar siempre está recibiendo aire frío. La figura, 3.2.1, representa de manera esquemática este tipo de sistema.

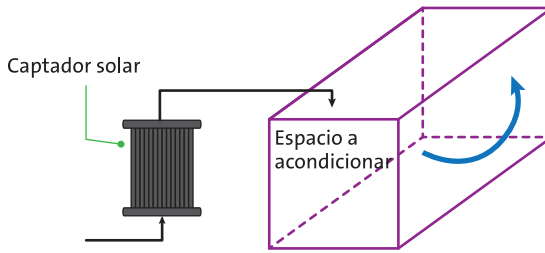


Figura 3.2.1. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo A.

3.2.1.2 Tipo B

En este sistema, inventado por Bara Constantini, el aire contenido en el espacio que se va a climatizar se envía hacia los captadores solares, en donde se calienta, y regresa al espacio, a un techo que funciona como almacén térmico (esta circulación ocurre por convección natural) y que radia calor después del atardecer. En la época de verano el captador puede ventearse de la parte alta hacia afuera, extrayendo el aire del espacio, el cual puede entonces reemplazarse por aire más frío desde un sumidero de calor terrestre o una ventana orientada hacia el norte. La figura 3.2.2., representa un sistema basado en la invención de Constantini.

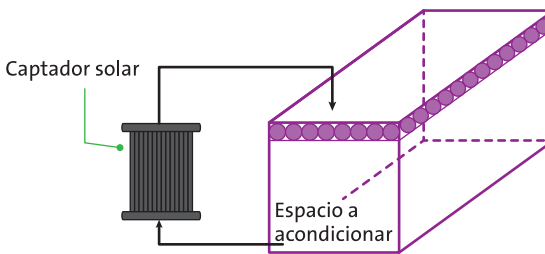


Figura 3.2.2. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo B.

3.2.1.3 Tipo C. Circulación de aire caliente en cavidades de la fachada

En este caso se hace circular aire caliente en una cavidad de la fachada del edificio, donde se obtiene una reducción importante de las pérdidas térmicas a través de la fachada. Debido a que el aire de retorno al captador está relativamente más frío, el sistema de calentamiento solar es más eficiente. En verano, el flujo puede desviarse de los captadores hacia un intercambiador de calor aire-agua para permitir también el calentamiento de agua de uso doméstico. La figura 3.2.3 presenta un diagrama esquemático de este sistema.

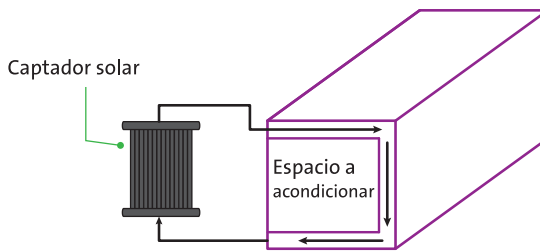


Figura 3.2.3. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo C.

3.2.1.4. Tipo D. Calentamiento, almacenamiento y disipación

Este sistema consiste en un circuito primario de calentamiento de aire solar que se conecta con un sistema de almacenamiento térmico y con uno de descarga de calor radiante hacia el espacio que se va a climatizar. El aire caliente se hace circular a través de un campo de canalizaciones colocado en el piso o en el techo, el cual radia calor al espacio. Una ventaja de este sistema es que tiene una gran área de superficie radiante. La integración de un ventilador mejora la eficiencia de la energía suministrada. Este sistema se aplica en edificaciones con áreas suficientemente grandes para instalar las superficies radiantes. La figura 3.2.4 representa esquemáticamente este sistema. La versión de calentamiento

radiante utilizando un intercambiador aire-agua fue descrita en el sección 3.1.3.

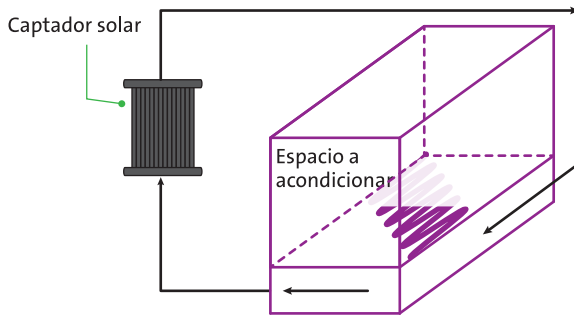


Figura 3.2.4. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo D.

3.2.1.5 Tipo E

Este sistema es similar al tipo D, con la diferencia de que algunos ductos separados en el almacenamiento permiten un mejor control activo de la descarga, además de que el almacenamiento puede mejorar su aislamiento y descargar a más altas temperaturas y en el momento que se requiera. El almacenamiento se puede ubicar a distancia del espacio que se va a calentar. Muy pocas edificaciones han adoptado este sistema, básicamente por el alto costo que implica. La figura 3.2.5 representa este tipo de sistema de calentamiento.

3.2.1.6 Tipo F

Este calentador incluye un sistema de transferencia de calor del aire al agua. El aire se pasa a través de un captador solar y luego transfiere su calor al agua por medio de un intercambiador aire-agua. El agua caliente puede entonces enviarse a través de radiadores convencionales, pisos, muros y zoclos radiantes o dirigirse a un tanque de agua caliente de uso doméstico. Este sistema está representado en la figura 3.2.5.

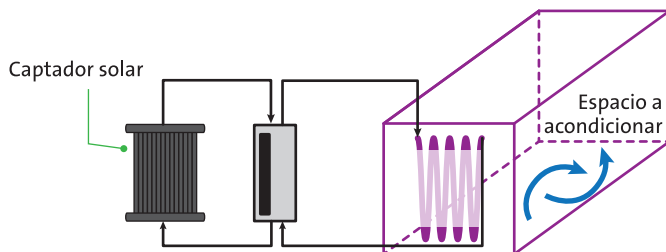


Figura 3.2.5. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo E.

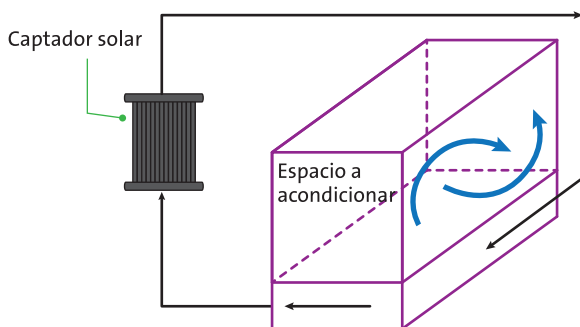


Figura 3.2.6. Sistema de calentamiento solar de aire del tipo F.

3.3 Almacenamiento térmico

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

El almacenamiento del aire caliente presenta dificultades, debido principalmente a las propiedades térmicas del aire en comparación con las del agua. En este caso se trata de acumular el calor ganado durante el día para disponer de él en un tiempo posterior. La energía almacenada se alcanza cuando se incrementa el calor interno del fluido y por lo general los tiempos de almacenamiento son cortos.

El tipo de almacenamiento se puede establecer bajo criterios de masa, capacidad, temperatura y estado físico. Los sistemas de almacenamiento se pueden integrar en el circuito del captador directa o indirectamente, por medio de la trans-

ferencia de la energía solar obtenida por el aire al sistema de calentamiento de agua. Se pueden clasificar además por el tipo, material y forma en que se carga y descarga. El almacenamiento se puede integrar en los mismos materiales de construcción del edificio o de forma separada. En el primer caso, en los muros externos e internos, en techos o pisos a través de o sobre los cuales fluye el aire caliente, de tal suerte que los materiales de los componentes mencionados actúan como el medio de almacenamiento⁵.

El almacenamiento integrado de forma separada al edificio puede tener diferentes configuraciones y se sugiere que esté lo más cercano posible para minimizar las pérdidas de calor. Por razones de costos, sin embargo, con frecuencia se colocan en la bodega. La ventaja del sistema separado es que es fácil de remover y la desventaja es su costo adicional.

Los materiales más adecuados para almacenar calor son aquellos en los cuales el producto de la densidad y capacidad térmica tienen valores muy altos: agua, concreto, acero, cerámica, piedra, yeso y arena. Es importante que el material seleccionado no emita ningún tipo de elemento nocivo. Otra forma de almacenamiento recurre a materiales cuyos cambios de fase conservan la energía. Estos materiales de cambio de fase (MCF) por lo general son mezclas de sales cuyo cambio de fase es consistente⁶.

En aplicaciones de climatización en viviendas uni- y multifamiliares se han desarrollado sistemas que utilizan ciertas variedades de piedras como medio de almacenamiento térmico en climatización solar: durante el día se calientan con el aire proveniente de un sistema solar y en la noche se hace pasar aire fresco que recupera parte del calor acumulado y se introduce al espacio que se va a climatizar.

Referencias

1. Duffie, John A., William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.
2. S. Robert Hastings, *Solar Air Systems-Built Examples*, IEA, James & James, 1999.
3. Steve Kornher and Andy Zaugg, *The Complete Handbook of solar Air heating systems*. Rodale Press, Emmaus Pa., 1983.
4. S. Robert Hastings, Ove Morck, *Solar air systems, A Design Handbook*, IEA, Solar Heating and Cooling Programme, Flat Plate air collectors, 2000.
5. Abhishek Saxena and Varun Goel, “Solar Air Heaters with Thermal Heat Storages”, *Chinese Journal of Engineering*, Volume 2013, Article ID 190279, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/190279> , 2013.
6. M. M. Alkilani, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. Sohif, and M. H. Ruslan, “Review of solar air collectors with thermal storage units,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1476–1490, 2011.

4

SISTEMAS TERMOSOLARES PARA EL SECTOR INDUSTRIAL

4.1 Aplicaciones en el sector agroindustrial y pecuario: sistemas acuícolas, criaderos y acondicionamiento de biodigestores

Dr. Víctor Manuel García Saldívar

M. en C.I. Adriana Elizabeth González Cabrera

4.1.1 Introducción

En general, los sistemas acuícolas, de criaderos de aves y el acondicionamiento de digestores son sistemas que incrementan su rendimiento en la medida en que aumenta su temperatura de operación, incluso puede estar directamente relacionado con la incidencia de la radiación solar como promotor de crecimiento, como en el caso de la producción de organismos vegetales. Es conocido que en muchas latitudes, sobre todo en aquellas con climas extremos, las condiciones naturales (bajas temperaturas, fuertes vientos o ambos factores) no favorecen las actividades del sector agroindustrial y pecuario, sino que incluso las pueden llegar a inhibir notablemente. Para mejorar las condiciones de producción de los sistemas de referencia, es necesario acondicionar los espacios destinados a tal fin, proveyéndolos de energía térmica y en algunos casos

encapsulándolos (tipo invernadero) para hacer más eficiente el suministro de energía.

Las fuentes tradicionales de energía térmica han sido la biomasa, a través de la quema de leña y desechos agrícolas, la geotermia en los sitios en los que se dispone de tal recurso, pero fundamentalmente la quema de algún hidrocarburo (diésel, combustóleo o gas).

El uso de la radiación electromagnética proveniente del Sol que incide sobre la la Tierra, a fin de suministrar energía térmica, total o parcialmente, constituye un sistema termosolar. Estos sistemas tienen cada vez más amplias y variadas aplicaciones industriales; por ejemplo, en los años recientes se han instalado¹ en promedio 44 GWt¹ por año para alcanzar un total instalado en 2013 de 374.7 GWt¹ en el mundo. Lo anterior gracias a que estas tecnologías son capaces de entregar agua de proceso de hasta 260 °C, o superiores si se requiere generar electricidad por esta vía, particularmente en el sector agropecuario, tanto para incrementar la producción, como en procesos industriales asociados al incremento de su valor comercial.

El control adecuado de los distintos parámetros para cada aplicación (el aporte alimenticio y el control estricto del medio de cultivo), incluida la temperatura idónea, permitirá el tránsito de un sistema de producción extensiva a uno intensivo, caracterizado por una alta concentración de individuos, una producción más abundante y un mayor rendimiento económico.

4.1.2 Sistemas acuícolas

La acuicultura puede entenderse como la actividad que permite la producción de organismos acuáticos, ya sea animales o vegetales, cuya reproducción, crecimiento y desarrollo depende fundamentalmente del agua, medio en que pueden vivir parcial o totalmente. Se requieren sitios adecuados, con abastecimiento de agua suficiente (en cantidad y calidad), temperaturas óptimas, y por supuesto la nutrición adecuada y un

plan de prevención de enfermedades, todo ello en función de la especie que se cultive.

De los anteriores requerimientos, el tema importante en esta sección reside en las temperaturas óptimas y la fuente energética requerida para lograrla y mantenerla.

Se sabe que el desarrollo de cultivos acuícolas es óptimo a temperaturas que van de los 15 °C a los 35 °C, es decir, entre 5 °C y hasta 25 °C superiores a las del medio ambiente, por lo que se requiere implementar medidas para mantener la temperatura óptima lo más constante posible, lo cual se puede lograr mediante protecciones reductoras de pérdidas de energía (y de evaporación), o mediante sistemas de calentamiento externos (convencionales o renovables) o, lo que es mejor aún, por la combinación de ellos.

En los sistemas acuícolas protegidos (figura 4.1.1) se gana energía proveniente de la radiación solar de manera directa mediante domos poliméricos transparentes o semitransparentes, y es posible aumentar esa ganancia con ayuda de sistemas de calentamiento solar de agua de recirculación de las tinas de cultivo, con lo que se puede reducir notablemente el consumo de la energía convencional. Estudios detallados muestran ahorros energéticos de hasta un 87% para climas templados y hasta un 67% para climas fríos² con el solo uso de una doble capa de polietileno (efecto invernadero). Dichos ahorros de energía serán mayores aún si se combina el sistema de efecto invernadero con uno de calentamiento solar del agua de recirculación, los que son directamente proporcionales al área de captadores usado.

4.1.3. Criaderos

El aprovechamiento de la energía solar para calentar el agua destinada al procesamiento de los productos de criaderos de ganado ha crecido notablemente. Estudios recientes y profundos han mostrado la rentabilidad de calentadores solares de agua en el sector de sacrificio de animales de abasto y sumi-

nistro de productos y subproductos cárnicos³, en los que se requiere agua de proceso a temperaturas de hasta 90 °C, aunque en la mayoría de las etapas se requieren sólo 60 °C, principalmente en las de escaldado y depilado, evisceración, lavado de canales, así como en la limpieza diaria y periódica de mesas y espacios del establecimiento en general.

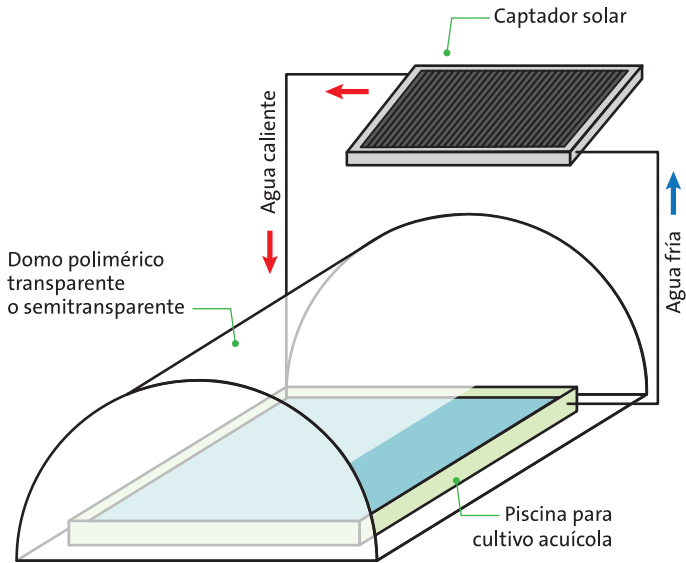


Figura 4.1.1. Diagrama de piscina para cultivo acuícola protegida con domos poliméricos, acondicionada con captador solar.

Un producto importante de criaderos de ganado es la leche, que requiere forzosamente procesos térmicos para su purificación (disminución o eliminación de la carga microbiana), conservación y comercialización. En particular, considerando que la temperatura de los procesos térmicos de la leche son inversamente proporcionales al tiempo de aplicación, se requieren temperaturas de hasta 65 °C para aniquilar el bacilo tubérculo, de hasta 75 °C para eliminar la fosfatasa alcalina, de hasta 83 °C para perder el 5% de las proteínas del suero, y de hasta 89 °C para destruir la peroxidasa⁴. Asimismo, se requieren temperaturas² de 71 °C a 72 °C para la pasteuriza-

ción de alta temperatura (HTST), y de 85 °C a 90 °C para la pasteurización instantánea, de hasta 150 °C para leches esterilizadas y leches de ultra alta temperatura (UHT).

Respecto al procesamiento de productos cárnicos, la fabricación del jamón y otros productos incluyen, entre otras, una etapa de cocción en la que se requieren temperaturas de entre 60 °C y 70 °C².

Las aplicaciones industriales de referencia, asociadas al procesamiento de cárnicos provenientes de criaderos, requieren una fuente de energía térmica, que puede ser proporcionada principalmente por las tecnologías solares con almacenamiento descritas previamente (figura 4.1.2), acopladas a sistemas convencionales para suplir eventuales faltantes.

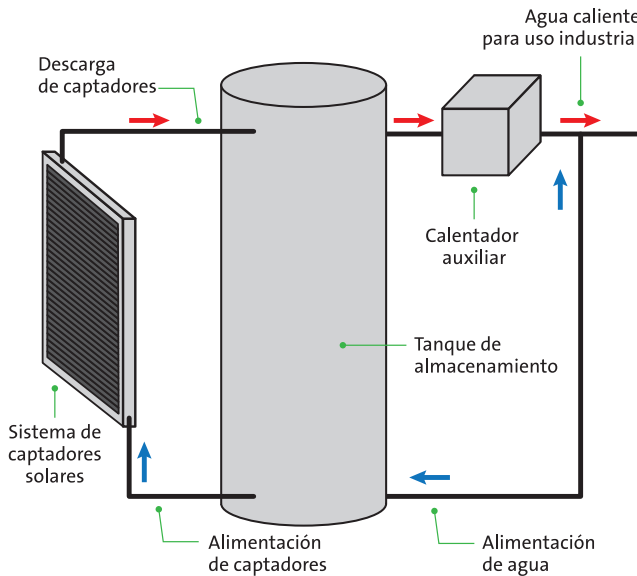


Figura 4.1.2. Diagrama de un sistema de calentamiento solar con almacenamiento y calentador auxiliar para uso industrial.

4.1.4. Acondicionamiento de biodigestores

Un biodigestor es un dispositivo que mediante la digestión anaeróbica microbiana transforma materia orgánica, ya sea de origen animal o vegetal, en biogás, que consiste en 40-70% de

metano (CH_4), 30-60% de dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas proporciones de otros gases, como hidrógeno (H_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) principalmente. El biogás es un combustible mediante cuya combustión controlada es posible obtener energía térmica, energía eléctrica o, en el mejor de los casos, ambas (cogeneración), con lo que se eleva la eficiencia energética del sistema productor de energía.

La **biodigestión** de materia orgánica se desarrolla fundamentalmente en tres etapas: a) **hidrólisis**, que es la transformación de macromoléculas orgánicas (carbohidratos, lípidos y proteínas) en moléculas más sencillas (amilasa, lipasa o proteasa), mediante bacterias hidrolíticas; b) **fermentación**, que consiste en la transformación de los productos de la hidrólisis en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por *acidogénesis* (*bacterias acidogénicas*), así como ácidos grasos que son transformados en los anteriores por *acetogénesis* (*bacterias acetogénicas*), y c) **metanogénesis**, en la que principalmente el ácido acético (otras fuentes pueden ser el metanol y el ácido fórmico) se transforma en metano por la acción de las bacterias metanogénicas, obteniendo finalmente el biogás deseado.

En general, el desarrollo de la biodigestión en sus distintas etapas requiere el control de varios parámetros físicoquímicos, principalmente la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno, así como los nutrientes y la toxicidad, entre otros. De estos parámetros, el adecuado control de la temperatura determina la eficiencia del biodigestor. Se reconocen tres grupos bacteriales metanogénicos, que se distinguen por el intervalo de temperatura de máxima actividad: psicrófilas (menores de $20\text{ }^\circ\text{C}$), mesófilas (entre $20\text{ }^\circ\text{C}$ y $40\text{ }^\circ\text{C}$) y termófilas (superior a $40\text{ }^\circ\text{C}$ y hasta cerca de $70\text{ }^\circ\text{C}$); estas bacterias son muy sensibles a cambios bruscos de temperatura. La mayor parte de los biodigestores operan hoy día con las bacterias mesófilas o termófilas, casos en los que se requiere una fuente de energía externa para acondicionar el biodigestor y mantener la temperatura lo más cons-

tante posible en el punto de máxima actividad para aumentar la eficiencia en la producción de biogás.

Dado que la temperatura máxima requerida para el acondicionamiento de sistemas biodigestores son del orden de los 70 °C, ésta puede fácilmente ser suministrada por la energía solar, mediante tecnologías solares de baja temperatura (descritas previamente en el texto), específicamente captadores planos (entre otros), como se ilustra en la figura 4.1.2 de la sección anterior. Cabe señalar que es indispensable contar con sistemas de almacenamiento de energía térmica para garantizar su disponibilidad durante las horas de ausencia del recurso solar. El fluido de trabajo recomendado para el circuito de calentamiento solar es el agua, por sus propiedades térmicas, su bajo costo, su alta disponibilidad y gran estabilidad química.

El acondicionamiento térmico solar de los sistemas de biodigestores representa una oportunidad inmejorable de producción de biogás, sobre todo en los lugares donde abunde la biomasa de origen animal o vegetal —que suele significar un problema hasta de orden sanitario para la población— y, desde luego, niveles aceptables de energía solar. En el tema energético, el biogás es una fuente de energía de menores emisiones tóxicas que la quema directa de la biomasa, brinda la oportunidad de disponer del energético en lugares donde no estaba disponible; con él se puede proporcionar energía térmica hasta para generar electricidad, para algunos procesos industriales y semiindustriales de productos agropecuarios, incluida la cocción de alimentos, entre otras muchas de sus posibles aplicaciones.

La biodigestión de materia orgánica permite reciclar y valorar residuos; sus productos son esencialmente un energético, el biogás, y fertilizantes, los residuos líquidos y sólidos (llamado biol); con ello no sólo se evita contaminar el suelo y cuerpos de agua, sino que se nutre el propio suelo. Asimismo, se reconoce que el uso del biogás reducirá el consumo de leña, disminuyendo con ello la deforestación de carácter antropogé-

nico. Otros beneficios pueden ser la disposición descentralizada de plantas de generación de energéticos, la reducción de problemas de salud e higiene, el ahorro en gastos médicos, en costo de combustible, en tiempo, y la posibilidad de generar otras actividades productivas derivadas del uso del biol, como insumo para la acuicultura, mejora de alimentos para ganado, etc. La figura 4.1.3 presenta un corte transversal de un biodigestor, en donde se aprecia la carga de materia orgánica, la zona de digestión con la acumulación del biogás generado y la zona de producción del biometano, que resulta más estabilizado y sin olor. En el proceso se produce agua, la cual puede aprovecharse para riego.

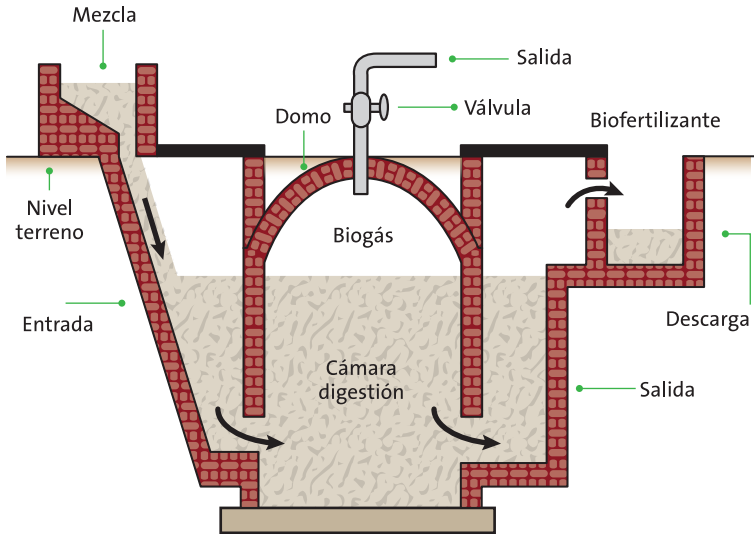


Figura 4.1.3. Corte transversal de un biodigestor.

Las aplicaciones de la energía solar están aumentando permanentemente en todo el planeta. Hoy día no sólo es deseable sino una necesidad imperiosa. Existen las tecnologías para proveer de energía térmica tanto a procesos domésticos como industriales, en los distintos intervalos de temperatura requeridos.

La industria solar debe ser la mejor opción⁵ para la demanda energética presente y futura, dado que ésta es superior en términos de disponibilidad, rentabilidad, accesibilidad, capacidad y eficiencia, comparada con las otras fuentes renovables de energía. Las políticas mundiales actuales favorecen¹ en general todas las aplicaciones solares, sobre otras opciones de energías renovables.

Adicionalmente, casi todas las aplicaciones domésticas e industriales requieren energía eléctrica, que podría ser suministrada a partir de la fuente solar mediante sistemas fotovoltaicos.

Referencias

1. Annual Reporting on Renewables: Ten years of excellence, RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf.
2. R.J. Fuller, “Solar heating systems for recirculation aquaculture”, *Aquacultural Engineering*, 36, 2007, pp. 250-260.
3. Yi-Mei Liu, Keh-ChinChang, Wei-MinLin and Kung-MingChung, “Solar thermal application for the livestock industry in Taiwan, Case Studies”, *Thermal Engineering* 6, 2015, pp. 251-257.
4. Romain Jeantet, Thomas Croguennec, Pierre Schuck y Gérard Brulé, *Ciencia de los Alimentos (Bioquímica-Microbiología-Procesos-Productos)*, Editorial ACRIBA, España, 2007, ISBN 978-84-200-1149-3.
5. Nadarajah Kannan, Divagar Vakeesan, Solar energy for future world: -A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 2016, pp. 1092-1105.

4.2 Esterilización de instrumentos, suelos y la detoxificación de efluentes utilizando captadores solares de concentración

Dr. Álvaro Zamudio Lara

4.2 1 Resumen

La energía termosolar está creciendo e innovando en la actualidad. Se puede mirar hacia el futuro más allá de las aplicaciones tradicionales de electricidad residencial, hacia aplicaciones más innovadoras para el sector industrial. Entre estas aplicaciones sobresale el calor de proceso solar como un método inteligente y productivo para sacar el máximo partido de esas tecnologías, ya que existen muchas industrias con grandes necesidades de procesos térmicos de alta temperatura, por ejemplo en esterilización, calderas, calefacción, para frío por absorción, entre otras. Los sistemas de energía solar térmica de concentración producen calor o electricidad mediante cientos de espejos que concentran los rayos del Sol a unas temperaturas que oscilan entre 400 y 1,000 °C. Existe una gran variedad de formas de espejos, métodos de seguimiento solar y de generar energía útil, pero todos ellos funcionan bajo el mismo principio. Los canales parabólicos y los sistemas de concentradores lineales de Fresnel son los más idóneos para la captura de calor para procesos industriales. Dentro de las aplicaciones en procesos industriales de este tipo de concentradores lineales se encuentra la esterilización de instrumentos, la esterilización de suelos, así como la detoxificación de efluentes con captadores solares de concentración.

4.2.1 Introducción

Luchar contra el cambio climático es primordial, así que es esencial que la generación de energía deje de emitir CO₂ tan pronto como sea posible. Se ha venido investigando desde hace unos años que la energía solar térmica de concentración

es una forma viable desde el punto de vista comercial de generar electricidad limpia a gran escala.

En un estudio auspiciado en 2008 por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se determinaba que en algunos sectores industriales, como la alimentación, vino, bebidas, equipo de transporte, maquinaria, textil o industria de papel, requieren alrededor de un 27% de calor a temperatura media (100-400 °C) y un 43% a temperatura superior a 400 °C¹.

La energía solar termoeléctrica, también conocida como energía solar de concentración, produce calor para generar electricidad mediante espejos que concentran los rayos del Sol a una temperatura típicamente entre 400 y 1,000 °C. Hay una variedad de formas especulares, métodos de seguimiento solar y formas de proporcionar energía útil, pero todos ellos trabajan bajo el mismo principio: la conducción de un motor térmico, por lo general una turbina de vapor, para generar electricidad que puede ser inyectada en la red².

Los canales parabólicos y los sistemas de concentradores lineales de Fresnel son los más idóneos para la captura de calor para procesos industriales con las especificaciones de temperatura necesarias para éstos. Pueden considerarse una opción económica para su instalación *in situ* en una extensa variedad de tipos de industrias que requieren calor a temperaturas de media a alta. El estudio de la AIE recomendaba que los sectores más compatibles con el calor de proceso de la tecnología de concentración solar son el de alimentos, textil, de equipo de transporte, de plásticos, químico, de tratamiento de metales, y que estos sistemas son más idóneos en aplicaciones y procesos que incluyen limpieza, secado, evaporación, destilación, pasteurización, esterilización, cocinado, fusión, pintura y tratamiento superficial³.

Los concentradores lineales de Fresnel (LFR) han atraído crecientemente la atención ya que son una tecnología cuyo rendimiento óptico y térmico es menor, pero que requiere

menos inversión, así como menores costos de operación y de mantenimiento.

El funcionamiento del sistema general consiste en una radiación solar que incide sobre los espejos dispuestos en la parte inferior del concentrador. Cada uno de los espejos deberá colocarse en un ángulo adecuado para que la reflexión apunte al foco, ubicado en la parte superior del concentrador; se lleva el agua contenida en el foco hasta una temperatura deseada o bien hasta que se transforme en vapor⁴, que podrá usarse en distintos procesos.

4.2.2 Desarrollo

Dentro de las aplicaciones en procesos industriales de este tipo de concentradores lineales de Fresnel se encuentra la esterilización de instrumentos y la esterilización de suelos⁵. La esterilización es un método de eliminación que asegura la ausencia absoluta de cualquier forma viviente. Una esterilización deficiente o una manipulación incorrecta de materiales y medios de cultivo conlleva contaminaciones, resultados erróneos, pérdida del material biológico, retardo en los procesos de producción industrial y hasta pérdida económica⁶. Actualmente existen diversos modelos para este proceso, enfocados a las necesidades de cada industria, ya sea de alimentos, bebidas, materiales quirúrgicos hospitalarios, industria biológica. Un ejemplo de este proceso es un sistema de esterilización de agua mediante vapor solar, el cual puede convertir gran parte de la energía de la luz solar recibida en calor capaz de exterminar gérmenes. No requiere, por tanto, un abastecimiento convencional de electricidad. La esterilización de suelos es una práctica necesaria para la elaboración de controles abióticos que permitan comparar y evaluar los procesos llevados a cabo por los microorganismos en sistemas biológicos⁷. En estudios de biorremediación de suelos se vuelven necesarios los controles abióticos que indiquen descontaminación por mecanismos diferentes a los biológicos; procesos de tipo

químico y mecanismos físicos como la evaporación, la lixiviación y la adsorción, entre otros⁸.

La esterilización de suelos se ha llevado a cabo por mecanismos diversos; los más utilizados debido a que no dejan residuos químicos son la esterilización húmeda en autoclave de biorremediación en microcosmos⁹ y la irradiación, pero ésta tiene la desventaja de alterar las propiedades del suelo¹⁰. Otros mecanismos son la esterilización de suelos con microondas y en calor seco, o, más común, la esterilización con productos químicos como el nitrato de plata y el cloruro de mercurio, entre otros¹¹.

Otra aplicación es en la detoxificación de efluentes con captadores solares de concentración, por ejemplo la Plataforma Solar de Almería, centro de investigación dedicado a la tecnología solar perteneciente a la institución española CIEMAT, que está desarrollando un programa de investigación y desarrollo en detoxificación solar de aguas¹². Actualmente se desarrolla y se mejora la tecnología solar de detoxificación mediante fotocátalisis, con el fin de lograr un tratamiento eficiente de contaminantes orgánicos persistentes disueltos en agua, procedentes de procesos químicos industriales y del uso intensivo de pesticidas en actividades agrícolas. El proceso de detoxificación mediante fotocátalisis consiste en explotar la parte más energética del espectro solar, como es la radiación ultravioleta (longitud de onda inferior a 385 nanómetros), para promover una reacción de oxidación muy enérgica. Esta reacción ocurre cuando dicha radiación ultravioleta activa un catalizador semiconductor en presencia de oxígeno. En estas circunstancias cualquier otra sustancia (tóxica o no) que se encuentre simultáneamente en el mismo medio es sometida a una enérgica reacción de oxidación. Una característica intrínseca al proceso es la presencia de un catalizador, que normalmente es el dióxido de titanio (TiO_2), producto no tóxico, abundante y barato que se utiliza como pigmento en la fabricación de pinturas. Podemos decir entonces que un sistema fotocatalítico

solar consiste en partículas de semiconductor que, suspendidas en un disolvente, se encuentran iluminadas por radiación solar¹³. Asimismo se desarrolla la tecnología de desinfección de agua para consumo humano mediante procesos fotoquímicos basados en la luz solar; también se desarrollan procesos que permitan una reutilización segura de las aguas que actualmente se están vertiendo al medioambiente. Todo esto se ha dado, ya que en los últimos años la investigación de nuevos métodos para descontaminación y purificación de aguas ha ido evolucionando desde procesos que implicaban un cambio del medio contaminante, como lo es de líquido a sólido en carbón activo, de líquido a gas en el caso de contaminantes volátiles o de sólido a gas mediante combustión y pirolisis, hasta procesos que destruyen químicamente los contaminantes¹⁴. Dentro del proceso de tratamiento de aguas industriales se encuentra una de las metas indispensables de este proceso: la eliminación del color de estos efluentes. En la industria textil la principal fuente de contaminación ambiental son los procesos de estampado de colores y acabados. Los principales contaminantes en los efluentes son sólidos suspendidos (SS), demanda química de oxígeno (DQO), color (moléculas orgánicas de alto peso molecular), acidez o alcalinidad y otras sustancias solubles¹⁵. En el proceso de estampado se estima que se pierde entre el 10 y el 15% del color, que se desecha por el efluente. Todos los contaminantes mencionados pueden ser reducidos o eliminados con los métodos químicos y físicos tradicionales, excepto el color, que no puede ser tratado por esos métodos. Un enfoque ideal sería decolorar y abatir la DQO simultáneamente sin alterar significativamente el ambiente. El agua oxigenada parece ser uno de los químicos ideales para esta tarea porque no es contaminante y una gran proporción de su peso, 47%, está disponible como oxígeno activo.

Como ejemplo, se puede construir un reactor electroquímico para tratar eficientemente un efluente textil mediante la electroproducción de un fuerte oxidante (proveniente del agua

oxigenada). La energía necesaria para el proceso (~1.00 V) es muy poca y puede ser suministrada por captadores solares programados para seguir la trayectoria aparente del Sol. La energía sobrante se almacena en bancos de baterías para ser empleada en otros procesos complementarios. En estas condiciones será posible abatir el color y la DQO de un efluente sintético o industrial tóxico (que contenga 0.24 mm de algún colorante de uso regional) en poco tiempo a precios económicamente competitivos. En este enfoque, es posible minimizar o eliminar los orgánicos contaminantes (no biodegradables) de los efluentes industriales y volver a utilizar una parte importante del agua, mediante su recirculación y conservación.

Referencias

1. Vannoni, Battisti y Drigo, Departamento de Mecánica y Aeronáutica - Universidad de Roma La Sapienza, *Potencial del calentamiento solar en procesos industriales*, auspiciado por el Comité Ejecutivo del programa de Calefacción y Refrigeración Solar de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2008.
2. Solar Thermal Electricity Global Outlook 2016, Project manager & lead authors: Dr. Sven Teske (Greenpeace International), Janis Leung (ESTELA) Co-authors: Dr. Luis Crespo (Protermosolar/ ESTELA), Marcel Bial, Elena Dufour (ESTELA), Dr. Christoph Richter (DLR/SolarPACES) Editing: Emily Rochon (Greenpeace International), 2016.
3. Christoph Richter, Sven Teske y Rebecca Short, *Energía solar térmica de concentración, Perspectiva mundial*, Rebecca Short and The Writer (eds.), Greenpeace International Ottho Heldringstraat 5 1066 AZ Amsterdam, Países Bajos, 2009, pp. 13-15, 30, 35.
4. Singh, R. N., Mathur, S. S., Kandpal, T. C. (1990), "Some Geometrical Design Aspects of a Linear Fresnel Reflector Concentrator", *Energy Research*, 4, pp.59-67.

5. Seminario 2012, Módulo 2: Sistema de concentración lineal de Fresnel, Centro de Energías Renovables CEDER, 2012.
6. Ma. De los Angeles Aquiahuatl Ramos, Tania Volke Sepúlveda, Keiko Shirai Matsumoto, *Manual de prácticas de laboratorio. Microbiología general*, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, 2012.
7. Razavi Darbar, S. y A. Lakzian (2007), “Evaluation of chemical and biological consequences of soil sterilization methods”, *Caspian Journal of Environmental Science*, 5, 87-91.
8. Balba, M. T., N. Al-Awadhi, y R. Al-Daher (1998), “Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation”, *Journal of Microbiological Methods*, 32, 155-164.
9. Bento, F. M., F. A. O. Camargo, B. C. Okeke, y W. T. Frankenberger, “Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation”, *Bioresource Technology*, 96, 2005, pp. 1049-1055.
10. Singh, A., O. P. Ward, y R. C. Kuhad, “Feasibility Studies for Microbial Remediation Hydrocarbon-Contaminated Soil”, en R. Margesin y F. Schinner (eds.), *Manual of soil analysis. Monitoring and assessing soil bioremediation*, Springer, Berlin, 2005, pp. 131-153.
11. Trevors, J. T., “Sterilization and inhibition of microbial activity in soil”, *Journal of Microbiological Methods*, 26, 1996, pp. 53-59.
12. Blanco Gálvez, J., S. Malato Rodríguez, F. Carmona Flores, y F. Martínez Sola, *Tratamiento de efluentes industriales mediante detoxificación solar*, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Plataforma Solar de Almería (PSA), Tabernas, Almería, Derivados del Esilo, Villaricos, 04610 Cuevas del Almanzora, Almería, 29.

13. Julián Blanco Gálvez, *Detoxificación fotocatalítica de efluentes industriales*, Plataforma Solar de Almería, 227.
14. Minero, C., E. Pelizzetti, S. Malato, J. Blanco, “Large solar photocatalytic water decontamination degradation of PCP”, *Chemosphere*, vol. 26, 12, 2103-2119, Pergamon Press, 1993.
15. J. Glynn Henry, Gary W. Heinke, *Ingeniería ambiental*, 2a ed., Prentice Hall, 2011, 264.
16. Jimenes Cisneros, Blanca Elena, *La contaminación ambiental en México*, Limusa, 2001, p. 166.

4.3 Destilación solar

Dra. Margarita Castillo Téllez

4.3.1 Introducción

Una de las aplicaciones prácticas más importantes de la energía solar es la potabilización de agua, ya que el mayor desafío que enfrenta la humanidad en la actualidad es el suministro de tan importante líquido. La carencia de agua en el mundo ha fomentado e impulsado todo tipo de proyectos dirigidos a satisfacer este requerimiento, ya que el abastecimiento sustentable de agua es un agente preponderante para el crecimiento económico y el desarrollo social de las comunidades, sobre todo en regiones áridas, costeras o en las zonas conurbadas de las grandes ciudades.

Dada la escasez de agua en muchas zonas del mundo, un importante número de países han dedicado muchos esfuerzos a obtener agua dulce de fuentes tales como el mar, lagunas o pozos salobres. Un proceso que permite lograr esto es la desalación, que consiste en reducir el contenido mineral del agua de mar o salobre extrayendo la sal para obtener agua potable.

La desalación de agua no sólo representa un reto por los procesos tecnológicos que implica sino además por la necesidad de obtener agua bebible de manera económica; al observar el alto consumo de energía para producir un metro cúbico

de agua potable se ve la importancia de este parámetro y por qué resulta fundamental.

El uso de la energía solar para la operación de diferentes procesos, en particular para la desalación de agua, es cada día más común, por lo que resulta necesaria esta tecnología, que junto con el ahorro de energía y el aprovechamiento de los recursos naturales son la clave para un futuro limpio, seguro y eficaz. Además, el método de la energía solar es idóneo para producir agua potable en zonas áridas o costeras aisladas, ya que en ellas la radiación solar está disponible en cantidades apreciables y el abastecimiento de energía convencional es limitado o nulo, ya que implica tener la infraestructura necesaria para hacerla llegar a las poblaciones.

La destilación solar de agua ha sido ampliamente estudiada y en todo el mundo se está desarrollando esta tecnología. Durante los años 1950 y 1960 los costos de los combustibles fósiles eran bajos y no se había despertado la conciencia mundial sobre los daños que la explotación de éstos causan a los ecosistemas; consecuentemente se optó por el uso de los estos combustibles fósiles para producir agua destilada, ya que resultaban más económicos que la destilación solar. Como resultado, la mayoría de los estudios y la construcción de los destiladores solares de gran escala fueron disminuyendo alrededor de los años 1970. Sin embargo, la situación actual de los costos de los combustibles fósiles, una mayor conciencia sobre el calentamiento global y los daños a nuestro ambiente han permitido que el tema de la destilación solar cobre de nuevo relevancia y pueda resultar competitiva.

La destilación solar de agua es una réplica del mecanismo con que la naturaleza la purifica en su ciclo hídrico. La energía solar calienta el agua hasta su punto de evaporación, luego el vapor se condensa y se precipita en forma de lluvia, o se congela en las alturas, formando glaciales o nieves en las montañas. Mediante este proceso se remueven impurezas, como sales y metales pesados, y a la vez se destruyen

microorganismos, como bacterias y parásitos (*E. Coli* y *Giardia Lambia*). Es uno de los métodos más simples y eficientes cuando se dispone de espacio suficiente al aire libre y el agua de suministro es salobre o contaminada con metales pesados o nitratos¹.

4.3.2 El principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del destilador solar es muy sencillo: se agrega agua (salobre o residual) en una charola de color negro que funciona como absorbedor de calor; se tapa con una cubierta transparente, que puede ser de una o doble pendiente, la cual debe estar sellada herméticamente para evitar fugas de vapor de agua; en la base de dicha cubierta se encuentran dos canales que guían el agua destilada hacia el recipiente de recolección.

La radiación solar pasa a través de la cubierta transparente (por ejemplo vidrio) y calienta el agua, la cual alcanza temperaturas más elevadas que el material transparente, lo que origina que se evapore y posteriormente se condense al entrar en contacto con la superficie interior del vidrio. El efecto “invernadero” es el que logra que se eleve la temperatura del interior del destilador.

El agua, en forma de gotas, se desliza por ambos planos inclinados y se dirige hacia los canales que guían el agua ya purificada hasta los recipientes de recolección. De esta forma se obtiene el agua limpia, libre de sales y residuos peligrosos. Se conoce como *destilando* el agua contaminada cuyas sales o microorganismos se desea remover; como *destilado*, el agua que resulta del proceso de la destilación, es decir, el agua ya libre de sales; y como *salmuera*, el residuo concentrado en sales que resulta del proceso de destilación.

A grandes rasgos, un destilador requiere para su correcta operación estar orientado hacia el Sol todo el día; ya al atardecer debe dejarse correr agua en su interior a fin de eliminar la salmuera obtenida al final del día y finalmente se agrega el

destilando al comienzo de cada día. El agua obtenida (ya purificada) se debe recolectar en un recipiente totalmente libre de impurezas. Pueden ubicarse varios destiladores en serie, en paralelo, o en una combinación de ambos, de preferencia en los techos de las casas o directamente en el suelo, asegurándose de que durante las horas de Sol no reciban sombra.

Como puede observarse, el parámetro más importante que afecta la producción de agua destilada es la intensidad de la energía solar que recibe el destilador, es decir, la cantidad de agua destilada obtenida está en función de la cantidad de energía disponible para la vaporización.

4.3.3 Tipos de destiladores solares

Los destiladores solares se construyen de muchas formas y con diferentes materiales, y pueden destinarse a diferentes usos. Hay fijos o portátiles, permanentes o transitorios. Pueden ser contruidos masivamente en las industrias, o uno por uno de manera artesanal o casera. Los más conocidos y comunes en la actualidad se describen a continuación.

4.3.3.1 Destilador solar de caseta

El destilador solar de caseta es el más conocido y difundido en el mundo y consiste en una caseta de material transparente, habitualmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja, por lo general de material metálico y pintada de negro mate, donde se coloca el agua que se desea destilar. Por la forma de la caseta y la forma en que ésta recibe el calor, proveniente de la energía solar, también se les conoce como destiladores tipo invernaderos. Se consideran en esta clasificación los destiladores de caseta sencilla, los de doble caseta y los de bóveda. En la figura 4.3.1 se puede observar la geometría y partes que conforman este tipo de configuraciones².

En esta clasificación se puede agregar un destilador, simple y de fácil construcción, que consiste en una charola hecha generalmente con materiales de construcción (ladrillos

o bloques, piedra de arena), angulares de acero y láminas de vidrio. Debe instalarse en el sitio de la destilación.

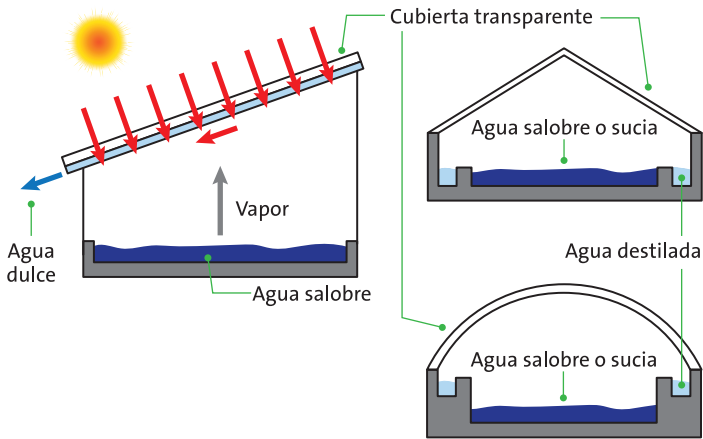


Figura 4.3.1. Destilador solar de doble caseta, caseta sencilla y bóveda.

4.3.3.2 Destilador de cascada

Esencialmente sus características son: una posición inclinada que le permite captar mejor la energía solar en la época de invierno, cuando la irradiación solar disminuye considerablemente; la cercanía entre las charolas evaporadoras y la cubierta condensadora favorecen el proceso de la destilación en general; un ducto posterior, preferentemente de algún material conductor y no sujeto a la radiación solar directa, facilita el movimiento del aire interior de la cámara de destilado, y proporciona un área extra para la condensación del vapor que equivale aproximadamente a duplicar el área del condensador.

Su principal ventaja práctica, además de su buena eficiencia, es la facilidad de su instalación, incluso por personal no especializado, lo cual simplifica también su mantenimiento.

Las desventajas se encuentran en torno al sistema de alimentación en cascada por la dificultad de controlar los volúmenes del destilando en todas sus charolas (figura 4.3.2).

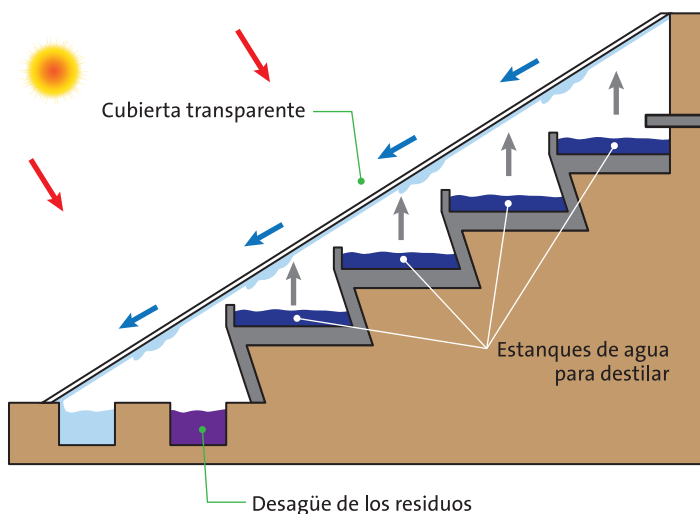


Figura 4.3.2. Destilador de cascada.

4.3.3.3 Destiladores inclinados con flujo de agua

Este tipo de destilador fue construido por primera vez por Tleimat y Howe en 1966. El prototipo debe tender al mínimo de inercia térmica y para ello se requiere almacenar la menor cantidad de agua en su interior.

Los diseños de este tipo de destiladores son múltiples y muy variados, por ejemplo los que han utilizado textiles negros en el plano de escurrimiento, con lo que el grosor del agua que se calienta resulta mínimo; otros muy conocidos procuran el enfriamiento de la cubierta, para lo cual ésta se hace de doble vidrio y se permite circular el agua de alimentación por el espacio que queda entre ellos. Una de las características de los destiladores de flujo es la de drenar el agua que ha alcanzado la más alta temperatura lograda en el interior del destilador, es decir, recircular el agua hacia la alimentación (figura 4.3.3).

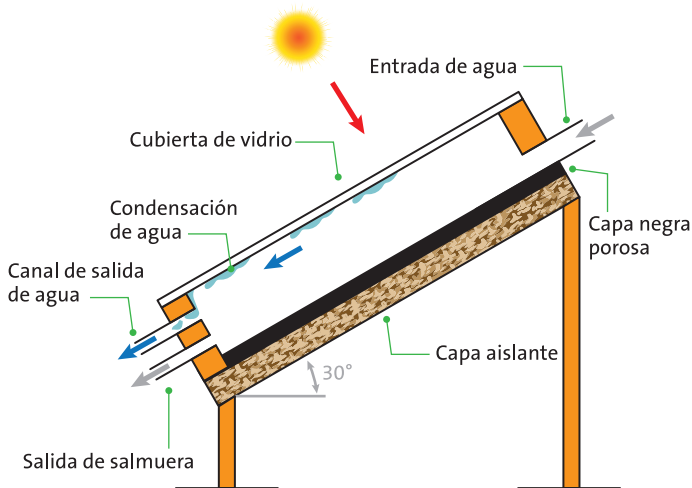


Figura 4.3.3. Destiladores inclinados con flujo de agua.

4.3.3.4 Destilador solar esférico

Este destilador se basa en la forma esférica del material transparente así como en la introducción de un brazo mecánico que limpia su cara interna y que está accionado por un pequeño motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua que se va a destilar. La forma esférica busca favorecer la captación solar incidente, evitar el sombreado entre destiladores y aumentar el rendimiento del calor producido por la energía solar. Por su parte, la barredera arrastra las pequeñas gotas que se forman en el interior de la esfera y las junta provocando que se precipiten por gravedad a la parte baja donde se acumulan (figura 4.3.4).

Los principales componentes de un destilador solar son: la cubierta transparente, cuyo propósito es permitir la mayor transmisión de radiación solar al sistema y la menor absorción; el absorbedor (charola negra), cuya función es transmitir el calor ganado al agua por destilar, por lo que requiere un alto valor de conductividad térmica; un aislante térmico, que evita que el calor ganado por el absorbedor se pierda mediante conducción al exterior por cada uno de los lados y base;

canales para la colección del destilado, los cuales se deben ubicar en las caras con pendiente de la cubierta transparente y son el medio de colección y de transporte de condensado.

La producción característica de los destiladores solares en general oscila entre los 3 y 5 litros de agua purificada por metro cuadrado al día, aunque esta cifra varía en función del diseño, de los materiales con que se fabrican y de los parámetros climatológicos del sitio donde se encuentre instalado el destilador, como la irradiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. Se puede aseverar que cuanto mayores sean la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad de viento, y más delgada sea la lámina de agua por destilar contenida en la charola negra, mayor será la producción de agua. En condiciones óptimas, un destilador solar puede obtener hasta un 62.3% de eficiencia^{3,4}.

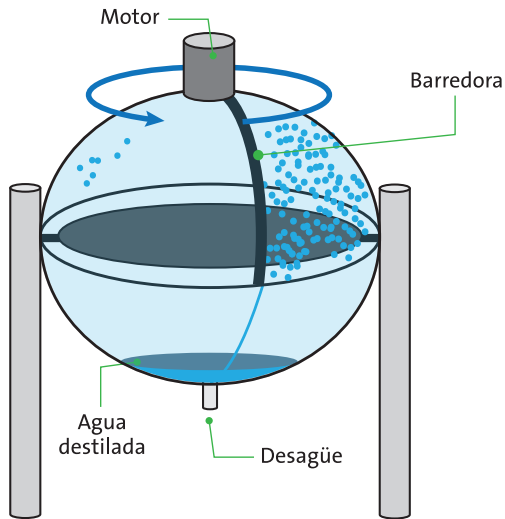


Figura 4.3.4. Destilador solar esférico.

Referencias

1. Pilatowsky, Isaac y Margarita Castillo, *Destilador solar*, colección Sello de Arena ¡Hazlo tú!, Terracota, 2013.
2. XVIII Semana Nacional de Energía Solar. Curso de actualización. Destilación solar de agua. 3 y 4 de octubre de 1994. Hermosillo, Son.
3. Álvarez, Manuel, *La destilación solar. Una posibilidad real de utilización en Cuba*, Cubasolar, 2007 (<http://www.cuba-solar.cu/biblioteca/energia/Energia24/HTML/articulo03.htm>)
4. Castillo Téllez, Margarita, *Análisis teórico-experimental de un destilador solar de doble caseta con convección forzada*, tesis doctoral, Instituto de Energías Renovables-UNAM, 2013.

Bibliografía y direcciones sugeridas

- Meinel, A. B. y M. P. Meinel, *Aplicaciones de la energía solar*, Optical Sciences Center, University of Arizona, Reverté, 1985.
- Hermosillo Villalobos, Juan Jorge, *Destilación solar*, cuadernos de divulgación académica, ITESO, 1989.
- Malik, A. S. *et al.*, *Solar Distillation*, Pergamon Press, 1982.
- Howe, Everett D., Badawi W. Tleimat y Alan D. Laird, *Solar Distillation*, University of California, College of Engineering, Sea Water Conversion Laboratory.
- Palenzuela, Patricia, Diego-César Alarcón-Padilla y Guillermo Zaragoza, *Concentrating solar power and desalination plants*, Springer, 2015.
- Solar distillation as a means of meeting small-scale water demands. United Nations, Dept. of Economic and social affairs, Nueva York, Naciones Unidas, 1970.
- International Desalination Association (IDA): <https://Idadesal.org>
- International Solar Energy Society (ISES): <https://ises.org>

4.4 Secado solar de alimentos

M. en I. Carolina Aidé Menchaca Valdez

M. en I. Roxana Berenice Recio Colmenares

4.4.1 Introducción

El agua es uno de los componentes más importantes de los alimentos, y para muchos de ellos, el más abundante. Además de su función estructural, el agua tiene gran influencia en las cualidades físicas, químicas y sensoriales; su control es de gran importancia en la preservación, pues debido a ella se pueden llevar a cabo reacciones químicas y enzimáticas. Podemos decir que el agua es la causante de la naturaleza perecedera de los alimentos. Conservar por un mayor tiempo la calidad de los alimentos y aumentar el tiempo de disponibilidad de los mismos ha dado origen a técnicas de preservación entre las que se encuentran el secado o deshidratado.

Deshidratar o secar un alimento consiste en disminuir su contenido de agua hasta un nivel seguro de humedad que permita garantizar condiciones adecuadas para su almacenamiento o para un proceso posterior.

El secado solar se refiere al uso de la radiación solar como fuente de energía para disminuir la cantidad de agua presente en un material; es una de las aplicaciones de la energía solar más antiguas. La exposición al Sol de alimentos se realizaba como una técnica de preservación con la finalidad de mantener la disponibilidad de ciertos productos durante épocas con climas adversos o no aptos para el cultivo. Además de las aplicaciones en los alimentos, el secado solar fue, y sigue siendo, una técnica recurrente para disminuir la cantidad de agua en otros materiales, como ladrillos o bloques, pieles o telas.

El uso de la biomasa como fuente de calor permitió secar algunos materiales, como los de construcción, pero el deshidratado de alimentos continuó siendo a través de la exposición directa al Sol; no es sino hasta el siglo XVIII cuando comenzó a desarrollarse la industria del deshidratado de alimentos.

4.4.2 Ventajas

El secado de alimentos presenta varias ventajas, entre ellas se encuentran:

- Prolonga el periodo de conservación (12 a 24 meses) sin aditivos, siempre y cuando la humedad ambiental lo permita.
- Posibilita el almacenamiento de productos a temperatura ambiente.
- Disminuye el peso y el volumen del producto, facilitando y reduciendo costos de empaque, almacenamiento y transporte.
- Facilita el uso del producto (leche en polvo, café soluble, etc.).
- Aumenta la compatibilidad con otros alimentos en mezclas secas.
- Reduce la producción de residuos.
- Hace posible la disponibilidad constante del producto a lo largo del periodo de conservación, a precios estables.
- En algunos casos mejora las propiedades organolépticas, como el sabor, el olor y la textura.
- Eleva el valor agregado.

4.4.3 Desventajas

- Dificulta una completa rehidratación (según el método y condiciones).
- Modifica el sabor, olor, color y textura en algunos productos.
- Provoca pérdidas de nutrientes y, en general, de propiedades funcionales y medicinales, como vitaminas, clorofila, actividades antioxidantes, etcétera.
- Algunos métodos de deshidratación tienen costos relativamente altos¹.

4.4.4. Pretratamientos

Para asegurar la calidad del secado, se aplican ciertos tratamientos previos que consisten en procesos físicos o químicos,

cuyo fin es mejorar su calidad evitando o reduciendo el deterioro del producto durante y después del secado. Existen diferentes tipos de tratamientos previos:

- **Blanqueado.** Consiste en sumergir el producto en agua en ebullición por un tiempo variable, que depende de la especie, el estado de madurez y el tamaño del producto. Ventajas: inactivación de las enzimas, ablandamiento del producto, eliminación parcial del contenido de agua en los tejidos, fijación y acentuación del color natural, desarrollo del sabor y olor característico, reducción parcial de los microorganismos presentes. Con el objeto de reducir en lo posible la oxidación se aplica el método de azufrado o sulfitado o la inmersión en solución de ácido ascórbico o jugo de limón con sal.
- **Sulfitado.** Su forma más común consiste en la inmersión del producto en una solución acuosa de metabisulfito de sodio o potasio a razón de 5 a 10 g por litro de agua durante 5 a 10 minutos a temperatura ambiente. Existe también la técnica de vaporizar azufre mediante una mecha. Dependiendo del tipo de alimento, en particular frutas con alto grado de oxidación, se suministra una cierta cantidad de azufre entre 15 y 20 g y tiempos de tratamiento entre 10 y 30 minutos, para una cámara de tratamiento de 1 m³. Las normas establecidas por la Organización Mundial para la Salud determinan 0.05% como la concentración máxima de azufre en un producto deshidratado.
- **Tratamiento con ácidos orgánicos.** Tanto el ácido cítrico o el jugo de limón natural, como el ácido ascórbico o vitamina C, ejercen un efecto de conservación del color natural de ciertas frutas que fácilmente sufren un oscurecimiento enzimático.
- **Bicarbonato de sodio.** El bicarbonato de sodio estabiliza la clorofila (pigmento verde de las plantas) haciendo que las plantas sean más resistentes a la acción directa de los rayos solares cuando son sometidas al secado solar direc-

to, por lo que conservan su color verde original. Generalmente se aplica este pretratamiento en hortalizas y leguminosas de color verde disolviendo 30 g de bicarbonato de sodio y 3 g de sal común por cada litro de agua.

- **Agrietado.** Existen productos, como la ciruela, de los que es posible eliminar la resina que cubre su piel y favorecer la permeabilidad del agua, mediante una inmersión en agua con cenizas. En su lugar se puede practicar una hendidura, pero esto a veces produce el enmielamiento de la cubierta. Otro tratamiento consiste en sumergir el producto en una solución caliente (80 °C) de hidróxido de sodio a razón de 10 g por cada litro de agua por el lapso de 5 a 10 segundos, lavarlo con agua potable y neutralizarlo durante 30 segundos con una solución de 2 g de ácido cítrico por litro de agua antes del secado.
- **Salado y almibarado.** En el salado se adiciona sal común que, dependiendo del producto por deshidratar, puede acentuar el sabor original. En el almibarado, se adiciona azúcar común².

4.4.5 Secadores solares

La exposición directa al Sol de productos para su deshidratación se llama secado a cielo abierto o natural y puede darse en planta o en piso. Consiste en la exposición del producto al Sol sobre una plancha de concreto o sobre algún material plástico (figura 4.4.1); después de un tiempo determinado, que pueden ser días incluso, el fruto se cambia de posición manualmente a fin de que toda la superficie se exponga al viento y la radiación solar y favorecer con ello el mecanismo de eliminación de agua. Los productos también pueden exponerse al secado natural en estantes o bandejas. Esta forma de deshidratación presenta algunas desventajas, como la exposición directa a elementos en el ambiente que contaminan y disminuyen la calidad del producto, tiempos largos de secado, rehidratación por la presencia de lluvias y reque-

de agentes externos o de daños mecánicos. En algunos deshidratadores, la cabina de secado también funciona como captador solar, ya que el producto contenido en ella puede recibir la radiación solar de manera directa. Los deshidratadores solares se clasifican de acuerdo con la forma como se configuran sus componentes.

4.4.5.1 Clasificación de deshidratadores

Los secadores solares se clasifican en activos y pasivos, según la forma como se hace circular el aire dentro de la cabina de secado. En los sistemas activos se integran ventiladores con la finalidad de favorecer el arrastre de humedad, mientras que en los sistemas pasivos el aire circula de manera natural por fuerzas de empuje como resultado de diferencias de densidad por gradientes de temperatura del aire.

En los deshidratadores solares directos, parte de la radiación a la que se expone el producto es absorbida por el mismo, lo que causa incremento de su temperatura y la vaporización del agua contenida en el interior del alimento. La migración de la humedad del interior del material al medio circundante depende del fenómeno de difusión, y la difusividad másica (tasa de eliminación) está en función también de factores como forma, componentes estructurales y contenido de humedad. Cuando el alimento se expone de manera directa a la radiación solar otro de los factores que toma importancia es la absorbancia del producto. La mayor parte de los alimentos agrícolas, por su color y textura, tienen una alta absorbancia, lo cual favorecen la deshidratación.

Tanto los secadores pasivos como los activos se clasifican de acuerdo con la distribución de los componentes del dispositivo en: integrales, distribuidos y mixtos. En los equipos integrales, el captador sirve también como cabina de secado. Los deshidratadores pasivos integrales se clasifican a su vez en tipo invernadero o de gabinete. En los deshidratadores distribuidos, el captador y la cabina de secado se encuentran

separados. Por su parte, los equipos mixtos consisten en equipos combinados, es decir, el deshidratador puede absorber el calor directamente pero el proceso es mejorado al integrarse un captador solar (figura 4.4.2).

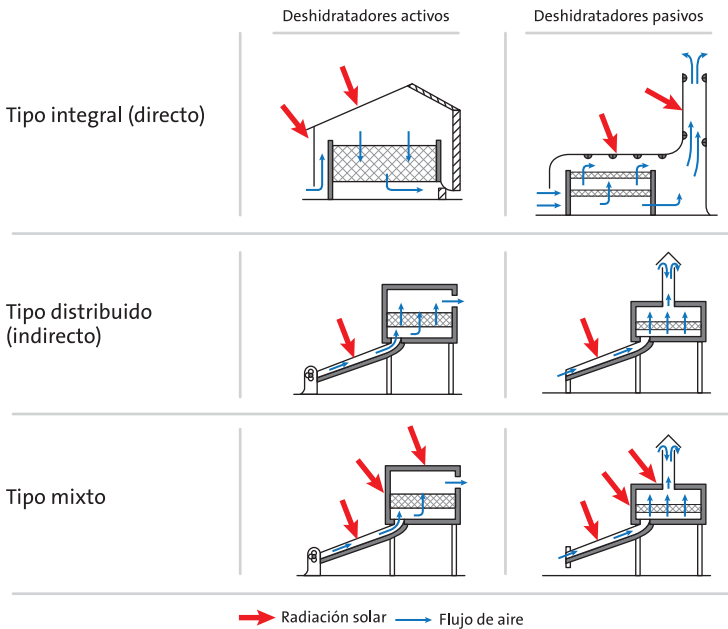


Figura 4.4.2. Clasificación de deshidratadores solares⁴.

4.4.6 Perspectivas del deshidratado solar

Se han emprendido estudios enfocados hacia el desarrollo de técnicas que contemplan nuevas tecnologías para la deshidratación de alimentos, en las que destaca la energía solar como fuente de energía no fósil, la cual ha aumentado su participación mundial de 7.9% a 8.4% de 2012 a 2013, mientras que las fuentes de energía por hidrocarburos disminuyeron en 1.1% con respecto al 2012³.

El desarrollo de nuevas y mejores tecnologías para deshidratar alimentos implica el control de las características del alimento antes, durante y después de la deshidratación. Los estudios recientes sobre el tema buscan nuevas alternativas para hacer el proceso más eficiente, desde el punto de vista del consumo energético y del tiempo requerido para el proceso, así como para la obtención del producto con propiedades organolépticas y funcionales deseables.

Referencias

1. Colina, Irezabal, M. L., *Deshidratación de alimentos*, Trillas, México. 2010.
2. SENER, *Prospectiva de energías renovables 2012-2026*, México, 2012.
3. UNESCO, M., *Guía de usos de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*, fundación Celestina Pérez de Almada, Asunción, Paraguay, 2005.
4. Kalgirou, S., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 1a. ed., Academic Pr Inc., 2009.

Bibliografía sugerida

- Shafiur, R. M., *Handbook of food preservation*, 2a. ed., Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- Duckworth, R. B., “Factors influenced by water in food”, *Chem. Ind. Chem Ind Soc Chem Ind*, vol. 24, 1976, pp. 1039-1042.
- Badui, D. S., *Química de los alimentos*, 4a. ed., Pearson Educación, México, 2006.
- Pomeranz, Y. (1991), *Functional properties of food components*, 2a. ed., Academic Pr Inc, San Diego, California, 1991.

- Arozena, R., y Sutz, J., *Subdesarrollo e innovación. Navegando contra el tiempo*, España: Cambridge University Press, 2003.
- Diamante, y Munro, *Thin layer drying models for sweet potato in tray dryer*, Agric Eng Int: *CIGR Journal*, 131, 2012.

4.5 Refrigeración solar

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa

4.5.1 Producción de frío

Dentro de las múltiples acepciones que tiene el término *frío*, las más relacionadas con este fenómeno físico son: “término que se aplica a los cuerpos cuya temperatura es muy inferior a la ordinaria del ambiente” y “sensación que se experimenta por el contacto con cuerpos que están a una temperatura más baja”.

Este término tiene un carácter relativo ya que lo que para unos es frío para otros no lo es. Sin embargo, se puede considerar al frío como un contenido de calor a una temperatura baja, que llega a ser nulo en el cero de la escala absoluta de temperatura.

El frío y su producción impactan a la mayor parte de los sectores de la actividad humana: salud, social, ambiente, servicios, alimentación, industrial, acondicionamiento de espacios incluyendo el del entretenimiento. Una de las aplicaciones más generalizadas es en el sector alimentario, agropecuario y pesquero, almacenamiento, fabricación de hielo, transporte de productos refrigerados, refrigeración comercial, doméstica y restauración. Su participación en este sector reduce las pérdidas de productos, aumenta la higiene alimentaria, mejora el aprovisionamiento y aprovecha los intercambios comerciales nacionales e internacionales¹.

En lo social, genera empleos, asegura el abasto y la calidad de los alimentos, disminuye el riesgo de enfermedades y permite el acondicionamiento de los espacios de trabajo, entre otros beneficios.

En el sector salud y biológico, favorece la conservación de vacunas, medicamentos y biológicos, así como la climatización de espacios hospitalarios, y es indispensable en criocirugía y crioterapia.

Asimismo, se requiere en la mayor parte de la industria, la de plásticos, hule, mecánica, construcción, manejo de desechos, química, etcétera.

Una de las mayores aplicaciones es en el acondicionamiento de espacios en los sectores terciario y de servicios, industrial, transporte, limpieza de cuartos, etcétera.

En el entretenimiento, es útil en la creación de pistas de patinaje de carácter popular, y en la producción de nieve artificial para las pistas de esquíaje.

Sin embargo ha habido efectos nocivos sobre el ambiente provocados por las emisiones de gases refrigerantes debidos a las fugas en las instalaciones y durante el mantenimiento, lo que ha contribuido al adelgazamiento de la capa de ozono y al calentamiento global, así como a altos consumos de energía y algunos impactos indirectos, como la generación de óxidos de azufre y de nitrógeno, productos de desecho asociados con la destrucción de refrigerantes y aceites de los propios equipos.

El enfriamiento en sus diferentes modalidades consume el 15% de la energía eléctrica que se produce en el mundo y se espera un gran crecimiento en la demanda debido entre otras causas al aumento gradual de la temperatura ambiente, a los inadecuados diseños y selección inadecuada de ciertos materiales de construcción —que contribuyen a la acumulación de calor en las estructuras arquitectónicas— y en gran medida a la falta de una cultura de ahorro energético en el uso de los sistemas de enfriamiento. También conviene considerar que un número limitado de empresas controlan el merca-

do mundial, la tecnología y los servicios de la refrigeración y el aire acondicionado, que algunos de los refrigerantes comerciales contribuyen al deterioro de la capa de ozono y al calentamiento global.

La producción de frío ofrece un amplio espectro de tecnologías, las cuales se dividen en naturales y artificiales. Los métodos naturales se basan en intercambios térmicos radiativos, como la condensación y congelación de la humedad que ocurre entre atmósfera y la superficie terrestre, el efecto evaporativo que permite el enfriamiento del agua, principio que actúa en la climatización e intercambios de calor por contacto con otros materiales. Estos métodos, al ser naturales, son difíciles de controlar, pero pueden aprovecharse parcialmente; lo que se requiere ahora es desarrollar tecnologías que ofrezcan un mejor control, rendimiento y factibilidad económica.

En el enfriamiento artificial se puede clasificar la tecnología en función del tipo de energía en que basa su operación, como la refrigeración mecánica, termomecánica, térmica, química, termoeléctrica, magnética, etc. La técnica más utilizada comercialmente es la refrigeración mecánica de vapores, operada en su mayoría por energía eléctrica. Esta técnica se basa en la utilización de fluidos llamados refrigerantes cuyas propiedades termodinámicas muestran que es posible su evaporación a bajas temperaturas. Este ciclo opera a dos niveles de temperatura y para su funcionamiento requiere un trabajo externo, en este caso ejecutado por el compresor².

El ciclo básico cerrado de compresión está compuesto por un compresor, un condensador, un evaporador, una válvula de expansión y un evaporador. El compresor succiona el vapor del evaporador (después de la producción del efecto refrigerante) y lo descarga comprimido a las condiciones que permiten su condensación (presión y temperatura de saturación), después el líquido saturado se envía al evaporador por medio de la válvula de expansión y finalmente el líquido se evapora por el calor del medio que lo rodea, para iniciar un nuevo ciclo.

En la figura 4.5.1 se muestra un ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor y su representación en un diagrama, entropía-temperatura, el cual presenta un ciclo cerrado de Carnot en donde ocurren dos procesos isotérmicos unidos por dos isentrópicos, uno de expansión que une al proceso de condensación y otro que comunica el proceso de evaporación al de condensación por medio de una compresión³.

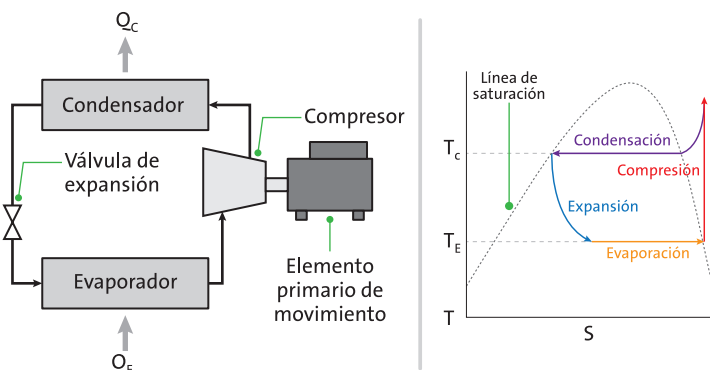


Figura 4.5.1. Ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor y su representación en un diagrama entropía-temperatura.

La segunda tecnología en importancia es la refrigeración térmica, la cual consiste en ciclos de enfriamiento impulsados por energía térmica de bajo y mediano nivel de temperatura (80-200 °C). Estos ciclos operan con tres temperaturas: una alta, que permite la desorción del refrigerante; una intermedia de disipación de calor, y una baja en la que se lleva a cabo el enfriamiento. Son por ejemplo los ciclos: Rankine, el de eyección-compresión y el que utiliza el fenómeno de sorción: absorción, adsorción y termoquímica (absorción sólido-gas). A diferencia del ciclo por compresión, en la refrigeración térmica, el trabajo necesario para su funcionamiento es producido por la misma máquina térmica.

El ciclo de refrigeración por sorción sólo utiliza energía térmica, y el fenómeno fisicoquímico de sorción puede ser de

dos tipos: uno, llamado absorción, en donde un material líquido o sólido sorbe preferentemente un tipo de vapor del refrigerante en donde se solubiliza; el otro, llamado adsorción, que es cuando la sorción es sólo superficial, y puede ser física o química. En ambos casos es posible recuperar el refrigerante sorbido por medio de una desorción, que es el efecto contrario a la sorción.

Estas propiedades de los fluidos permiten integrarlos a ciclos cerrados de refrigeración, por los que al líquido o sólido que ha sorbido el vapor del refrigerante se le suministra la energía térmica necesaria para separar el vapor y llevarlo a las condiciones requeridas en el condensador, en donde se licua y es enviado al evaporador por la válvula de expansión para su posterior evaporación, proceso por el cual absorbe calor del medio circundante, es decir, dicho medio se enfría. Después, el vapor del refrigerante se envía al sorbedor, donde es succionado para formar el compuesto o la solución original y ser dirigido de nuevo al desorbedor e iniciar un nuevo ciclo de enfriamiento. La figura 4.5.2 muestra un ciclo básico de refrigeración por sorción⁴.

Existen diferentes sistemas basados en el principio de la sorción: a) sistemas a absorción (líquido-vapor) con diferentes funcionamientos: intermitente y continuo, por absorción-difusión a resorción y a absorción (sólido-vapor); b) sistemas a adsorción sólido-gas intermitente y c) sistemas termoquímicos, ciclos a absorción sólido-gas intermitentes y semicontinuos⁵.

La figura 4.5.2, muestra un ciclo básico de refrigeración por sorción en funcionamiento intermitente y la figura 4.5.3 presenta un ciclo básico de refrigeración por sorción en funcionamiento continuo.

En el ciclo intermitente, el proceso de generación-condensación del vapor de refrigerante y el posterior proceso de evaporación-absorción, en ambos casos del vapor del refrigerante, se desarrollan en tiempos diferentes. En este caso,

un solo equipo hace las veces de desorbedor y de sorbedor; dependiendo del proceso, su eficiencia es menor y requiere una mayor cantidad de solución concentrada en comparación con el ciclo continuo. Estos sistemas se acoplaron al calentamiento solar, ya que durante el día se generaba el refrigerante aprovechando la energía térmica del Sol y durante la noche o en un periodo posterior se producía el efecto refrigerante. En la figura 4.5.2 se aprecian los diferentes componentes del ciclo intermitente: un generador G que hace también la función del absorbedor A, un condensador C, un recipiente de condensador RC, un evaporador E y un rectificador R, cuya función consiste en eliminar en su mayor parte el absorbente que es arrastrado por la corriente de vapor de refrigerante que sale del desorbedor y se transfiere al condensador y posteriormente al evaporador, en donde puede presentar problemas y disminuir su capacidad y eficiencia.

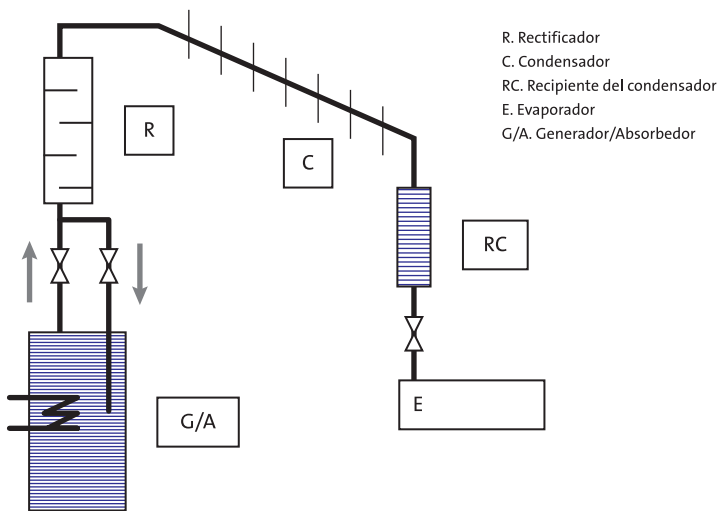


Figura 4.5.2. Ciclo básico de refrigeración por sorción en funcionamiento intermitente.

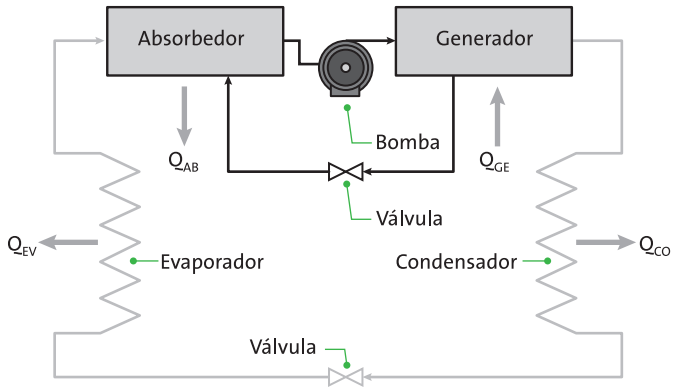


Figura 4.5.3. Ciclo básico de refrigeración por sorción en funcionamiento continuo.

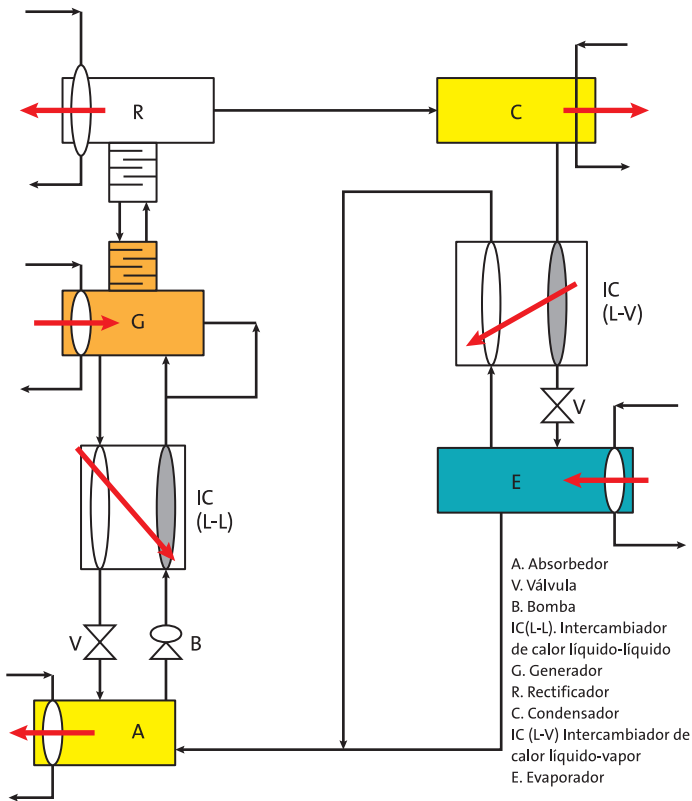


Figura 4.5.4. Ciclo de refrigeración por absorción líquido-gas con recuperadores de calor sensible.

Con el propósito de ahorrar energía y hacer más eficiente el ciclo de enfriamiento, en el ciclo de absorción sólido-gas es factible recuperar algunos calores sensibles. Es decir que la corriente de la solución diluida que sale del generador y regresa al adsorbedor se puede poner en contacto indirecto con la solución concentrada que sale del adsorbedor y enviarse al generador, y con ello reducir las áreas de intercambio térmico tanto en el generador como en el adsorbedor. También es posible subenfriar de manera también indirecta el líquido condensado que sale del condensador con el vapor de refrigerante que sale del evaporador⁵. Este ciclo de absorción con recuperación de calor está representado en la figura 4.5.4.

En el caso de los sistemas basados en la adsorción, los fluidos de trabajo se componen en su mayoría de un refrigerante y un adsorbente, que puede ser un líquido o un sólido y formar soluciones o compuestos sólidos definidos. Entre los sistemas refrigerante-adsorbente, los más estudiados y comercializados son el amoníaco-agua para aplicaciones de refrigeración y agua-bromuro de litio para la climatización. Hay otros sistemas, como la adsorción líquida de amoníaco con nitrato de litio y tiocianato de sodio, y sólida en cloruro de calcio, cloruro de estroncio, cloruro de sodio y cloruro de bario, entre otros. En el caso del agua como refrigerante se usa bromuro o cloruro de litio. Se han analizado también los sistemas con aminas primarias, como la monometilamina y la dimetilamina, las cuales se adsorben en agua y en cloruro de calcio, y algunos otros halogenuros de alcalinotérreos. En el caso de la adsorción, por lo general se utilizan carbones activados, sílica gel, zeolitas y se adsorben comúnmente agua y amoníaco⁴.

Como se puede observar, la refrigeración térmica ofrece muchas ventajas entre las que se pueden mencionar: a) posibilidad de una gran diversidad de fuentes de energía térmica, entre 60 y 250 °C (gas natural, gas LP, diésel, gases de escape, biomasa, efluentes térmicos industriales, energía solar y geotérmica), con un mínimo consumo eléctrico; b) su manu-

factura que no requiere una industria metalmecánica especializada; c) su silenciosa operación; d) su largo periodo de vida útil media; e) mínimo mantenimiento, y g) aplicaciones muy diversas, principalmente para el acondicionamiento de aire, conservación y congelación de alimentos, y producción de hielo.

La energía solar se ha aprovechado para la operación de sistemas de enfriamiento, básicamente debido a su gran diversidad tecnológica, su carácter no contaminante, su menor requerimiento de energía eléctrica y su posibilidad de resolver problemas en horas pico debido a la demanda de aire acondicionado. Es factible utilizar tanto la conversión térmica como fotovoltaica. Los ciclos más adaptados a la conversión fototérmica son la refrigeración por sorción (absorción, adsorción), deshumidificantes, sistemas de eyectocompresión, entre otros⁶. Cuando se recurre a la conversión fotovoltaica se cuenta con los sistemas de compresión mecánica de vapor con motor de corriente alterna o de corriente directa, y los sistemas termoeléctricos⁷. La tabla 4.5.1 presenta una comparación entre los principales ciclos de refrigeración térmica más comunes como información del mercado, los fluidos de trabajo, el coeficiente global de rendimiento COP, las temperaturas de operación y algunas observaciones. Cabe destacar que los valores de COP son bajos, entre 0.5 y 1.1 comparados con un sistema de compresión de vapor, y el dominio de temperaturas de operación oscila entre 60 y 160 °C.

El coeficiente global de desempeño se representa por medio de la relación:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energía frigorífica obtenida}}{\text{Energía total suministrada}} \quad 4.1$$

4.5.2 Enfriamiento solar

Los elementos principales de un sistema de enfriamiento solar son: la propia unidad de enfriamiento, que puede ser de las

tecnologías de ciclos de sorción antes mencionadas, de un sistema de disipación térmica en donde se eliminan los calores de condensación y de sorción, del sistema de producción de frío, que puede ser para la conservación de alimentos, la climatización, la producción de hielo, la congelación, etc., y finalmente la unidad de calentamiento necesaria para la desorción del vapor del refrigerante. La figura 4.5.5 ejemplifica la integración de los elementos de un sistema de enfriamiento solar.

La mayoría de las tecnologías de calentamiento solar de baja y mediana temperatura pueden operar un ciclo de refrigeración térmica.

Enfriamiento solar	Absorción una etapa	Absorción doble etapa	Adsorción	Sorbentes sólidos	Sorbentes líquidos
Mercado	Muchos productos >100 kw, pocos <100 kw	Algunos fabricantes fuego directo	Algunos productos	Sistemas usando rotores de sorción	Operación en planta piloto
Fluidos de trabajo	LiBr, NH ₃ /H ₂ O	LiBr/H ₂ O	H ₂ O/silica gel	LiBr/H ₂ O H ₂ O/silica gel	H ₂ O/LiCl
COP	0.7	1.1	0.6	0.5-0.8	Alto potencial
Temperatura de operación °C	75-100	140-160	65-95	>60	>60
Observaciones			Grandes y pesados	Configuración es para diferentes climas	Desacoplamiento de regeneración

Tabla 4.5.1. Características de los principales ciclos de refrigeración térmica.

La figura 4.5.6 presenta las diferentes opciones de calentamiento solar y los niveles de temperatura alcanzados, así como su integración con las diferentes tecnologías de enfriamiento

en donde a cada una le corresponde un intervalo específico de temperatura necesaria para generar el refrigerante, además de los niveles de enfriamiento para satisfacer las necesidades de: acondicionamiento de espacios, conservación de productos perecederos, fabricación de hielo y congelación. También se incluyen las tecnologías de refrigeración que operan con la energía solar fotovoltaica, principalmente para operar ciclos de compresión de vapor con corriente alterna o directa por medio de un inversor y ciclos de refrigeración termoeléctrica.

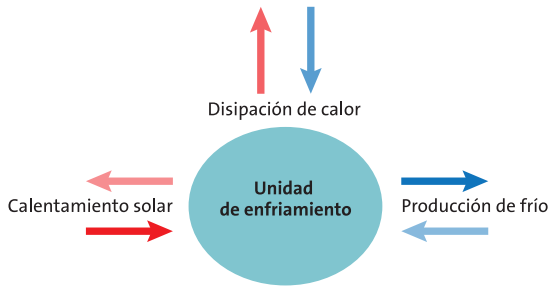


Figura 4.5.5. Elementos de un sistema de enfriamiento solar.

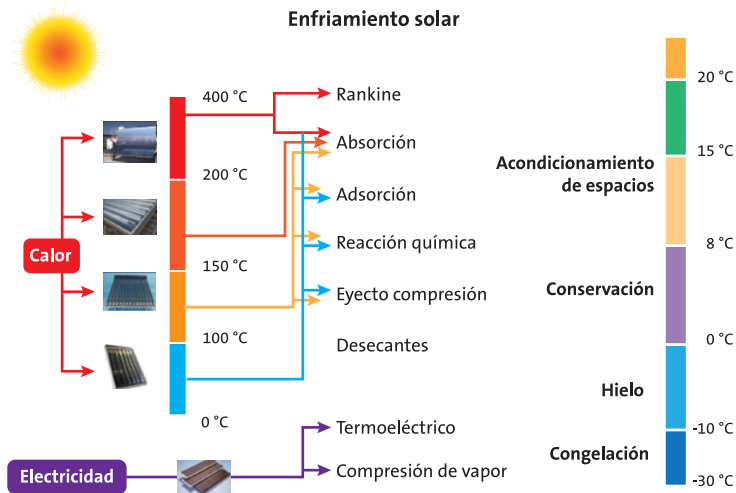


Figura 4.5.6. Integración de las tecnologías de calentamiento solar para la operación de los diferentes ciclos de enfriamiento para diversas aplicaciones de enfriamiento.

En el caso de la refrigeración solar el coeficiente global de desempeño, COP_{RF} , que queda expresado como:

$$COP_{RF} = (COP_R) (COP_{CS}) \quad 4.2$$

En donde COP_R corresponde al ciclo de refrigeración y COP_{CS} es el coeficiente de desempeño del tipo de captador solar utilizado. Como se puede observar, los ciclos que operan a dos temperaturas, como es el caso de la compresión de vapor, tienen un COP mayor que la refrigeración térmica debido al acoplamiento de la máquina térmica, en cuyo caso se opera a tres niveles de temperatura. Por ejemplo, si el COP_R del ciclo de refrigeración es del 50% y el COP_{CS} del captador solar del 60%, resulta un COP_{RF} del enfriador solar de 30%⁸.

Referencias

1. Foro de Consulta Permanente sobre la Cadena del Frío: *Alimentos, Energía, Salud, Medio ambiente y Sociedad*, UNAM, 1997.
2. Isaac Pilatowsky Figueroa, Roberto Best y Brown, Wilfrido Rivera Gómez Franco, Jorge Isaac Hernández Gutiérrez, Octavio García Valladares, y Victor Hugo Gómez Espinoza, *Curso de Refrigeración Solar*, Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. 2013.
3. Eduardo Hernández Goribar, *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*, Editorial Limusa, ISBN: 9789681806040, 1997.
4. H.Z.Hassan, A.A. Mohamad, *A review on solar cold production through absorption Technology*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 5331-5348, 2012.
5. Isaac Pilatowsky Figueroa (coordinador) Roberto Best y Brown, Antonio Valiente Barderas, Juan Carlos Lague Soto, Pedro Quinto Diez, Filiberto Gutiérrez Martínez, Jorge Isaac Hernández Gutiérrez, Jesus Heiras Aguirre,

- Enrique Martínez Sánchez, *Métodos de Producción de Frío*, UNAM, 1993.
6. Paul J. Wilbur, Susumu Karkai, *Solar Cooling*, The Franklin Institute Press, 1977.
 7. *Solar-Powered Refrigeration System-NASA* Technology Transfer Portal <https://technology.nasa.gov/patent/MS-C-TOPS-7>
 8. Kilic M, Kaynakli O. *Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system*. Energy Conversion and Management, 48, 2 599-607, 2007.

5

NORMALIZACIÓN, LEGISLACIÓN Y RECOMENDACIONES PARA USUARIOS

Dr. Octavio García Valladares

5.1 Normas nacionales e internacionales para la determinación del comportamiento térmico e integridad de dispositivos conversores y sistemas

Para el caso de sistemas termoconvertidores de energía de baja y mediana temperatura, las normas para determinación del comportamiento térmico e integridad se pueden dividir en dos grandes grupos: (a) para captadores solares y (b) para sistemas solares.

5.1.1. Normas para captadores solares

La más común internacionalmente es la norma ISO 9806:2013 “Solar Energy-Solar Thermal Collectors-Test Methods”¹; en el caso de México, la norma vigente es la NMX-ES-001-NOR-MEX-2005 “Energía Solar-Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua-Métodos de Prueba y Etiquetado”². Estas normas se aplican tanto a los captadores planos como a los de tubos evacuados.

Las pruebas de rendimiento térmico incluyen la evaluación del calor suministrado por el captador solar bajo distin-

tas condiciones de funcionamiento (tanto ambientales como de operación). A continuación se describen brevemente estas pruebas:

- a. **Constante de tiempo.** Con objeto de determinar el tiempo de respuesta del captador solar, a fin de evaluar su comportamiento transitorio y seleccionar los intervalos de tiempo apropiados para las pruebas de eficiencia en estado cuasi-estable, se debe obtener la constante de tiempo del captador solar, esto es, el tiempo requerido para que el fluido a la salida del mismo alcance un 63.2% del valor de estado estable, que es opcional en el caso de la norma ISO.
- b. **Rendimiento térmico.** Se realiza con el objeto de determinar la eficiencia instantánea (energía entregada instantánea) del captador solar cuando la radiación solar directa es perpendicular a la superficie del captador bajo un amplio rango de temperaturas de operación y condiciones ambientales. En la sección 2.1.3.4 el concepto de eficiencia muestra los resultados obtenidos para un captador solar con la norma ISO 9806¹ (figura 2.4). Asimismo se puede ver el tipo de curvas de primero y segundo orden generadas a partir de estos datos. A partir de esta curva, también es posible obtener la temperatura de estancamiento teórica del captador.
- c. **Factor modificador del ángulo de incidencia.** Con objeto de establecer el rendimiento del captador solar a diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar directa sobre el plano del captador, se deben llevar a cabo las pruebas experimentales pertinentes; en la sección 2.1.3.5, el concepto de factor modificador del ángulo de incidencia se presenta en la figura 2.5, que muestra el valor del ángulo modificador ($K_{\tau\omega}$) obtenido experimentalmente en función del ángulo de incidencia con respecto a la perpendicular (θ). Para el cálculo correcto de la eficiencia instantánea en los casos en que el ángulo de incidencia

del Sol no es perpendicular al captador, el valor de $K_{\tau\alpha}$ obtenido se tiene que multiplicar por el término η_0 de la ecuación de rendimiento térmico del captador.

- d. Caída de presión del fluido caloportador en el interior del captador.** Se obtiene una curva experimental de la caída de presión del fluido caloportador dentro del captador para diferentes flujos máscicos. Esta curva es importante para el correcto diseño hidráulico de una instalación solar con arreglos en serie y paralelo, y por consiguiente para la correcta elección de la bomba que se va a utilizar.

Adicionalmente, las normas internacionales y nacionales establecen una serie de pruebas de integridad que dan seguridad al usuario de que el captador adquirido resiste condiciones que se pueden presentar durante su vida útil. Entre estas pruebas están:

- a. Presión hidrostática interna.** Evalúa la resistencia a la presión hidrostática de todos los componentes e interconexiones del captador solar de agua. El sistema debe ser probado a una presión 1.5 veces mayor a la máxima de operación indicada por el fabricante. En el caso de la norma mexicana, la presión mínima de prueba es de 400 kPa manométricos para captadores metálicos.
- b. Resistencia a la alta temperatura.** Evalúa si el captador, cuando se encuentra sin agua, puede soportar altos niveles de irradiación sin fallas, como rotura de cristal o depósitos significativos en la cubierta del captador por emanación de gases de aislamientos.
- c. Exposición a la radiación.** Se realiza con el captador solar sin agua, representando condiciones de operación que pueden ocurrir durante el servicio real y que permiten al captador “asentarse”, de forma que los subsecuentes ensayos de calificación darán resultados repetibles con mayor probabilidad. La prueba es mínimo de 30 días.

- d. Choque térmico externo.** Los captadores pueden estar expuestos durante su instalación o funcionamiento a repentinas tormentas de lluvia en días calurosos soleados, lo que causa severos choques térmicos externos. Este ensayo determina la capacidad de un captador, cuando se encuentra sin agua, de soportar estos choques térmicos sin que presente fallas, como la rotura de la cubierta.
- e. Choque térmico interno.** Los captadores pueden estar expuestos a repentinas entradas de agua fría a su interior en días calurosos soleados, lo que causa severos choques térmicos internos, por ejemplo, después de un corte en el suministro de agua o cuando el sistema es instalado por primera vez al iniciar su operación. Este ensayo determina la capacidad de un captador, cuando se encuentra sin agua, de soportar estos choques térmicos sin presentar fallas en sus conductos interiores.
- f. Penetración de agua de lluvia.** Determina hasta qué punto los captadores planos con cubierta son resistentes a la penetración de lluvia que puede afectar su rendimiento.
- g. Resistencia al congelamiento.** Determina si el captador solar tiene la capacidad de soportar heladas y ciclos de congelación-deshielo, o bien que cuente con dispositivos o circuitos secundarios que lo protejan contra los daños.
- h. Carga mecánica positiva y negativa.** Determina hasta qué punto la cubierta del captador es capaz de resistir una carga mecánica positiva debido al efecto de nieve, viento, cenizas o cualquier peso sobre la cubierta; o bien una carga mecánica negativa para determinar si las fijaciones entre la cubierta del captador y la carcasa son capaces de resistir fuerzas de levantamiento generadas por vientos fuertes, huracanes o tornados.
- i. Prueba de resistencia al impacto.** Determina si los captadores son capaces de resistir los impactos del granizo o de algún objeto arrojado contra ellos. Esta prueba se

puede practicar de dos maneras: 1) con una bola de hierro de 150 g lanzada desde diferentes alturas; 2) con bolas de hielo de diferentes diámetros lanzadas a diferentes velocidades contra el captador. Esta prueba es muy importante en lugares como México, en cuya zona central pueden ocurrir granizadas frecuentemente, y debido al cambio climático que provoca que estos fenómenos se están presentando cada vez con mayor frecuencia e intensidad.

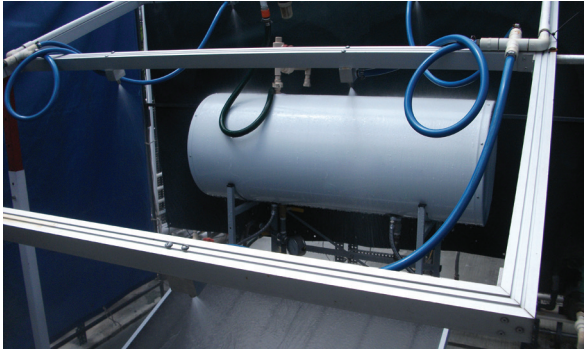
Los captadores que cuentan con estas certificaciones y han pasado las pruebas anteriores dan seguridad al usuario final de que son confiables y duraderos.

Adicionalmente hay algunas otras pruebas importantes en normas de algunos países, como las siguientes:

- a. Ensayo de envejecimiento acelerado para materiales plásticos o elastómeros.** Los materiales de los captadores expuestos a la irradiación solar deben ser resistentes o estar protegidos contra la radiación ultravioleta. Es una prueba importante ya que frecuentemente estos materiales se deterioran si al fabricarlos no se han tenido en cuenta las condiciones a las cuales serán expuestos y que pueden afectar el funcionamiento y rendimiento del captador. La norma brasileña incluye esta prueba.
- b. Prueba de corrosión en ambiente salino.** Garantiza el correcto funcionamiento de los captadores en zonas costeras donde están expuestos a un ambiente salino. En la figura 5.1. se pueden observar algunas de las pruebas realizadas a los equipos solares térmicos.

5.1.2 Normas para sistemas solares

Las normas para sistemas solares que rigen a nivel nacional e internacional se refieren principalmente a sistemas prefabricados que se destinan al calentamiento de agua. En México es el caso del Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda (DTESTV)³ y la norma NMX-ES-004-NOR-



a) Penetración de agua de lluvia.



b) Carga mecánica positiva.



c) Prueba de impacto.

Figura 5.1. Pruebas experimentales en captadores. Laboratorio de Pruebas de Equipos de Calentamiento Solar (LAPECAS) del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

MEX-2010 “Energía Solar —Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua— Método de prueba”⁴. En la Unión Europea están las normas EN 12976-1:2006 “Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales” y la EN 12976-2:2006 “Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo”^{6,7,9}.

Estas normas se caracterizan en general por establecer el método de ensayo para evaluar y comparar el comportamiento térmico de sistemas solares de calentamiento de agua, principalmente para uso doméstico hasta una capacidad máxima de 500 litros y hasta una temperatura máxima de 90 °C. Cuentan también con pruebas de integridad de los sistemas muy similares a las que se aplican en el caso de los captadores solares.

Las pruebas de rendimiento térmico incluyen la obtención experimental de la curva de ganancias térmicas durante el día solar y la de pérdidas nocturnas. La ganancia en el periodo diurno se establece con una ecuación para calcular la energía útil transferida al agua en función de la irradiación solar diaria en el plano del captador, la temperatura inicial del agua en el sistema y la temperatura ambiente promedio diurna. Mientras que las pérdidas del sistema durante la noche se establecen en función de la diferencia entre la temperatura del agua del sistema solar y la temperatura ambiente promedio nocturna. Con estas dos ecuaciones se calcula, para cualquier condición climatológica y de operación, la energía que puede entregar el sistema al usuario.

Una prueba adicional en el DTESTV³ (Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda) en México es la resistencia al sobrecalentamiento, que determina si el sistema solar está protegido contra daños provocados en periodos de alta irradiación, sin extracciones, sin que se presenten deformaciones y asegurando en su caso que funcionen correctamente los dispositivos de seguridad que liberan presión del sistema.

5.2 Legislación. Leyes internacionales y nacionales que favorecen el desarrollo de la energía solar térmica

En el contexto internacional hay una serie de leyes en diferentes países que incentivan el uso de calentadores solares o hacen obligatorio su uso para un porcentaje importante de los requerimientos de agua caliente de una vivienda o negocio.

En el caso de México existen las siguientes normas que favorecen el desarrollo de la energía solar térmica:

NADF-008-AMBT-2005. Norma ambiental para el Distrito Federal⁵. Establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en piscinas, fosas de clavados, regaderas, lavamanos, cocina, lavanderías y tintorerías. Se aplica solamente para empresas con más de 51 empleados, las cuales están obligadas a instalar sistemas de calentamiento de agua, en donde al menos el 30% de la energía que se consume anualmente de agua caliente sea abastecida a través de sistemas solares.

Reglamento de construcciones del municipio de Centro, Estado de Tabasco 2012. Establece los mismos criterios de la norma NADF-008-AMBT-2005.

Ley de impuestos sobre la renta (ISR). En su artículo 34, apartado XIII, establece el 100% de deducibilidad de maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables en el primer año para personas morales.

5.2.1 Propuestas de legislación

En el caso de México, las normas actuales que se mencionan en este documento son Normas Mexicanas (NMX), es decir, de carácter voluntario, a diferencia de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son obligatorias. Por lo anterior, es imperiosa la elaboración de las NOM basadas en las Normas Mexicanas de energía solar ya existentes para obligar a todos los

importadores y fabricantes de sistemas solares a que cumplan con un mínimo de especificaciones que garanticen al usuario final una cierta calidad del producto. Se han emprendido esfuerzos para obtener una NOM de un sistema acoplado entre un calentador solar de agua y un sistema de respaldo de gas.

5.2.2 Programas de fomento, políticas subsidiarias, estándares de competencia laboral

Los países que cuentan con una penetración importante en el mercado de los sistemas solares para calentamiento de agua disponen de programas obligatorios de utilización de calentadores solares para los requerimientos de agua caliente, o bien de programas que subsidian su uso mediante fondos de gobierno o incentivos fiscales.

En México, se están revisando los reglamentos de construcción en varios estados del país para incluir normas técnicas complementarias de calentamiento solar de agua.

La NADF-008-AMBT-2005⁵ sirvió de base en los criterios de vivienda sustentable del Código de Edificación de Vivienda, publicado por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). En su capítulo 27, Sustentabilidad, en el apartado correspondiente a las energías renovables establece: “la capacidad de operación del sistema de calentamiento de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar debe ser tal, que provea al menos 50% del consumo energético anual por utilización de agua caliente”.

5.2.3 Programa de Hipotecas Verdes del Infonavit

Es un crédito que cuenta con un monto adicional para financiar viviendas con ecotecnologías que disminuyen los consumos de energía eléctrica, agua y gas, contribuyendo así al uso eficiente y racional de los recursos naturales y al cuidado del medio ambiente.

5.2.4 Subsidio Federal “Ésta es tu Casa”

El propósito de este subsidio operado por CONAVI es que los trabajadores de menores ingresos puedan incorporar tecnologías para el uso eficiente del agua y la energía, entre ellos los sistemas de calentamiento solar de agua.

5.2.5 Programa de Vivienda Sustentable

Este programa busca promover el uso de ecotecnias en las nuevas viviendas construidas por el Instituto de Vivienda del Distrito Federal (INVI).

5.2.6 Estándares de Competencia Laboral

El Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias (CONOCER) es una entidad paraestatal sectorizada en la Secretaría de Educación Pública que impulsa la competitividad de las organizaciones y certifica las competencias de las personas. En el marco de las instalaciones solares térmicas cuenta con los siguientes estándares:

- **EC0325.** Instalación de sistema de calentamiento solar de agua termosifónico en vivienda sustentable.
- **EC0473.** Instalación de sistema de calentamiento solar de agua de circulación forzada con termostanque.

En otros países existen también certificaciones de instaladores de sistemas solares térmicos, lo que asegura que el sistema no presentará fallas debidas a una incorrecta instalación.

5.3 Recomendaciones para el usuario que desee adquirir un sistema solar

- **Comprar sistemas certificados.** En el caso de México, captadores que cuenten con la normas NMX^{2,4} o el DTES-TV³. En el extranjero, certificaciones como la SOLAR-KEYMARK en Europa y las SRCC en Estados Unidos.

- **Instalación de los sistemas con personal capacitado.** Que cuenten con las certificaciones de competencias laborales del CONOCER (EC0325 ó EC0473).
- **Averiguar la cartera de clientes de la empresa o distribuidor.** Con la cartera de clientes y los metros cuadrados instalados, se tendrá una idea clara de lo profesionales que son.
- **Solicitar garantía por escrito de al menos 10 años.**
- **Verificar que el fabricante o distribuidor tenga más años en el mercado que la garantía que ofrece.** Si los proveedores en el mercado llevan bastante tiempo en el negocio difícilmente desaparecerán en caso de requerirlos.

En zonas no costeras, el captador o sistema debe contar con la certificación que avale la prueba de resistencia al impacto para granizos de al menos 25 mm aunque se recomienda que pudieran alcanzar los 35 mm.

En zonas que presentan temperaturas de congelamiento es importante asegurar que los sistemas que se instalen no puedan sufrir daños bajo estas condiciones o tengan dispositivos anticongelamiento.

Referencias

1. ISO 9806:2013 “Solar Energy —Solar Thermal Collectors— Test Methods”
2. NMX-ES-001-NORMEX-2005 “Energía Solar —Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua— Métodos de Prueba y Etiquetado”.
3. Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda (DTESTV)
4. Norma NMX-ES-004-NORMEX-2010 “Energía Solar — evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua— método de prueba.

5. NADF-008-AMBT-2005. Norma ambiental para el Distrito Federal.
6. EN 12976-1:2006 “Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales”.
7. EN 12976-2:2006 “Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo”.
8. “Propuestas para aumentar los beneficios a la población y empresas para el uso del calentamiento solar de agua en México”, International Copper Association Latin America, diciembre 2015.
9. García-Valladares, I. Pilatowsky, V. Ruiz, “Outdoor Test Method to Determine the Thermal Behavior of Solar Domestic Water Heating Systems”, *Solar Energy*, vol. 82, núm. 7, 2008, pp. 613-622.

**Aplicaciones térmicas de la energía solar
en los sectores residencial, servicios e industrial**

editado por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM,
se terminó de imprimir en 9 de abril de 2017, en los talleres de
Comercializadora Naxfra S.A. de C.V., ubicados Cerrada Madroño
Mz 104 Lote 12, Col. Consejo Agrarista Mexicano, Delg. Iztapalapa,
CP. 09760, Ciudad de México.

La edición estuvo al cuidado de Juan Tonda. En la impresión de
interiores se usó papel Couché de 115 g y en los forros cartulina
Couché de 300 g en offset. En su composición se utilizaron tipos
Bodoni Stds y *The Sans* de 8, 11, 14 y 15 puntos.

El tiraje consta de 1,000 ejemplares.

El aprovechamiento de las fuentes de energías renovables dejó de ser una ilusión para convertirse en una realidad para todos aquellos comprometidos con la protección del ambiente.

Hay dos hechos que han cambiado radicalmente nuestra visión del pasado. En primer lugar, el hecho de que el petróleo se va a agotar, y somos testigos de los frecuentes aumentos en los costos de la gasolina y el gas. En segundo lugar, y tal vez más importante, el Cambio Climático Global, que está directamente relacionado con el alto consumo de hidrocarburos de cada nación del planeta, así como la colateral producción de gases de efecto invernadero en los que México contribuye con alrededor de 1%. ¿Cómo podemos contribuir a mitigar estos impactos? Una de las posibles soluciones es aprovechar la energía solar.

Este libro se ha publicado con el objetivo de que sea de utilidad para todas aquellas personas que deseen aprovechar la energía térmica de nuestra “querida estrella”, que sale todas las mañanas: el Sol.

El libro lo coordinaron los doctores Octavio García Valladares e Isaac Pilatowsky Figueroa, ambos investigadores del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, quienes contaron con la colaboración de varios renombrados investigadores de las universidades de Sonora, Campeche, Zacatecas, Morelos e Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Esta obra proporciona información sobre las principales aplicaciones de la energía termosolar que servirá como una importante guía para conocer los principios del calentamiento solar en el sector residencial; de uso sanitario y recreativo; así como otras aplicaciones como son: la climatización de espacios, producción de refrigeración y aire acondicionado; secado de diversos productos; destilación de agua salada, y también aplicaciones industriales y agropecuarias.

El libro será sin lugar a dudas un texto de consulta obligada para quienes deseen aprovechar la energía térmica del Sol.

Octavio García Valladares
e Isaac Pilatowsky Figueroa
Coordinadores



ISBN: 978-6070290053



9 786070 290053