

30061.7

9  
20j



# UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA  
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN CALENTADOR SOLAR  
DE AGUA AUTOCONTENIDO TIPO CAJA PARA USO  
DOMESTICO

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA  
JOSE EUGENIO GOMEZ DIAZ BARRIGA

ASESOR DE TESIS  
ING. JORGE SALCEDO GONZALEZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD LA SALLE

Al Pasante Señor: José Eugenio Gómez Díaz Barriga

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Ud. a continuación el tema que aprobado por esta Dirección, propuso como Asesor de Tesis el Señor Ing. Jorge Salcedo González, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista con área principal en Ingeniería Mecánica.

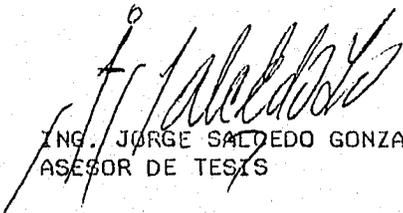
"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA  
AUTOCONTENIDO TIPO CAJA PARA USO DOMESTICO"

con el siguiente índice:

	INTRODUCCION
CAPITULO I	ANTECEDENTES GENERALES
CAPITULO II	EL CALENTADOR SOLAR AUTOCONTENIDO
CAPITULO III	MARCO TEORICO DE REFERENCIA
CAPITULO IV	MARCO METODOLOGICO
CAPITULO V	ANALISIS DE RESULTADOS
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA

Ruego a Ud., tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

A T E N T A M E N T E  
"INDIVISA MANENT"  
ESCUELA DE INGENIERIA  
México, D.F., a 4 de Enero de 1996

  
ING. JORGE SALCEDO GONZALEZ  
ASESOR DE TESIS

  
ING. EDMUNDO BARRERA MONSIVAIS  
D I R E C T O R

## INDICE

Introducción	[ 1 ]
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Antecedentes Generales</b>	[ 5 ]
1. Usos, disponibilidad y alternativas de fuentes energéticas	[ 6 ]
2. Usos de la energía solar	[ 10 ]
2.1 <i>Historia</i>	[ 10 ]
2.2 <i>Utilización actual</i>	[ 12 ]
3. La energía solar para el calentamiento de agua	[ 15 ]
<b>Capítulo 2</b>	
<b>El Calentador Solar Autocontenido</b>	[ 22 ]
1. Planteamiento del problema	[ 23 ]
2. El calentamiento del agua a través del Sol	[ 24 ]
3. Los Calentadores Solares Autocontenidos	[ 25 ]
4. El modelo propuesto (tipo caja)	[ 26 ]
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Marco Teórico de Referencia</b>	[ 30 ]
1. El Sol como Fuente Inagotable de Energía	[ 31 ]
2. Posición del Sol y Hora Solar	[ 34 ]
2.1 <i>Posición del Sol</i>	[ 34 ]
2.2 <i>Hora Solar</i>	[ 39 ]
3. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada	[ 42 ]
4. Medición de la radiación solar	[ 44 ]
5. Aspectos de Transferencia de Calor	[ 46 ]
5.1 <i>Radiación</i>	[ 47 ]
5.1.1 <i>Propiedades básicas de la radiación</i>	[ 48 ]
5.1.2 <i>Radiación y longitud de onda</i>	[ 49 ]
5.2 <i>Conducción</i>	[ 52 ]
5.3 <i>Convección</i>	[ 54 ]
5.4 <i>Eficiencia</i>	[ 56 ]
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Marco Metodológico</b>	[ 59 ]
1. Equipo disponible para la evaluación	[ 61 ]
1.1 <i>Equipo con que cuentan los calentadores</i>	[ 61 ]
1.2 <i>Equipo para la medición de la radiación solar</i>	[ 62 ]
1.3 <i>Equipo y herramientas para procesar datos</i>	[ 63 ]

<b>2. Metodología de la Evaluación</b>	[ 64 ]
<b>2.1 La metodología en general</b>	[ 64 ]
a) <i>Primera Fase</i>	[ 64 ]
b) <i>Segunda Fase</i>	[ 65 ]
c) <i>Tercera Fase</i>	[ 65 ]
d) <i>Cuarta Fase</i>	[ 66 ]
e) <i>Quinta Fase</i>	[ 67 ]
f) <i>Sexta Fase</i>	[ 67 ]
<b>2.2 Algunos aspectos sobre la metodología</b>	[ 68 ]
2.2.1 <i>La medición de las temperaturas</i>	[ 68 ]
2.2.2 <i>La medición de la radiación solar</i>	[ 70 ]
2.2.3 <i>La limpieza de los vidrios</i>	[ 70 ]
2.2.4 <i>El llenado de los calentadores y la adición de agua</i>	[ 71 ]

## Capítulo 5

<b>Análisis de Resultados</b>	[ 72 ]
<b>1. Comportamiento general de un CSATC</b>	[ 73 ]
<b>2. Primera Fase</b>	[ 76 ]
<b>3. Segunda Fase</b>	[ 81 ]
3.1 <i>Incremento de temperatura durante las horas de colección</i>	[ 82 ]
3.2 <i>Incrementos de temperaturas globales</i>	[ 83 ]
3.3 <i>Eficiencias de colección y eficiencias globales</i>	[ 84 ]
<b>4. Tercera Fase</b>	[ 86 ]
4.1 <i>Temperaturas al finalizar el día</i>	[ 86 ]
4.2 <i>Decrementos de temperatura nocturnos</i>	[ 87 ]
4.3 <i>Eficiencias de colección y eficiencias globales</i>	[ 88 ]
<b>5. Cuarta Fase</b>	[ 90 ]
5.1 <i>Incrementos de temperatura durante las horas de colección</i>	[ 90 ]
5.2 <i>Decrementos de temperatura por la noche</i>	[ 91 ]
5.3 <i>Eficiencias de colección y eficiencias globales</i>	[ 93 ]
<b>6. Quinta Fase</b>	[ 95 ]
6.1 <i>Incrementos de temperatura durante las horas de colección</i>	[ 96 ]
6.2 <i>Decrementos de temperatura nocturnos e incrementos globales</i>	[ 97 ]
6.3 <i>Eficiencias de colección y eficiencias globales</i>	[ 99 ]
<b>7. Sexta Fase</b>	[ 100 ]
7.1 <i>Incrementos de temperatura durante las horas de colección</i>	[ 101 ]
7.2 <i>Decrementos de temperatura nocturnos e incrementos globales</i>	[ 103 ]
7.3 <i>Eficiencias de colección y eficiencias globales</i>	[ 104 ]
<b>Conclusiones</b>	[ 107 ]
<b>Bibliografía</b>	[ 112 ]

---

# **Introducción**

## INTRODUCCION

El presente trabajo fue impulsado por la necesidad de muchas familias, principalmente de comunidades rurales, de disponer de agua caliente para uso doméstico. Familias cuyas comunidades, o no cuentan con abastecimiento de combustibles convencionales (gas, petróleo diáfano, etc.) o, que contando con él, el gasto que supondría a la larga su utilización se convertiría en gravoso para sus economías.

Por un lado está la necesidad de agua caliente para uso doméstico y por otro, la escasa disponibilidad de combustibles convencionales junto con lo gravoso, a largo plazo, de la erogación que supone su utilización. Entonces, nuestro problema se reduce a:

- a) tratar de abastecer un gasto de agua caliente suficiente,
- b) mediante la utilización de un dispositivo barato, capaz de incrementar la temperatura del agua y,
- c) cuya operación no suponga una erogación significativa de recursos económicos para las familias que lo utilicen.

Una alternativa energética que podría permitir la solución de este problema es la utilización de la radiación solar. De tal forma que se trataría de evaluar y recomendar, en caso de que los resultados de la investigación fueran favorables, la utilización de un tipo de calentador solar para agua.

¿Por qué un calentador solar? Porque el costo de operación que ofrecen los calentadores solares es notablemente menor que el de calentadores de agua que queman algún combustible para transferir calor al agua. Es cierto, que necesitan operarse en lugares, donde se pueda asegurar una insolación suficiente para elevar la temperatura del agua en un día. Por esto, es obvio, que sólo se recomendará operar algún dispositivo que aproveche la radiación del sol, siempre y cuando, en el lugar de operación se cuente con insolación adecuada para que su uso sea eficaz.

Se decidió experimentar y evaluar el comportamiento de un Calentador de agua Autocontenido de 200 litros de capacidad, dado su bajo costo de manufactura, su facilidad y su bajo costo de operación.

Vale la pena decir aquí una breve palabra sobre este tipo de calentadores para apuntar el reto técnico que supone su estudio.

El Calentador Solar Autocontenido, dado su diseño, presenta una desventaja inmediata, por lo menos frente al Calentador Solar de Convección Natural (que es el modelo que más éxito comercial ha tenido hasta nuestros días). El modelo de Convección Natural efectúa el proceso de calentamiento en un dispositivo específicamente diseñado para ello, y almacena el agua, ya calentada, en otro dispositivo, también diseñado *ex profeso* para no dejar que el agua pierda, tan rápidamente, el calor ganado.

Los Calentadores Solares Autocontenidos se diferencian de los de Convección Natural en que en un mismo dispositivo se calienta y se almacena el agua calentada. Son recipientes aislados térmicamente en la mayor parte de su superficie; pero que su superficie no aislada (la superior), les sirve como colector de la energía solar.

El reto técnico que ofrecen los Calentadores Solares Autocontenidos, viene dado en virtud de que en ellos, se trata de que el proceso de calentamiento y el de almacenamiento, se realicen en el mismo dispositivo. Así, la superficie que sirve como colector durante el día, en la noche sin desearlo, funciona como un radiador de energía al exterior, ya que virtualmente queda expuesta a la intemperie. Este fenómeno de radiación nocturna, hacia el exterior, hace que pierdan parte del calor ganado, lo cual es un efecto no deseado.

Precisamente, el tratar de disminuir las pérdidas nocturnas y aumentar la eficiencia de colección, serían dos tópicos que habría que atender para mejorar el desempeño de los Calentadores Solares Autocontenidos y, a su vez, es el reto

técnico que presentan.

Al tratar de superar estos problemas técnicos se pretende ayudar a con un aporte humilde pero útil, a solucionar la necesidad de agua caliente para uso doméstico de algunas familias de bajos recursos, principalmente en comunidades rurales, cuyas localidades cuenten con insolación suficiente para operar este tipo de calentadores.

# **Capítulo 1**

## **Antecedentes Generales**

## ANTECEDENTES GENERALES

### 1. Usos, disponibilidad y alternativas de fuentes energéticas.

Son por todos conocidas las fuentes naturales de energía que se extraen del fondo de la tierra: petróleo, gas, fuentes termales de agua, carbón, o uranio para su utilización en la energía nuclear, etc.

Estas fuentes energéticas se usan principalmente en la producción de electricidad, cuyos usufructuarios son las industrias, las oficinas, los comercios y las casas habitación; también se usan como fuentes caloríficas en diversos procesos industriales o en motores de combustión interna para autotransportes que, contribuyen para la distribución de insumos domésticos o industriales, o para la transportación de personas.

Pero todavía no es tan difundida la conciencia de que el sol es la principal fuente de energía que dispone la humanidad.

Estamos habituados a quemar carbón, madera o productos derivados del petróleo, sin caer en la cuenta de que ellos, en última instancia, tienen su origen en la energía solar.

En tan sólo 100 años, la humanidad ha consumido la mayor parte de la reserva conocida de combustibles fósiles (petróleo y gas natural), cuya formación inicial como materias vegetales, y ulterior transformación y almacenamiento, data de millones de años.

Todavía existen personas que no ven en el sol una fuente de abastecimiento energético que puedan utilizar cotidianamente. Ello se puede deber a que el uso del carbón, hidrocarburos y la electricidad (generada ya sea hidráulicamente, por plantas termoeléctricas o nucleoelectricas) no los haya hecho detenerse a pensar en la existencia de esta otra fuente, que puede cubrir inmediatamente parte de sus necesidades. Es posible que se hayan dejado llevar por la ilusión de que tanto el carbón, como los hidrocarburos y el gas natural fueran eternos. Esta ilusión, sin

lugar a dudas, es falsa.

La tierra recibe anualmente  $7 \times 10^7$  kWh gracias a la radiación solar. Sin embargo, con sus centrales eléctricas y otras instalaciones, el hombre (hasta 1977) no podía generar al año más que  $4 \times 10^3$  kWh<sup>1</sup>. Y aquella, es precisamente la energía que no nos cuesta un sólo centavo y que podríamos usar para: calefacción de viviendas, producción y acumulación de agua caliente, extracción de sal de los océanos, desalinización de agua salada, acondicionamiento de aire, cocción de alimentos, fundición de piezas cerámicas y muchas otras aplicaciones que hasta ahora requieren de un consumo cuantioso de combustible.

El carbón mineral es demasiado valioso para ser quemado indiscriminadamente, pues, al igual que el petróleo, contiene sustancias que son indispensables para las industrias química y de plásticos. No hemos caído en la cuenta de que esos productos no renovables que tanto utilizamos, están en vías de agotamiento y ello debería ser motivo de gran preocupación para nosotros.

Este hecho plantea a la humanidad el reto de redefinir el uso de esas materias primas en orden a poderlas utilizar con mayor provecho en épocas venideras y, suplir su desmesurada utilización para la obtención de energía en nuestros días, por otras fuentes energéticas que hasta ahora se han menospreciado. Tal es el caso de las energías solar y la eólica.

En lo que respecta al tiempo durante el cual los diversos países podrán seguir utilizando, como hasta ahora, el petróleo y gas natural, la respuesta varía según las diferentes investigaciones que se han hecho, pero en el mejor de los casos, los investigadores prevén que podrán seguir haciéndolo, hasta entrada la segunda mitad del siglo entrante.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> H. Rau, Energía Solar: aplicaciones prácticas, Marcombo Boixareu Editores, España 1981, p. 2

<sup>2</sup> Escuchado en "La energía Solar", conferencia sustentada por el Ing. Alfredo Heredia, investigador del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Algunos podrán sugerir que para entonces las investigaciones para el aprovechamiento de otras fuentes energéticas se encontrarán tan avanzadas que, el cambio de la utilización de una fuente (petróleo y gas natural) a la utilización de la otra (solar o eólica), no se reflejará en pérdidas de confort en lo que se refiere a la cobertura de las necesidades energéticas. Si bien, podríamos con ciertas reservas estar de acuerdo con los que piensan así; nos surgen las siguientes preguntas: para entonces, ¿qué porcentaje de las reservas de recursos naturales no renovables habremos consumido?, ¿qué reserva de los mismos les dejaremos a las generaciones futuras?

La respuesta obvia a estas preguntas nos centra en la discusión de un tema de profunda actualidad, ya que las decisiones que tomemos actualmente, en materia del uso de nuestras fuentes energéticas y materias primas, tienen que contemplar el patrimonio que dejamos para el futuro de la humanidad. Si a esto le aumentamos el daño ecológico que podemos causar, y que de hecho se está causando a los ecosistemas, en virtud de la excesiva utilización de los recursos naturales no renovables y el manejo de desechos industriales y radiactivos, nos impele a detenemos a considerar seriamente el rumbo que hemos dado al desarrollo científico y tecnológico, y el rumbo que deberemos darle.

Por ello necesitamos que la investigación que se realice actualmente sobre el uso de la energía solar, cuente con recursos económicos y humanos suficientes para dejar una herencia, técnica y de recursos naturales no renovables, que las futuras generaciones puedan usar en forma ordenada y orientada a la prosecución de un beneficio real para todos.

En otro orden de cosas, pero siendo también un argumento contundente para amparar el uso de la energía solar de manera inmediata, está el hecho de que gran parte de la humanidad no cuenta con un suministro adecuado de energía (eléctrica y/o calorífica) por parte de sus gobiernos. En nuestro país, por mencionar un

ejemplo, hasta 1989 (según datos del IMP) el 25% de la población total no contaba con energía eléctrica; en Chiapas donde se produce un alto porcentaje de la energía eléctrica del país, sólo una de cada tres familias contaba con ella; todavía en el D.F. había numerosas casas que utilizaban petróleo diáfano para la cocción de sus alimentos, una inmensa mayoría de los habitantes de zonas suburbanas marginales no contaba con agua corriente, y, por lo tanto, mucho menos con agua caliente para aseo personal<sup>3</sup>. Si ello sucedía con habitantes de la ciudad más desarrollada del país, es de suponerse que, pese a el tiempo que ha pasado y a los programas de asistencia social que las instancias gubernamentales han implementado, y que por demás los sucesos de enero de 1994 demostraron que eran insuficientes, la situación en el campo es aún más grave.

Estos datos hablan por sí solos y ante ellos sólo queda la alternativa de tratar de sumar esfuerzos para aliviar, cuando menos, parte de las necesidades que nos evidencian.

Una fuente energética que puede disponerse con relativa facilidad, pero con una inversión inicial también relativamente alta es la que nos aporta el sol. Tocaría a las instituciones de investigación, tratar de abatir lo más que se pueda estos costos iniciales, mediante el diseño de dispositivos baratos, para hacer atractiva y técnicamente disponible esta fuente a los sectores que más lo necesitan.

La energía solar es una fuente cargada de esperanzas, especialmente en las zonas rurales y soleadas; aunque no puede competir con fuentes convencionales de energía allí donde éstas sean abundantes, ni en climas nubosos o en las grandes ciudades donde la cantidad de energía solar respecto del espacio disponible, es demasiado pequeña para abastecer a la demanda total de energía.

Los países menos desarrollados económicamente son los que tienen una urgencia más inmediata de investigación sobre energía solar. Los altamente

---

<sup>3</sup> Conferencia citada del Ing. Alfredo Heredia.

industrializados y los que cuentan con abundantes reservas de combustibles necesitan una investigación a más largo plazo, porque los combustibles fósiles no durarán para siempre y con seguridad aumentará su precio.

Si parte de los recursos que ahora se destinan a la investigación de la energía atómica, a la investigación espacial o militar, se dirigiesen a la investigación seria y ordenada, con miras a implementar mejores formas de utilización de la energía solar, se podría avanzar notablemente. Ya que la energía solar no es algo azaroso; es seguro que funciona. Se ha demostrado que ésta, calentará, enfriará, potabilizará agua y generará fuerza y electricidad. Aquí, el problema consiste en buscar y encontrar la forma de hacerlo con costos competitivos con los que ofrecen los métodos actuales basados en combustible, electricidad, fuerza animal o humana, en cualquier lugar determinado.

## **2. Usos de la energía solar.**

### **2.1 Historia**

El empleo de la energía solar no es tan nuevo como algunos pensarían a primera vista. A continuación haré una breve reseña de su uso premeditado a lo largo de la historia.

De Arquímedes (287-212 a. C.), se dice que en el asedio de Siracusa por los romanos, incendió las naves enemigas con ayuda de un espejo cóncavo (Galeno, "*De temperamentis*").

Según nos indica Plutarco, en tiempos de Numa Pompilio (714-671 a. C.) se encendía el fuego sagrado con ayuda de copas metálicas de forma cónica en las

---

<sup>4</sup> Sólo véase rápidamente la obra citada de Hans Rau, y otras obras afines.

que se concentraban los rayos del sol. Parece que los Incas también utilizaron dispositivos similares para preparar el ágape sagrado.

De los siguientes dieciocho siglos, la historia no nos da cuenta de algún uso premeditado de la energía solar (a no ser por el secado de carne y de hojas de algunas plantas con fines medicinales), hasta que a un físico se le ocurrió repetir y mejorar el experimento del espejo de Arquímedes: Anastasio Kircher (1601-1680) realizó experimentos sin la intención de incendiar naves, pero sí con la de comprobar desde qué distancia se podía incendiar un haz de leña con ayuda de espejos cóncavos.

En 1694, en Florencia, se realizaron experimentos que pretendían volatilizar diamantes con la ayuda de la energía solar. Averani y Targioni querían ser los primeros en lograr la muerte de un diamante.

El alemán Ehrenfried von Tschirnhaus (1651-1708) logró fundir masas cerámicas con la ayuda de espejos. El duque de Orleans, en 1699 apremió a su médico de cabecera para que usara uno de los espejos de Tschirnhaus para que ensayara la fusión de oro y platino.

En 1747 Georges Leclerc Buffon con un dispositivo que usaba 168 espejos logro incendiar un haz de leña a 60 metros de distancia. También logró fundir plomo a una distancia de 39 metros y plata desde 18 m. Con estos experimentos desmintió a Descartes que consideraba la azaña de Arquímedes como pura leyenda. Más tarde con espejos parabólicos logró fundir plomo a una distancia de 100 metros. Estos experimentos, aunados a sus investigaciones científicas de otros órdenes llevaron a Luis XV a concederle el título de conde.

Claude Servais Pouillet (1791-1868) calculó la energía calorífica útil aprovechable del Sol sobre un metro cuadrado de superficie entre el ecuador y el paralelo 43 de latitud norte o sur con un grado de precisión del orden del 98.6% comparado con el que actualmente se ha comprobado.

Ejemplos similares a estos y todavía más notables han sido fruto de las investigaciones de grandes científicos desde el siglo XVII hasta nuestros días. Baste la mención rápida de Nicolás de Saussure (1749-1799), Laurent Lavoisier (1743-1794), Jacques Cassini (s. XVII), Henry Bessemer (1813-1898), Agustín Mouchot (1825-1911), y por supuesto, Samuel Pierpont Langley a cuyo honor debemos el nombre de la medida que hasta hace poco se utilizaba para denominar a la irradiancia solar.<sup>5</sup>

## 2.2 *Utilización actual*

Paulatinamente se ha ido cobrando conciencia de la evidencia de que los combustibles fósiles llegarán a agotarse. La crisis conocida como "Crisis del Petróleo" que se dio en los años 1973-1974 hizo que muchos países voltearan los ojos y consideraran con más detenimiento otras fuentes de energía.

Francia, a partir de 1975 ha dedicado recursos a la investigación para la sustitución de sus sistemas de calefacción por otros que usen energía solar. Ha apoyado los proyectos previa aprobación técnica de su viabilidad.

La Comunidad Económica Europea en el período comprendido entre 1976 y 1979 dedicó buenas sumas económicas a la investigación de celdas fotovoltaicas y el estudio de centrales eléctricas solares de 1 MW.

Por su lado la entonces Alemania Occidental a través de su Ministerio de Investigación y Tecnología, destinó progresivamente mayores cantidades de recursos económicos tendientes a apoyar la investigación de celdas solares y

---

<sup>5</sup> Los datos históricos de este apartado fueron tomados de:

- H. Rau, *Op. Cit.*
- K. Butti and J. Perlin, The Golden Thread, Van Nostrand Reinhold, Palo Alto California 1980

centrales eléctricas, así como para calefacción y acondicionamiento de aire de viviendas a través de la energía solar.

Japón, a través del proyecto gubernamental "Sunshine", también ha dedicado esfuerzo a este propósito. Hitachi Ltd. ha investigado y desarrollado sistemas de colectores parabólicos cilíndricos. Por su parte Mitsubishi Heavy Industries Ltd. y Nippon Kogaku hacen su parte en la investigación para el desarrollo de centrales eléctricas solares de alta eficacia, que planean tener en servicio algunas de estas para el año 2000.

También los E.E.U.U. han procurado investigar sobre sus necesidades, y, dada la demanda energética que les representa la calefacción y el acondicionamiento del aire, junto con el excesivo uso de energía eléctrica, los ha llevado a destinar recursos para coadyuvar a la solución de estos problemas a través de dispositivos que aprovechen la energía solar.

Quizá uno de los países que más recursos y medidas gubernamentales eficaces ha implementado para la sustitución de fuentes energéticas convencionales por otras alternativas es Australia: dada la complejidad del problema energético, han tomado medidas que van desde la investigación en de la energía solar, hasta el aprovechamiento de hulla y lignito cuya reserva comprobada para ese país, a un gasto promedio anual similar al que se dio en 1976, sería aprovechable por casi 5 siglos. Por otro lado, regresando al campo de la energía solar, la Academia Australiana de las Ciencias ha propuesto cubrir para el año 2,000, la mitad de las necesidades energéticas del país a través de esta fuente energética.

Las medidas que ha tomado el gobierno australiano van orientadas a apoyar la sustitución de la energía eléctrica en la producción de agua caliente, a su vez, ha destinado a instituciones de investigación, importantes recursos y medios para su quehacer. Estos esfuerzos han resultado en proyectos eficaces que han permitido economizar (hasta 1977) el 65% de la energía necesaria para la producción de agua

caliente. Se ha llegado a desarrollar un dispositivo para tal efecto que se puede amortizar en un lapso que va desde los 2 a los 5 años (dependiendo del país en que se implemente), comparando su precio con la erogación que supondría calentar el mismo volumen de agua con energía eléctrica.

Nuestro país también ha incursionado en el campo de la investigación para el aprovechamiento de la energía solar, de hecho, anualmente la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) edita un anuario donde se exponen algunos estudios que sobre el tema se han desarrollado en la República Mexicana. Existen centros bastante serios dedicados específicamente a la investigación del aprovechamiento de la energía solar. La UNAM, el IPN, y otras casas de estudios, como el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), tienen departamentos destinados a ello, y algunos de los proyectos allí desarrollados se encuentran funcionando en distintas partes del País.

Las investigaciones nacionales no solo tienden a la creación de dispositivos manufacturables, sino que también se insiste en investigaciones de carácter más teórico que permitan finalmente canalizarse en diferentes dispositivos.

Hasta aquí hemos visto los esfuerzos de diferentes centros de investigación que cuentan con mayor o menor apoyo de sus gobiernos, también cómo algunos de los proyectos tienden a la solución del problema del suministro de energía eléctrica y otros contribuyen a la sustitución de fuentes caloríficas convencionales por la energía que nos aporta el Sol. A su vez, hemos observado el empeño que algunos países han hecho para suministrar agua caliente con esta fuente energética, que es precisamente la línea en la que el presente trabajo quiere aportar su grano de arena.

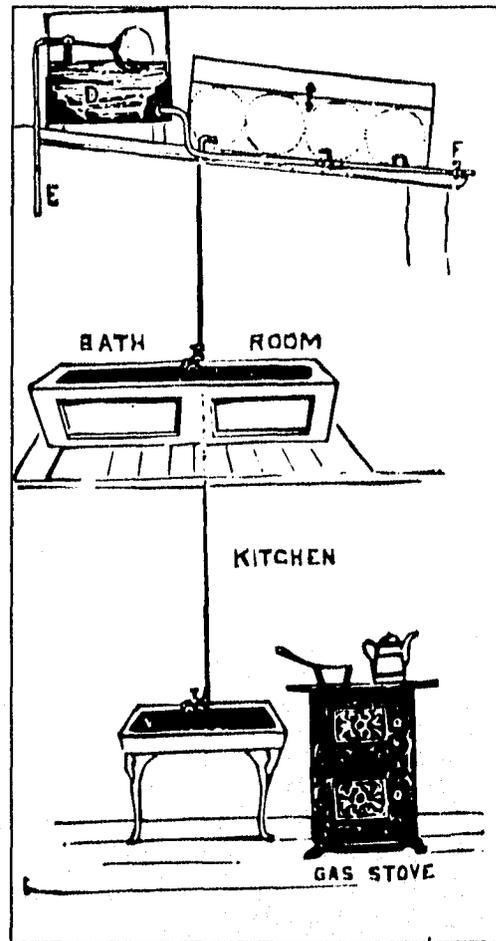
### 3. La Energía Solar para el calentamiento del agua.

A finales del siglo pasado el calentamiento de agua para uso doméstico daba bastantes problemas y se realizaba principalmente en estufas de carbón a través de recipientes que se colocaban en las hornillas y posteriormente se trasladaba el agua caliente a la tina de baño. También surgieron arreglos más eficaces que hacían circular dentro del fogón de dichas estufas, serpentines de tubería que eran calentados por la combustión de la misma estufa, a través de los serpentines circulaba agua que era finalmente depositada en unos tanques, colocados al lado de la estufa y conectados a la red de tubería doméstica. En cualquier caso el calentamiento no era de lo más eficiente, ya que los tanques operaban sin ningún recubrimiento térmico y perdían, con facilidad, el calor ganado con la combustión. Otra desventaja de estos sistemas era que había que consumir combustible premeditadamente para el calentamiento del agua.

Una forma que se comenzó a utilizar a finales del siglo pasado y que fue la primer manera de tratar de aprovechar la radiación del Sol para este fin, fue colocar tanques pintados de negro en los techos de las casas, donde se facilitaba su exposición a la radiación. Estos fueron los primeros calentadores solares de agua de que se tiene registro, de hecho algunos usufructuarios llegaron a comentar: *"el agua puede llegar a estar tan caliente que es necesario agregar agua fría para tomar un baño"*.

El problema con estos calentadores solares no consistía en que si eran capaces de calentar el agua, sino cuándo y por cuánto tiempo. En días soleados podían calentar el agua a una temperatura suficiente para usos domésticos hacia mitad de la tarde, pero cuando el Sol se ponía, rápidamente disminuía la temperatura ganada gracias a que estaban a la intemperie y, por tanto expuestos a las corrientes nocturnas de aire.

Estos problemas trajeron la atención de Clarence M. Kemp, un inventor y fabricante de Baltimore, quien en 1891 patentó una nueva forma de aprovechar la radiación solar para el calentamiento del agua. Su invento fue sencillo, simplemente recuperó la práctica de calentamiento solar de agua que ya se tenía, pero hizo que varios tanques se depositaran en una caja con superficie superior de vidrio que permitiera el paso de los rayos solares. Con esto logró disminuir notablemente las pérdidas nocturnas ya que se tenía a los tanques en un medio menos hostil que la brisa nocturna.



Ilustrac. 1 Arreglo del "Climax Solar-Water Heater"

Kemp bautizó a su invento con el nombre de "Climax Solar-Water Heater". Estos calentadores estaban conectados a la red de tubería doméstica y eran llenados por un pequeño tinaco con flotador que se colocaba encima de la caja colectora para evitar una desmesurada presión hidrostática, como se aprecia en la Ilustración 1.

La propaganda que utilizó para aumentar sus ventas advertía: "las amas de casa podrán disponer de agua caliente sin tener que preocuparse de haberla calentado previamente" y, por supuesto, "la operación del calentador no cuesta nada".

El calentador "Climax" tuvo un franco aumento en su demanda, a tal grado que para 1895, cuando ya se distribuía en California, se pudo verificar que más de 1600 hogares disponían de este tipo de calentadores.

De todas formas, no se logró tener agua caliente para todas las épocas del año, con lo cual se tenía que recurrir a formas anteriores para el calentamiento del agua.

En 1905 Aubrey Eneas compró los derechos de manufactura del "Climax" para el sur de California e introdujo un cambio notable: el modelo ya no contemplaría varios tanques dentro de una caja sino a un solo tanque rectangular dentro de la misma, en vez de los arreglos de tres o cuatro cilindros pequeños. Con ello se logró que el aprovechamiento de la radiación solar por unidad de área fuera más eficiente, de hecho llegaron a notar que aún en días nublados se disponía de agua caliente. Se podría decir que este fue el protocalentador solar autocontenido tipo caja. Aunado a este cambio, Eneas recomendó hacer arreglos en la disposición de la tubería que permitieran utilizar, en caso necesario, las antiguas estufas que calentaban el agua. A este nuevo arreglo se le llamó: "Improved Climax Solar Heater".

El arreglo recomendado tomaba ya en cuenta que durante cuatro meses del año no se podía disponer de agua caliente a través del calentador solar y por ello recomendaba la conexión de los antiguos sistemas de calentamiento. Vale la pena mencionar que durante los ocho meses que podía el calentador operar eficazmente, se llegaban a obtener hasta 50 °C de temperatura del agua.

Pasaron los años y no fue sino hasta la época de la postguerra (segunda guerra mundial) en que algunos países que no tenían acceso cómodo a las fuentes de hidrocarburos vieron en el establecimiento de industrias que aprovecharan la energía solar para el calentamiento de agua una fuente alternativa para sus

necesidades diarias. Florecieron negocios en Japón e Israel en la década de los cincuentas, además de que en Australia y en la parte sur del continente africano se comenzaron a implementar proyectos de esta naturaleza.

El comienzo de esta industria en Israel es curioso ya que se desprendió de la necesidad de una madre de familia de disponer de agua caliente para bañar a sus hijos. Era la época en que Israel no podía disponer fácilmente de hidrocarburos por su reciente formación como Estado y el consiguiente bloqueo comercial por los países productores de petróleo en el golfo pérsico. De hecho muchas familias israelitas se acostumbraron al baño con agua fría como un sacrificio en aras a la consolidación de su Estado recientemente formado; pero Rina Yissar quien fue descrita por uno de sus hijos como una persona *"sin ninguna formación técnica pero con un gran sentido común"* se rehusó a resignarse a la creciente costumbre del baño con agua fría, y, sin saber de los primeros calentadores solares que se implementaron en los Estados Unidos llegó a la misma idea: tomó un tanque viejo, lo pintó de negro, lo llenó de agua y lo expuso al sol, de tal forma que en algunas horas podía ya disponer de agua caliente para bañar a sus hijos. Su esposo Levi Yissar (un ingeniero civil) se sorprendió de la idea de su esposa y se dispuso a estudiar la literatura existente hasta entonces sobre el calentamiento de agua a través de la radiación solar, estudió los dispositivos que habían sido probados en California y Florida, y asistió a una conferencia internacional de energía solar en 1950.

Regresando a casa Levi puso en práctica sus conocimientos de colección solar y almacenamiento térmico, introdujo muchas innovaciones propias y construyó un prototipo de calentador solar de agua. Al principio *"nadie creía que el Sol podía dotar de agua caliente a una casa para todas sus necesidades...se mantenían escépticos"* comentaba Levi, pero hizo caso omiso de las críticas que recibía y en poco tiempo llegó a desarrollar un calentador que dotaba de agua

caliente a la familia en todas sus necesidades diarias. Pronto fueron instalados otros 25 calentadores iguales al suyo en el suburbio de Tel Aviv en que vivía. La única alternativa que había para su calentador era el calentamiento de agua por medio de la energía eléctrica pero era demasiado cara. En 1953 Levi logró reunir suficiente capital y constituyó su propia fábrica de calentadores: la compañía "Ner-Yah" fue la primera en Israel en fabricar calentadores solares de agua. De hecho uno de sus primeros clientes fue el que actualmente se considera el Padre del Estado Moderno Israelita: David Ben Gurion. En menos de un año la compañía de Levi Yissar había vendido más de 1600 calentadores solares para agua.

Pronto, no sólo en Israel, sino en otros países se establecieron fábricas que manufacturaban calentadores solares. Muchas de ellas violaron los derechos de autor respecto del invento de Yissar, así que el gobierno israelita otorgó a una fábrica grande y eficiente, llamada "Miromit", todos los derechos sobre la construcción del invento de Yissar y le permitió usar la primera superficie selectiva para aprovechar más eficazmente la radiación solar. Esta superficie selectiva inhibía la radiación térmica del colector y, por consiguiente, logró cortar las pérdidas de calor en un 30%.

Ya por su cuenta, Miromit continuó introduciendo cambios en el modelo de Yissar e investigando sobre otras formas de colectores solares y arreglos para el calentamiento de agua.

Introdujo serpentines en los colectores planos, los cuales no quedaban soldados a la placa colectora ya que se preveía poderlos cambiar con relativa facilidad cuando los depósitos de minerales y sarro en los tubos bajaran la eficiencia de colección. Introdujo sus colectores en una caja térmica con lo cual logró: reducir pérdidas debidas a la inclemencia del clima y mantenerlos alejados del polvo y la lluvia que disminuían las ganancias de calor. El agua calentada en el colector era depositada en un recipiente térmicamente aislado para mantenerla

caliente el mayor tiempo posible. Con esto llegamos a lo que actualmente conocemos como el modelo de Calentador Solar para agua de Convección Natural.

Las innovaciones que introducía Miromit fueron rápidamente adoptadas por toda la competencia. Llegaron a asumir irracionalmente cualquier cambio que esta fábrica israelita hiciera. Hay una anécdota curiosa a este respecto: una ocasión Miromit decidió, por razones puramente estéticas, cambiar el color del exterior de la caja donde colocaba el colector; ello bastó para que las demás compañías también lo hicieran, porque, según ellas "*tenía que haber una razón científica oculta que justificara el cambio*".

Hacia 1967 Miromit exportaba calentadores a más de 60 países de todo el mundo y era una industria en abierta expansión. Lamentablemente, recordemos que en ese año se realizó la Guerra de los Seis Días, con la cual Israel se anexó importantes franjas territoriales pertenecientes hasta entonces a los palestinos, que le hicieron tener acceso directo a fuentes de hidrocarburos con lo cual terminaron varias décadas de gran escasez de petróleo. Este hecho tuvo un impacto devastador en la industria del calentamiento solar de agua ya que al no tener la necesidad anterior de sustituir fuentes energéticas (Sol por petróleo) rápidamente disminuyeron las ventas de calentadores solares de agua. Esto, consiguientemente trajo la desincentivación del desarrollo de proyectos de esta naturaleza.

De hecho esta falta de incentivo para el desarrollo de calentadores solares la resentimos hasta nuestros días ya que el modelo que desarrolló Miromit no ha sido mejorado sustancialmente, a no ser por la investigación que se está haciendo actualmente en Alemania para sustituir las capas de vidrio que tradicionalmente se han utilizado, por un aislante transparente<sup>7</sup> que permitirá el paso de la radiación

---

<sup>6</sup> La mayoría de los datos del presente apartado fueron tomados de:  
K. Butti and J. Perlin, *Op. Cit.*

<sup>7</sup> M. Rommel and A. Wagner, Application of Transparent Insulation Materials in improved Flat-Plate Collectors and Integrated Collector Storages, *Solar Energy* 49, 371-380, November 1992

solar pero mejorará notablemente el funcionamiento de los calentadores, debido a que las pérdidas de calor nocturnas se reducirán ostensiblemente.

## **Capítulo 2**

# **El Calentador Solar Autocontenido**

## EL CALENTADOR SOLAR AUTOCONTENIDO

### 1. Planteamiento del problema

Se había enunciado que este trabajo pretende colaborar un poco en el campo de las alternativas para el calentamiento de agua, es decir: tomando en cuenta las necesidades, las alternativas y las consideraciones iniciales de cara al problema, se decidió experimentar un calentador de agua que aprovechara la energía del sol, pero que fuera de manufactura sencilla y bajo costo.

El Calentador Solar Autocontenido ofrecía esas ventajas inmediatas, ya que; primero: siendo el sol su fuente energética, se logra abatir los costos de operación; segundo: dado que el sol es disponible en amplias regiones de nuestro país tal como se requiere para operar estos dispositivos, se soluciona el problema del suministro de combustibles, y tercero: supuesto que los Calentadores Solares Autocontenidos (en adelante CSA), efectúan los procesos de calentamiento y de almacenamiento en el mismo dispositivo, se puede lograr disminuir el costo de producción.

El espacio que ocupa un CSA es menor al que requiere uno de Convección Natural por el hecho de ser un sólo dispositivo. La facilidad de manufactura es notablemente mayor dado que no se requiere de tantas estructuras para sostenerlo, ni de implementos herramientas más sofisticados para su construcción, como en el caso de la manufactura de un calentador de Convección Natural (en adelante CSCN).

Quedaba entonces el poder encontrar la mejor forma de operación de dichos Calentadores para disminuir lo más posible las pérdidas que, en virtud de su diseño, presentan, dado que la superficie que sirve de colector durante el día, en la noche funciona como radiador, arrojando al exterior parte del calor absorbido por el agua durante las horas de insolación.

## 2. El calentamiento de agua a través del Sol

Antes de entrar a describir el calentador que se propuso, habrá que: 1) mencionar con mayor profundidad los tipos de colectores que se utilizan para el calentamiento del agua, 2) explicar la causa por la cual se optó por uno de ellos, para finalmente, 3) describir el modelo de calentador propuesto de acuerdo a los criterios que hayan sido expuestos.

Al hojear cualquier libro referente al calentamiento de agua mediante el uso directo de la energía solar se puede encontrar que existen distintos modos de lograrlo. La diferencia entre las formas de calentar el agua estriba en los tipos de colectores y de recipientes almacén que se utilicen para lograrlo.

Los colectores que más se utilizan para transferir calor al agua son los colectores planos. Estos, son placas metálicas que están en contacto directo con el agua, o con un serpentín o con una retícula tubular (que se le considera parte del colector), a través de las cuales circula el agua; los rayos solares calentarán por radiación a la superficie de la placa, esta, calentará por conducción al serpentín o a la retícula tubular, que a su vez por convección natural calentará finalmente al agua. Estos colectores, tienen la ventaja de poder aprovechar no sólo la radiación directa sino la difusa; pero tienen la desventaja de no poder concentrar la radiación recibida, como es el caso de los colectores concentradores, cuya descripción supera los alcances del presente trabajo. Son recomendables para situaciones en que no es necesario elevar la temperatura del agua arriba de los 80 °C, como es el caso de los usos domésticos.

Gracias a que en el caso que nos ocupa sólo es necesario elevar la temperatura moderadamente, se vio conveniente utilizar colectores planos. Además, tomando en cuenta los costos de producción, se optó por experimentar un Calentador Solar Autocontenido en vez de uno de Convección Natural.

### 3. Los Calentadores Solares Autocontenidos

Se apuntó en el capítulo uno, en el inciso 3., que en los inicios del uso de la energía solar para calentamiento de agua a nivel doméstico, los primeros tipos de calentadores que se utilizaron fueron de los que actualmente son llamados Calentadores Solares Autocontenidos. Constaban fundamentalmente de un recipiente cerrado que se acondicionaba de tal forma que a la vez servía como colector y como recipiente de almacenamiento, de ahí su nombre de **autocontenidos**.

No es el único nombre que reciben este tipo de calentadores, ya que también se les ha llamado Calentadores Solares para agua Integrados, Calentadores solares para agua con colector y almacén integrado, Colectores solares pasivos, o como en la literatura técnica en inglés al respecto se les suele llamar, "Integrated Collector Storages"<sup>1</sup> o "Breadboxes"<sup>2</sup>.

El nombre es lo de menos, éste muchas veces depende de las traducciones o del empeño que algunos han puesto para tratar de precisar mediante un nombre las características del calentador. Nosotros nos inclinamos por el adjetivo calificativo: Autocontenidos, en virtud de que en el mismo dispositivo se realiza el calentamiento y el almacenamiento.

Estos calentadores tuvieron un época de mucho auge pero con el desarrollo de dispositivos y arreglos fueron desplazados por los Calentadores de Convección Natural. Recientemente han visto una nueva etapa en su utilización, en virtud de su facilidad de manufactura, su precio, su alta eficiencia y, sobre todo, que se han

---

<sup>1</sup> M. Rommel and A. Wagner, Application of Transparent Insulation Materials in Improved Flat-Plate Collectors and Integrated Collector Storages, *Solar Energy* 49, 371-379, November 1992

<sup>2</sup> B. Maeda and B. Melzer, A comeback for Breadboxes, *Solar Age* v.5 n.10, 56-62, October 1980

descubierto nuevos materiales aislantes que prometen sacarlos del olvido<sup>3</sup>.

En México, este tipo de calentadores tienen un historial bastante humilde. Se sabe que en Muñostla, Tlaxcala están operando algunos calentadores de este tipo, en Guadalajara otros; pero no se han difundido al grado de los de Convección Natural.

En el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO) a través de la Unidad Académica de Tecnología Intermedia (UATI) han venido experimentando con este tipo de calentadores desde hace más de diez años. En esta institución se desarrolló un modelo que aprovecha tambos cilíndricos comerciales de 200 litros para convertirlos en Calentadores Solares Autocontenidos. A dicho modelo se le llamo Calentador Solar Autocontenido tipo Tambo (CSATT). Un modelo de estos se usó en el presente estudio como parámetro comparativo del nuevo modelo que se propone. Vale la pena mencionar que el presente estudio experimental se realizó en la mencionada Unidad Académica del ITESO.

#### **4. El modelo propuesto (tipo caja)**

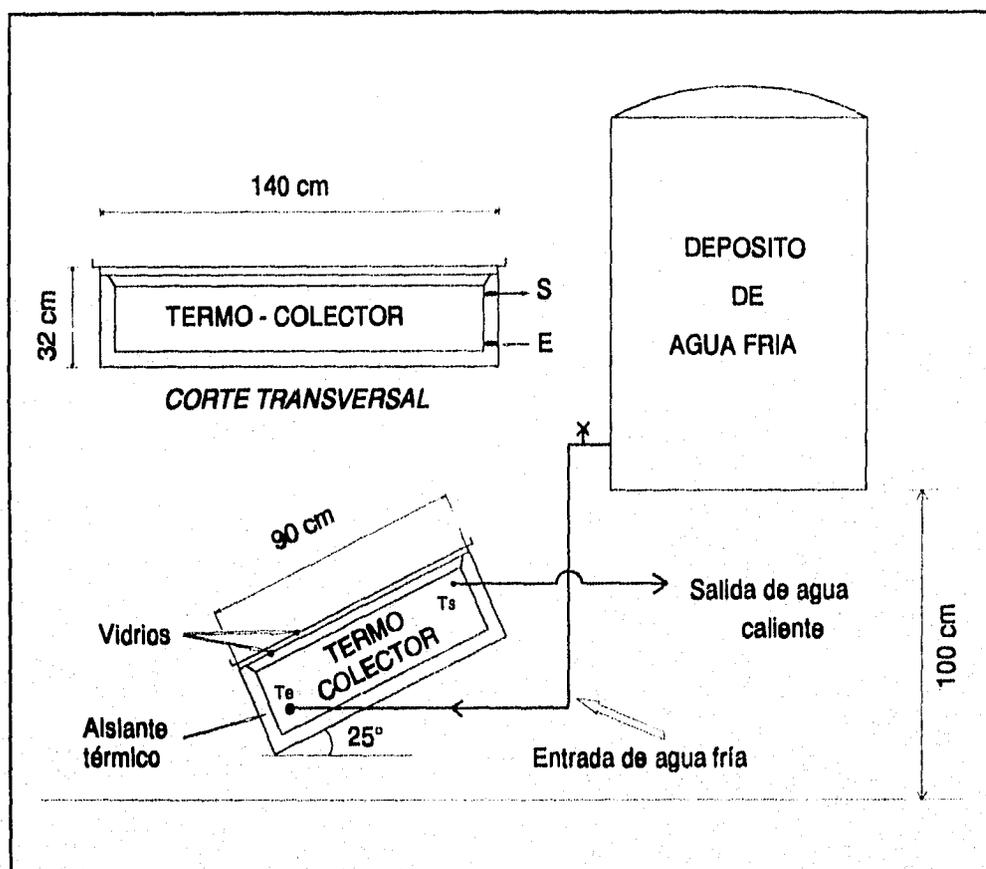
Las formas y diseños de los Calentadores Solares Autocontenidos son muy variadas, pero en todas se respeta la condición de que el dispositivo colector es al mismo tiempo el recipiente de almacenamiento, así, se puede tener Calentadores Autocontenidos hechos con tambos metálicos de 200 litros, o con arreglos de cilindros, parecidos a los de gas para uso doméstico, acondicionados para el efecto, o como en nuestro caso un recipiente en forma de caja recubierto térmicamente en 5 de sus caras pero que la superior le sirve de colector.

Por lo tanto el modelo que se propone se le ha llamado **Calentador Solar Autocontenido tipo Caja (CSATC)**. El recipiente colector-almecénador (termo-

---

<sup>3</sup> M. Rommel and A. Wagner, Op. Cit.

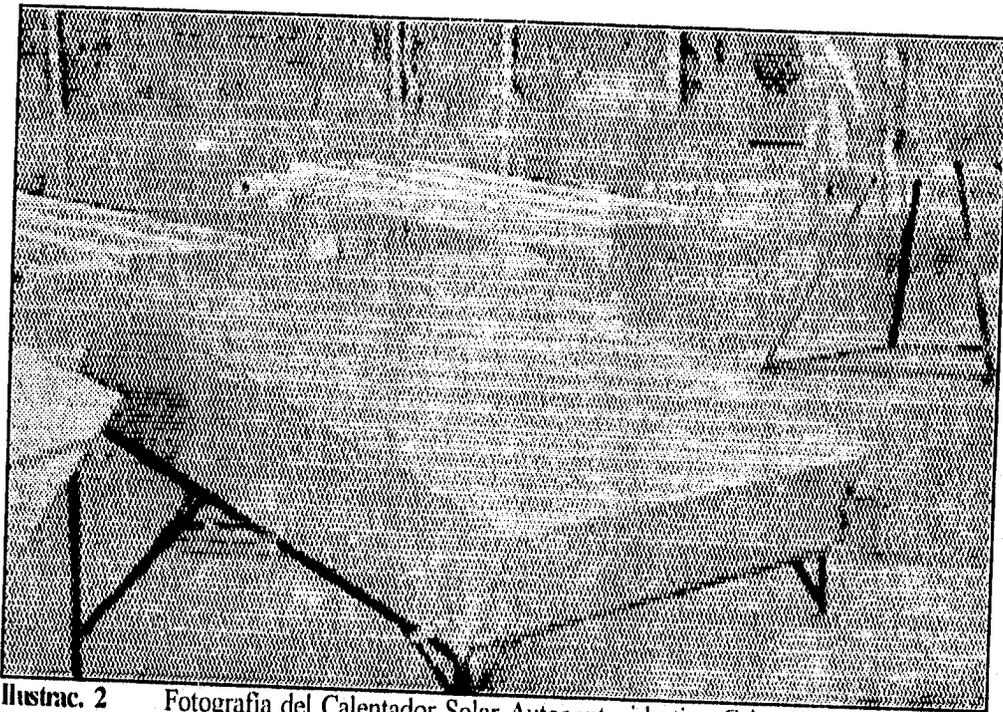
colector) es un hexaedro de 1.30 x 0.80 x 0.20 m., acondicionado con una entrada y una salida de agua, un tubo de desagüe, una válvula en la parte superior para purgar el aire que se le pueda meter y una entrada roscada por donde se le acondiciona un ánodo en forma de barra para evitar la oxidación. Este recipiente en forma de caja se coloca dentro de otra caja (forro), quedando una capa de 5 cm de material aislante térmico entre ambas, como puede observarse en la ilustración 1, finalmente, la superficie colectora está protegida de la interperie mediante capas de vidrio.



**Ilustrac. 1** Arreglo y dimensiones del Calentador Solar Autocontenido Tipo Caja.

El calentador ya acondicionado presenta un área de colección (área de vidrio) de 1.305 m<sup>2</sup> y tiene una capacidad de 208 litros. La construcción de la caja interior se hizo con lámina de fierro negro calibre 18, se reforzó con dos abrazaderas

o grapas de tubular de 1" calibre 18, colocadas a lo ancho del colector-almacenador que presan a la caja y no permiten que se deforme al estar sometida a presiones hidrostáticas moderadas; se soldó con soldadura 6013 para arco voltaico. El forro o caja exterior, se hizo con lámina galvanizada calibre 26 y con lámina acanalada calibre 26. Esta caja exterior además de retener el aislante térmico (que en este caso fue poliuretano) sirve como sostén de los vidrios. En la siguiente ilustración se puede observar físicamente el calentador operando en una de las fases experimentales



**Ilustrac. 2** Fotografía del Calentador Solar Autocontenido tipo Caja (CSATC)

En la presente descripción sólo se apuntaron los datos necesarios para dar una idea de las dimensiones y la calidad del calentador, pero expresamente no se ocupa de presentar memorias del cálculo para su diseño ya que ello fue objeto de

otro trabajo de la misma Unidad Académica de Tecnología Intermedia del ITESO<sup>4</sup>. Por lo tanto el presente trabajo intenta introducir modificaciones al calentador no tanto de diseño, como de operación para hacerlo más eficaz y eficiente.

---

<sup>4</sup> D. Gudifío y R. Alvarado. Calentadores Solares Autocontenidos (Alternativa para economías en crisis), *Memorias de la VII Reunión Nacional de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)* Saltillo, Coah., 113-116, 1983

# **Capítulo 3**

## **Marco Teórico de Referencia**

## MARCO TEORICO DE REFERENCIA

### 1. El Sol como Fuente Inagotable de Energía

Los países, como México que cuentan con un alto grado de insolación, cuentan a su vez con una fuente energética que puede ser aprovechada para fines muy diversos. Siendo la radiación solar la fuente más primaria de energía para el planeta, ofrece atractivos nada despreciables: es continua y renovable, es bastante rentable (una vez operando el dispositivo que ha de aprovecharla) y, por si fuera poco, en esta época en que el desastre ecológico es un fantasma que amenaza a la humanidad, la energía solar, bien aprovechada, prácticamente no produce contaminantes.

A lo largo de toda la parte introductoria notamos que la ganancia helioenergética es posible. Existen equipos que han demostrado su factibilidad tanto a nivel de laboratorio como a nivel comercial. Es cierto que falta caminar todavía para abatir los costos y hacerlos comercialmente competitivos, pero ello debería de ser aliciente para que dedicáramos un esfuerzo mayor en la investigación a todos los niveles para lograrlo.

Vimos como ante la falta de disponibilidad de hidrocarburos en Israel durante la época precedente a la Guerra de los Seis Días, la tecnología solar fue muy útil en aplicaciones que requerían poca energía. Desgraciadamente se dejó la investigación incentivada y se frenó el desarrollo que venían mostrando. Por otro lado, todavía sigue siendo bastante caro el tratar de implementar equipos y complejos generadores de energía que aprovechen la radiación solar a gran escala porque todavía no ofrecen rendimientos atractivos desde el punto de vista económico. Esta realidad ha funcionado en la vía de los hechos como un fantasma que desalienta la inversión para el desarrollo de estos equipos o complejos a gran escala, cuando la lógica con que tendríamos que enfrentarnos a estos obstáculos

debería ser similar a la que en los campesinos funciona: siembran para cosechar no inmediatamente sino a mediano o largo plazo.

El sol irradia el equivalente a 12 cuatrillones de quads por año, energía que se extiende por el espacio en todas direcciones. De todo este inmenso caudal, los científicos calculan que sólo dos billonésimas partes son interceptadas por la tierra. Esta porción, insignificante desde el punto de vista de la proporción que sale del Sol, es inmensamente grande tomando en cuenta nuestras necesidades energéticas, de hecho, aprovechando parte de ella la humanidad resolvería sus demandas energéticas por un tiempo indefinido.<sup>1</sup>

El Sol es una esfera gaseosa de 1,391,000 kilómetros de diámetro (poco más de 100 veces el de la Tierra), cuya distancia media de ésta es de 149,500,000 kilómetros. A esta distancia se le llama "Unidad Astronómica".<sup>2</sup> No es una esfera homogénea, pueden distinguirse tres regiones en el cuerpo: el núcleo, la fotosfera y la cromósfera con la corona solar.

Del núcleo no tenemos suficiente información ya que la radiación emitida desde esta región es totalmente absorbida por las capas exteriores, se supone que la temperatura en esta capa es de varios millones de grados y la presión de mil millones de atmósferas.

La fotosfera es una capa muy delgada de apenas unos 300 kilómetros, pero produce casi la totalidad de los rayos que llegan a nosotros. La temperatura aquí alcanza varios miles de grados pero decrece rápidamente hasta llegar a la cromósfera cuya temperatura no se ha logrado definir con exactitud: la fuente que cita Hugo Covantes<sup>3</sup> se inclina por una temperatura de 4,500 °K, otros la apuntan

---

<sup>1</sup> H. Covantes, La energía solar, Col. Biblioteca Joven, Fondo de Cultura Económica, p 15, México 1989

<sup>2</sup> J.J. Hermosillo, Apuntes para el curso de Energía Solar, ITESO, manuscrito

<sup>3</sup> H. Covantes, *Op. Cit.*

como 5,762 °K (calculados según el modelo radiativo del cuerpo negro), pero hay quienes dan como resultado una temperatura de al rededor de los 6,300 °K. *"Es claro que nadie ha colocado un termómetro en la superficie del Sol. Su temperatura se mide por métodos indirectos, basados en diversos modelos. De ahí que no coincidan todas las estimaciones de su temperatura".*<sup>4</sup>

La cromósfera y la corona solar son regiones de poca densidad. Dicha corona solamente es observable durante los eclipses totales de Sol.

La edad del Sol se calcula en 5,000 millones de años y se estima que en todo ese lapso ha consumido solamente el 14% de sus reservas de energía, por lo cual, aunque sabemos que esta reserva llegará a acabarse; para fines prácticos podemos considerarle como una fuente energética inagotable.

La energía solar consiste principalmente de rayos infrarrojos, que son visibles, y de rayos ultravioletas, que no lo son. De la cantidad total de energía que es interceptada por la Tierra, parte es reflejada hacia el espacio, parte es absorbida por las nubes o por la atmósfera, de tal modo que, tomando en cuenta la recirculación de la energía solar en la atmósfera, nos queda un flujo neto que llega a la superficie de la Tierra del 47% del infljo interceptado.

Parte de la radiación que es interceptada por la Tierra es absorbida por el ozono, dicha parte corresponde a la radiación ultravioleta de longitud de onda menor a los 0.35 micrometros; por lo tanto la existencia de este gas en la atmósfera impide la llegada de dichos rayos a la superficie terrestre, los cuales en caso contrario tendrían una acción destructora sobre los seres vivos.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> J.J. Hermosillo, Op. Cit.

<sup>5</sup> J. A. Manrique, Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Harper & Row Latinoamericana (HARLA), p 6, México 1984

Se ha discutido sobre la variabilidad o invariabilidad del flujo de la energía solar. Sabemos de la existencia de un fenómeno llamado "fulguración", durante el cual el sol emite de mil a un millón de veces más radio ondas que cuando está calmado. Este fenómeno llega a durar pocos minutos y ocupa un área relativamente pequeña de la superficie solar. A pesar de tal magnitud, la cantidad total de energía que llega a la órbita terrestre proveniente de una fulguración es de sólo aproximadamente 0.001 % de la energía total que se recibe del Sol. Por lo tanto para los fines de su aplicación en el campo de la ingeniería, la emisión de la energía en el sol puede considerarse constante. Aún más, la disponibilidad energética del sol en la superficie terrestre está mucho más ligada a las variaciones meteorológicas que a las solares.

Lo anterior explica la causa que ha dado lugar a la definición de la llamada Constante Solar  $G_{SC}$ , que es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de la propagación de los rayos solares, ubicada a la distancia media de la tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

El valor comúnmente aceptado para  $G_{SC}$  por la NASA y la ASTM es:

$$G_{SC} = 1353\text{W/m}^2 = 1.940\text{cal/cm}^2\text{min} = 428\text{Btu/ft}^2\text{hr} = 4871\text{MJ/m}^2\text{hr}$$

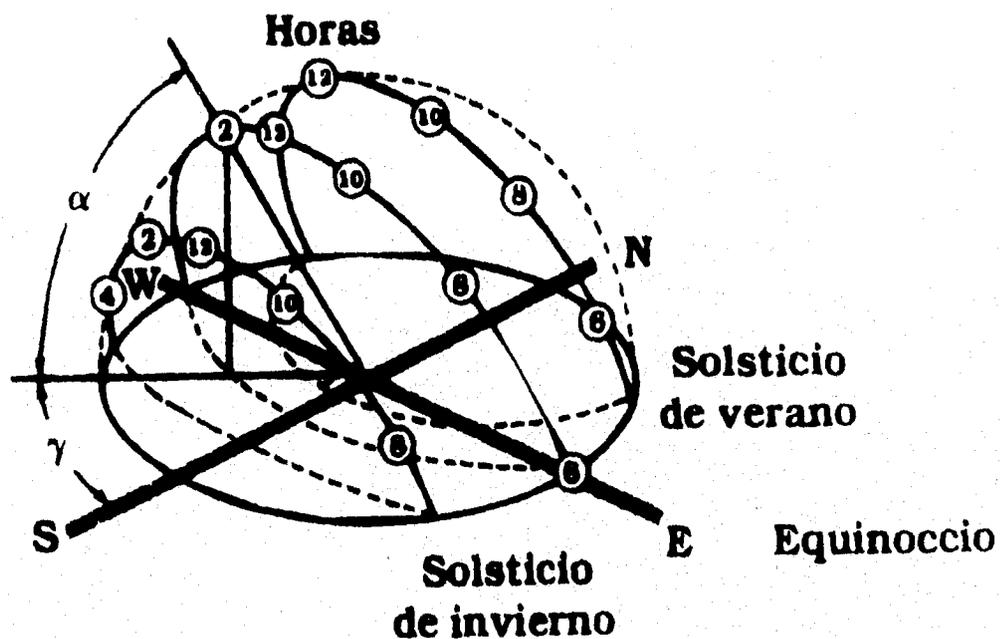
## **2. Posición del Sol y Hora Solar**

### **2.1 Posición del Sol**

Sólo basta ser un poco observadores para darse cuenta que el sol no sale siempre del mismo punto en el oriente ni se oculta por el mismo del poniente a lo largo del año, también que las horas de sol a lo largo del mismo no son constantes,

que hay días en que amanece más temprano o más tarde y otros que anochece mas tarde o mas temprano, a su vez, que hay días en que la sombra proyectada a medio día es más larga o mas corta, o que al medio día el sol se encuentra desplazado más hacia el sur o a veces tendiendo hacia estar directamente sobre nuestra cabeza.

Si se es un poco más observador se notará que diariamente el Sol no describe una trayectoria que pueda inscribirse en un plano perpendicular al plano aparentemente horizontal de la Tierra sino que se inscribe en otro plano cuyo ángulo respecto del plano aparentemente horizontal de la Tierra está un poco más cargado hacia el sur. Ver en la ilustración 1 el ángulo  $\alpha$ .



**Ilustr. 1** Desplazamiento anual del sol

Si tomamos como referencia a un observador situado en cualquier punto de la superficie terrestre, encontraremos que para él, el sol describe una trayectoria circular a través del firmamento, alcanzando su punto más alto al rededor del medio día civil; que esta trayectoria circular irá alcanzando puntos cada vez más

altos en el firmamento a medida que se va uno acercando a al solsticio de verano y que va decreciendo su altura a medio día a medida que se va alcanzando el solsticio de invierno.

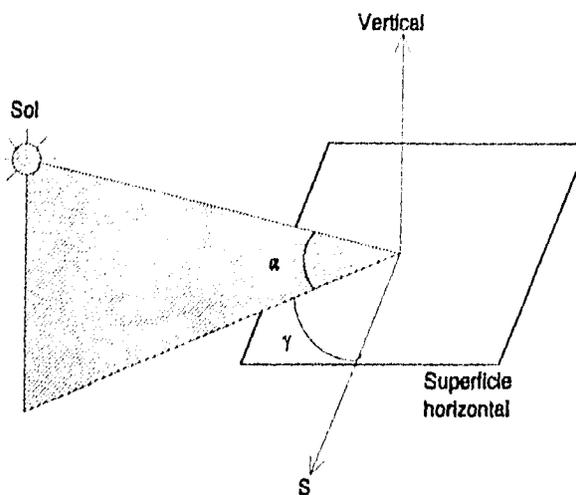
¿De que depende este cambio de trayectorias del Sol con respecto al ojo de un observador situado en la Tierra?. Es obvio que depende de la latitud y longitud geográficas en que se encuentre el observador, pero también depende de que ni la tierra está estática ni el sol lo está, es decir, existe un movimiento relativo entre el astro y su planeta, además de que el eje de rotación terrestre no es normal a la trayectoria que describe la translación de ésta con respecto al Sol.

Estas variables no nos indican que las trayectorias del Sol sean algo caótico o mágico que sólo se podrá verificar hasta llegar a observar el sol y detectar su posición.

Pese a estas variables que influyen en la posición en que lo veremos en el firmamento a una hora determinada de un día dado, podemos saber de antemano cual será su posición. Esto se debe a que ambas trayectorias guardan una relación de dependencia que, actualmente la podemos expresar mediante ecuaciones.

Dichas ecuaciones toman como punto de referencia la posición geográfica del observador, y en función de esto nos arrojan los datos de la posición que tendrá el Sol en una fecha determinada a una hora dada.

Tomando como fijo el punto de vista de observador, el sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento quedará descrita



**Ilustr. 2**

Posición del sol desde el punto de vista de un observador en la tierra

mediante dos variables angulares: la **Altura Solar**  $\alpha$  y el **Acimut Solar**  $\gamma$ , como se puede observar en la ilustración 2. La Altura Solar define el ángulo que la visual al Sol forma con el horizonte, en tanto que el Acimut Solar define la desviación que tienen los rayos del Sol con respecto al sur verdadero<sup>6</sup>

Para el cálculo preciso de estas dos variables tenemos que tomar en cuenta los siguientes tres parámetros: la **Latitud** del lugar de observación  $\phi$ , la **Declinación** del sol  $\delta$ , y el **Angulo Horario** para una hora solar dada  $\omega$ .

La latitud queda mediada por el ángulo que definen el plano del ecuador con el punto de observación. Se mide como positiva hacia el norte y como negativa hacia el sur del ecuador.

<sup>6</sup> Vale la pena mencionar que normalmente el Acimut en cualquier otro campo de la ciencia se da respecto al norte verdadero, pero en este caso nosotros lo damos con respecto al sur.

J. A. Manrique, *Op. Cit*, p 12

El Angulo horario es igual a cero a medio día solar y adquiere un valor de  $15^\circ$  de longitud por cada hora, siendo positivo por las mañanas y negativo por las tardes, así:  $\omega=15^\circ$  a las 11 a.m. solares, o será  $\omega=-30^\circ$  a las 2 p.m. solares.

La declinación define la posición angular del Sol a medio día solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador. En otras palabras la declinación es un índice del alejamiento que experimenta el Sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Este parámetro podrá calcularse con la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{248+n}{365} \right)$$

donde:

$n \rightarrow$  número de día del año

Entonces las ecuaciones que nos ayudarán a conocer la posición del Sol en un día cualquiera a una hora solar dada serán:

$$\operatorname{sen} \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta$$

$$\operatorname{sen} \gamma = \cos \delta \frac{\operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha}$$

donde:

$\phi \rightarrow$  latitud local

$\delta \rightarrow$  declinación

$\omega \rightarrow$  ángulo horario (omega)

$\gamma \rightarrow$  acimut solar (gama minúscula)

$\alpha \rightarrow$  altura solar

También podemos saber las horas de asoleamiento a través de la siguiente ecuación:

$$T_d = 2/15 \cos^{-1} (-\tan\phi \tan\delta) \quad (\text{horas})$$

donde:

$T_d \rightarrow$  horas de asoleamiento

Con las ecuaciones anteriores podemos encontrar la posición del Sol para un día cualquiera y una hora solar determinada, además de que podemos saber cuantas horas de asoleamiento habrá ese día.

## 2.2 *Hora Solar*

Hasta aquí, hemos venido mencionando varias veces el término "Hora Solar" pero no lo habíamos definido. La primera impresión que dicho término nos sugiere, ya nos apunta una posible diferencia entre lo que llamamos nuestra hora y la llamada "hora solar". Podemos detenernos un poco más en este concepto, ¿qué significa?

Es sencillo, muchas veces cuando hemos querido observar al sol en el lugar más alto del firmamento para un día dado, salimos a verlo justo en el momento en que nuestro reloj marca las 12 del día, pero nos llevamos una sorpresa porque no se encuentra en su punto más alto. Este hecho contradictorio nos plantea una disyuntiva: o nuestro reloj no está ajustado a la hora, o existe algo diferente, que no sabemos, por lo cual el sol cuando es el medio día en nuestro reloj no ha llegado al punto más alto, o, dependiendo de nuestra localización geográfica ya lo rebazó.

La hipótesis más acertada es la segunda, es decir, que cuando salgamos a observar el sol en su punto más alto ayudándonos por nuestro reloj que marca las horas civiles y aquél no se encuentre dónde lo quisiéramos observar sucede, porque la **Hora Solar** es diferente de la **Hora Civil**, esto es, el medio día solar corresponde exactamente al paso del sol por el meridiano de referencia para el medio día y no a la hora que marquen nuestros relojes, aunque casualmente puede haber coincidencia.

Como en la práctica el instituir la hora solar como hora oficial haría que lugares relativamente cercanos tuvieran horas distintas (por ejemplo Cuernavaca y la ciudad de México), se han establecido los husos horarios, cuyo fin es únicamente pragmático. Así, considerando la hora civil, podemos decir que es la misma hora en Mérida, Cuernavaca, México, Querétaro y Guadalajara sin temor a equivocarnos; pero es distinto a decir que en un instante dado es la misma hora solar en Guadalajara que en Mérida, ya que su distancia hace que solarmente haya casi una hora de diferencia entre ambas ciudades.

Como en cada una de estas ciudades la hora solar es diferente, pero la hora civil es la misma, existe una diferencia entre la hora solar y la hora civil.

Esto no es todo en torno a la diferencia de la hora solar con la civil. Es necesario introducir otra corrección dada por el hecho de que el Sol se adelanta y se atrasa respecto de la hora solar media debido a dos efectos astronómicamente bien conocidos: la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación del eje polar de la Tierra respecto de la órbita (fenómenos que cuya explicación supera los límites de este marco teórico, pero cuya corrección aquí apuntamos). Esta corrección viene expresada por una ecuación que conocemos como la Ecuación del Tiempo:

$$E = 9.87\text{sen}2B - 7.53\text{cos}B - 1.5\text{sen}B$$

donde B está expresado por la siguiente ecuación:

$$B = \frac{360 (n - 81)}{364}$$

donde:

n → número de día del año

Introducido este factor de corrección, podemos expresar la ecuación que nos ayude a encontrar para una fecha determinada, a partir de una hora civil dada su hora solar correspondiente:

$$h_{\text{hora solar}} = h_{\text{hora civil}} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$$

donde:

$L_{\text{st}}$  → longitud geográfica del meridiano de referencia

$L_{\text{loc}}$  → longitud geográfica del meridiano local

<b>Hora</b>	<b>Meridiano de referencia</b>	<b>Ejemplos</b>
del Centro	90° W	de Yucatán a Jalisco
de la Montaña	105° W	Nayarit a B.C.S.
del Pacífico	120° W	B.C. N.

**Tabla 1** Meridianos de referencia para la República Mexicana

La tabla anterior nos muestra los meridianos de referencia para la República Mexicana. Sólo falta expresar lo que significa la longitud geográfica del meridiano local. Esta, es lo que conocemos como la Longitud Geográfica. Así tenemos por ejemplo que para la ciudad de Monterrey su  $L_{loc} = 108^\circ$  y para Guadalajara su  $L_{loc} = 103^\circ$ .<sup>7</sup>

### 3. Radiación solar directa sobre una superficie inclinada

La mayoría de los equipos para el aprovechamiento de la energía solar dependen de la radiación directa<sup>8</sup> que es la que va a contribuir en mayor medida a que trabajen eficazmente. Tomando en cuenta que la radiación directa se compone de rayos paralelos que vienen del Sol, el ángulo del colector plano es sumamente importante. Cuando su posición es perpendicular a los rayos, se puede recoger la cantidad máxima de radiación directa.

El ángulo que forma al colector con la horizontal se le conoce como Angulo de Inclinación del Colector. Dicho ángulo tendrá que ser igual a la latitud norte o sur de la localidad en cuestión para que el colector recoja la mayor cantidad de radiación directa durante un mayor lapso a lo largo del año (si es que dentro del diseño se decidiera que trabajara en forma fija). Por ejemplo, si la latitud geográfica fuera de  $40^\circ$  norte, el colector tendría que tener una inclinación de  $40^\circ$  respecto a la horizontal y su cara colectora deberá estar orientada hacia el sur. Caso

---

<sup>7</sup> La mayor parte de los datos científicos de este apartado fueron tomados de:

J.J. Hermosillo, *Op Cit.*

J.A. Manrique, *Op. Cit.*

<sup>8</sup> Esta es la radiación que viene del Sol y que llega directamente al colector sin la interposición de nubosidades. Es decir, es aquella que no experimenta cambios en su dirección desde que ha sido emitida hasta que llega a un punto dado.

R. H. Montgomery, The Solar Decision Book, John Wiley & Sons, Inc., 1986, p 9.3

contrario es cuando el colector estuviera instalado en una latitud sur de 40°, este tendría que tener una inclinación de 40° respecto a la horizontal, pero su cara colectora debería estar orientada hacia el norte.

El ángulo de inclinación, determinado por la latitud geográfica, junto con la orientación hacia el sur o hacia el norte dependiendo de el emisferio en que nos encontremos, garantizará una captación global máxima durante todo el año.

Un factor que puede modificar este ángulo de inclinación para el emisferio norte, haciéndolo un poco mayor, es el hecho de decidir que en invierno el colector trabaje más eficientemente. Dado que en invierno el Sol está más cargado hacia el sur, habrá que elevar un poco más el ángulo de inclinación del colector para garantizar mayor incidencia de radiación directa sobre su superficie captadora.

De acuerdo con lo que vimos en los tres párrafos anteriores, podemos deducir que el ángulo de inclinación "s" se vuelve un factor cada vez de mayor importancia en la medida en que los colectores estén operando en lugares más cercanos a los polos norte o sur.<sup>9</sup>

El cociente de la radiación directa sobre un plano inclinado y la radiación directa sobre un plano horizontal está dado por:<sup>10</sup>

$$R_b = \frac{\text{sen} \delta \text{ sen} (\phi - s) + \text{cos} \delta \text{ cos} (\phi - s) \text{ cos} \omega}{\text{sen} \delta \text{ sen} \phi + \text{cos} \delta \text{ cos} \phi \text{ cos} \omega}$$

---

<sup>9</sup> De las ideas hasta aquí expuestas para este apartado fueron tomadas de:  
R. H. Montgomery, *Op. Cit.*, 9.1 to 10.3

<sup>10</sup> J. A. Manrique, *Op. Cit.*, p 21

#### 4. Medición de la radiación solar

Es evidente que para poder diseñar un equipo que vaya a aprovechar la radiación solar es necesario saber los rangos de radiación que recibe la localidad en cuestión, para de ahí desprender el tamaño del colector que se llegará a recomendar o evitar, en su caso, la recomendación de la utilización de la energía solar como medio para realizar la operación que se pretende.

Todavía más evidente si queremos evaluar el desempeño de un colector propuesto o de todo un equipo relacionado con el aprovechamiento de la energía solar es que necesitamos saber la radiación que está recibiendo el colector.

Los datos más necesarios para estos casos son la Radiación Directa y la Radiación Difusa<sup>11</sup>, cuya suma nos da la Radiación Total<sup>12</sup>. De hecho en la fórmula general se considera también la radiación refleja, pero dado que es la que se refleja del piso hacia los colectores habitualmente es despreciable.

$$H_T = I_b + I_d + I_p$$

donde:

$H_T$  → Radiación total (KJ/m<sup>2</sup>)

$I_b$  → Radiación directa "

$I_d$  → Radiación difusa "

$I_p$  → Radiación refleja "

---

<sup>11</sup> La Radiación Difusa es la que sufre dispersión en la atmósfera. Se compone de rayos dispersos no paralelos, y por lo tanto no tiene una dirección única y preferente.

J. A. Manrique, *Op. Cit.*, p 8

<sup>12</sup> La Radiación Total es la suma de las componentes Directa y Difusa.

*Ibid.*, p 8

Existen diferentes equipos para la medición de la radiación solar. Una medición común aunque no cuantifica la cantidad de radiación sino la duración de la radiación es la que nos dan los heliógrafos.

La radiación total se mide con piranómetros. La radiación difusa con piranómetros adaptados para no recibir la radiación directa.

Todos los instrumentos que sirven para medir la radiación solar funcionan convirtiéndola a otra forma de energía, dando como resultado una medida o lectura proporcional a la intensidad de la radiación. En general convierten la radiación solar a señales eléctricas que son almacenadas en memorias electrónicas. Una vez almacenadas, se puede graficar la radiación con respecto al tiempo y así, hacer una integración numérica de las curvas que han descrito, para conocer el total de la energía incidente en un período de tiempo dado.

Estas memorias electrónicas pueden conectarse a través de alguna "interfase" electrónica que traduzca su protocolo al protocolo de las computadoras compatibles con IBM u otras, de tal forma que los datos obtenidos se puedan procesar y manejar en computadoras personales.

Existe otro tipo de piranómetros conocidos también como piranógrafos mecánicos, se basan en la dilatación diferencial de elementos metálicos expuestos a la radiación solar. Mediante un mecanismo apropiado un trazador registra la radiación solar sobre un papel que se monta en un tambor cilíndrico. El movimiento de este tambor se efectúa mediante un mecanismo de reloj de cuerda.

Vale la pena mencionar que este tipo de piranómetros han dejado ya de utilizarse debido a que los datos que de ellos se puede sacar son siempre aproximados, ya que dependen mucho de la subjetividad del ojo del observador que vaya a leer las gráficas.

En la actualidad se ha generalizado el uso de piranómetros con dispositivos

electrónicos.<sup>13</sup>

La organización meteorológica internacional ha recomendado que cada estación de radiación solar cubra un máximo de 500 km<sup>2</sup>. Esto significa que en México necesitaríamos tener instaladas 4,000 estaciones; pero hasta 1980 sólo tres estaciones habían realizado mediciones en forma regular de acuerdo con las normas piroheliométricas internacionales.<sup>14</sup>

## 5.- Aspectos de Transferencia de Calor

En cualquier sistema de conversión de energía fototérmica se busca captar la energía solar y transformarla en calor útil hacia algún medio de trabajo, por ejemplo, agua, aire u otro fluido.

Es ilógico que pensemos que un dispositivo, aún cuando su diseño sea inmejorable, vaya a aprovechar toda la radiación que le incide. Parte de la energía incidente se pierde hacia los alrededores como calor, otra fracción se aprovecha calentando el medio de trabajo, otra fracción es reflejada por los cristales que le hayan sido adaptados para evitar pérdidas.

Para el caso de un colector plano, existe una **radiación** incidente en la superficie de los vidrios aislantes, ellos permitirán que pase parte de la radiación que les incide pero también reflejarán otra parte o absorberán otra.

La proporción que llegue a la superficie colectora después de haber atravesado los vidrios será convertida fototérmicamente en calor, que gracias al fenómeno de **conducción** calentará a todos los metales que, sin estar expuestos a la radiación solar, estén en contacto con la superficie colectora (este es el caso del

---

<sup>13</sup> La mayor parte de las ideas expresadas en este apartado fueron tomadas de:  
J. A. Manrique, *Op. Cit.*, 26-32

<sup>14</sup> A. Castellanos y M. Escobedo, La energía Solar en México: situación actual y perspectivas Centro de Ecodesarrollo, p 55, México 1980

cuerpo de nuestro tanque de almacenamiento cuya cara superior es la superficie colectora); pero parte del calor será transferido al fluido de trabajo (agua).

Este es el calor útil que nos interesa. Calor que será transferido al agua por **convección natural**.

A continuación veremos por separado cada uno de dichos fenómenos:

### 5.1. *Radiación*

El principal fenómeno de transferencia de calor en virtud del cual se presentan, para nuestro caso, los otros dos fenómenos de transferencia de calor, es la radiación.

La radiación como fenómeno de transferencia de calor, a diferencia de los fenómenos de convección y conducción, no requiere que intervenga un espacio lleno de materia para que las superficies intercambien calor.

Es un fenómeno de transferencia de calor entre dos superficies distantes. Esto es así porque la radiación térmica es radiación electromagnética que se emite en la banda de longitud de onda entre 0.1 y 100 micrometros como resultado únicamente de la temperatura en la superficie radiante.

Se transmite de la misma forma que los rayos x, la luz visible y las ondas de radio. El rasgo distintivo entre estas radiaciones y la radiación térmica es su banda de longitud de onda.

Un *emisor ideal*, que se llama **cuerpo negro**, emite radiación térmica según la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$e_b = \sigma T^4$$

en cuya expresión  $e_b$  es la *potencia emisiva* del cuerpo negro, y es la energía emitida por unidad de área de la superficie por unidad de tiempo;  $\sigma$  es la constante

de Stefan-Boltzmann; y  $T$  es la temperatura en grados absolutos ( $^{\circ}\text{R}$  o  $^{\circ}\text{K}$ ). Los valores para  $\sigma$  según se use el sistema británico o el internacional son:

$$\sigma = 1,713 \times 10^{-12} \text{ Btu/h } \cdot \text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{R}^4$$

$$\sigma = 56.680 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}^4$$

Podemos decir que cualquier superficie que radia lo hace de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$e = \epsilon \cdot e_b$$

donde  $\epsilon$ , la *emisividad*, es una propiedad de la superficie y varía desde 0 para un reflector ideal hasta 1.0 para un cuerpo negro.

El rasgo principal de un cuerpo negro es que a una temperatura,  $T$ , su potencia emisiva es la máxima potencia emisiva de cualquier cuerpo a esa temperatura, es decir, es un emisor ideal. También un cuerpo negro absorbe toda la radiación térmica que incide sobre él, y por esto se le llama también *absorbente perfecto*.<sup>15</sup>

### 5.1.1 Propiedades básicas de la radiación

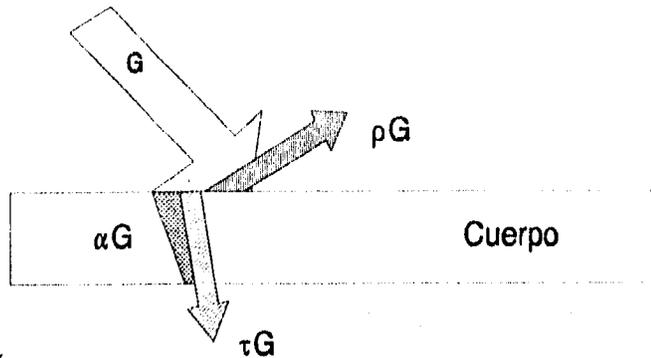
Cuando una energía radiante,  $G$ , choca con una superficie, puede suceder que parte de ella sea reflejada hacia el exterior, parte sea absorbida por la superficie y parte sea transmitida a través de la superficie.

Consideremos entonces la ilustración 3:

---

<sup>15</sup> B.V. Karlekar y R.M. Desmond, Transferencia de Calor, Ed. Interamericana, México 1986, pp 20,21,319-322

La absorptividad  $\alpha$ , es la fracción de la radiación incidente que absorbe el material; la reflectividad  $\rho$ , es la fracción de la radiación incidente que refleja el material; y la transmisividad  $\tau$ , es la fracción que se transmite a través del material.



**Ilustr. 3** Energía radiante que choca sobre una superficie

$G$  es la energía radiante incidente por unidad de tiempo y de área.

Si hacemos un balance de energía tendremos que:

energía que entra = energía que sale + energía que se absorbe.

$$G = (\rho G + \tau G) + \alpha G$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

### 5.1.2 Radiación y longitud de onda

Hasta aquí hemos avanzado sin considerar las contribuciones que tienen las diferentes longitudes de onda de radiación en la potencia emisiva total del cuerpo emisor. En realidad, la potencia emisiva de un cuerpo emisor se compone de la integración de las infinitesimales potencias emisivas monocromáticas de toda su

amplitud de banda. Esto es:

$$e_b = \int_0^{\infty} e_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

el subíndice  $\lambda$  indica que se trata de un dato para una longitud de onda determinada.

Hay ocasiones en que necesitamos saber la cantidad de energía radiante emitida sólo en parte de la banda, entonces, podemos usar la siguiente ecuación:

$$e_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\lambda_2} e_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} e_{b\lambda} d\lambda$$

o bien:

$$e_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = e_{b(0-\lambda_2)} - e_{b(0-\lambda_1)}$$

El valor de  $e_{b(0 \rightarrow \lambda)}$  depende de la longitud de onda  $\lambda$  y la temperatura  $T$  de la superficie radiante. Con la multiplicación de estos datos podemos ingresar a la "Tabla de Función de Radiación para un Cuerpo Negro". Para un valor dado de  $\lambda$  - $T$ . La tabla nos da razón de la energía emitida en el rango  $0 \rightarrow \lambda$  - $T$  comparada con la energía total  $e_b$ , emitida sobre todo el espectro.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Para información sobre la tabla de la Función de Radiación para un Cuerpo Negro véase: J.A. Manrique, *Op. Cit.*, pp 82-85

Pongamos un ejemplo que nos puede ser útil:

Una placa de vidrio tiene una transmisividad o transmitancia de 0.875 para longitudes de onda entre  $0.4 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m}$  y es opaca en cualquier otra longitud de onda. Determinar el porcentaje de la energía solar incidente que se transmite a través del vidrio.

Datos:

$$\tau = 0.875 \text{ para } 0.4 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$$

$$\tau = 0 \text{ para todas las demás longitudes de onda}$$

$$T = 10,000 \text{ }^\circ\text{R} \quad (\text{temperatura efectiva de cuerpo negro de la superficie del Sol}).$$

Análisis:

$$\lambda_1 T = 4,000 \mu\text{m}^\circ\text{R} \text{ y } \lambda_2 T = 30,000 \mu\text{m}^\circ\text{R}$$

$$\text{para } \lambda_1 T, \frac{e_{b(\lambda_1 T)}}{e_b} = 0.1051$$

$$\text{para } \lambda_2 T, \frac{e_{b(\lambda_2 T)}}{e_b} = 0.9765$$

o bien:

$$\frac{e_{b(\lambda_1-\lambda_2)}}{e_b} = 0.9765 - 0.1051 = 0.8714$$

Esto significa que 87.14 % de la energía solar que incide sobre el vidrio está en la banda de longitud de onda de  $0.4$  a  $3 \mu\text{m}$ .

Puesto que la transmisividad es de 0.875 tenemos:

$$(0.875)(0.8714) = 0.7624$$

Esto nos indica que sólo el **76.24** % de la radiación solar incidente se transmite a través del vidrio.

Vale la pena mencionar que estos datos valen sólo para la condición en la que el colector esté perpendicular a los rayos del sol y que el contenido de hierro del vidrio sea bajo.

Para encontrar el porcentaje a lo largo de todo un día de asoleamiento, y con un colector que guarda diferentes ángulos de incidencia con el Sol (dado que la posición del colector respecto de aquel está sujeta a las variaciones de posición del sol respecto de la tierra) se tendrían que hacer cálculos bastante más complicados; pero la condición que determina el ejemplo de arriba es ilustrativa para el caso más favorable, y de ahí podemos deducir que el porcentaje real de la radiación solar incidente que se transmite a través del vidrio tenderá cuando mucho a acercarse al porcentaje de arriba.

Si a esto le sumamos que en nuestro caso no sólo consideraremos un vidrio, sino dos y hasta tres vidrios, el porcentaje disminuirá.

Cada capa de vidrio, cuya transmisividad es de 87.5 % disminuirá a esa medida al porcentaje de la radiación solar incidente que se transmite y que, finalmente llegará hasta el colector. Esto es, si consideramos que nuestro colector trabaja con dos capas de vidrio, en el mejor de los casos podríamos esperar que « $(0.875)(0.7624)=0.6671$ » el 66.71 % de la radiación solar incidente en la primera capa de vidrio llegue a nuestro colector.<sup>17</sup>

## 5.2 *Conducción*

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación directa o entre cuerpos a distintas temperaturas.

---

<sup>17</sup> Todo el respaldo teórico que sustenta este apartado se puede encontrar en:  
B.V. Karlekar y R.M. Desmond, *Op. Cit.*, pp 20-24,319,358-371  
J.A. Manrique, *Op. Cit.*, pp 77-86

Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio a analizar, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se llevará a cabo desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura.

Esto queda expresado por la siguiente función:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

donde  $q''$  denota el flujo de calor por unidad de área y  $k$  es la conductividad térmica del material. Dicha conductividad térmica varía para muchos materiales según la temperatura, pero puede considerarse constante para rangos bastante amplios. A esta ecuación se le conoce como ley de Fourier de la conducción de calor.

Mediante la integración de la ecuación anterior podemos encontrar la intensidad de flujo térmico de un sistema.

$$q'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k}}$$

donde:

$T_1 - T_2 \rightarrow$  es el gradiente de temperatura

$L \rightarrow$  es el espesor de la placa o pared a través de la cual se realizará la transferencia de calor.

Si consideramos que un lado de la pared o placa está aislado la ecuación arriba escrita se modifica:

$$q'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_p}{k_p} + \frac{L_a}{k_a}}$$

donde los subíndices "a" y "p" denotan que los datos a los que se refieren son, o

de la placa, o del material aislante.

Notemos que entre menor sea el coeficiente  $K_f$ , mayor será el denominador y, por ende, menor será el resultado de  $q''$ . Esto nos indica la importancia de los materiales aislantes para la conservación de la energía, ya que la transferencia de calor por unidad de área, en las caras que se encuentren aisladas, será menor.

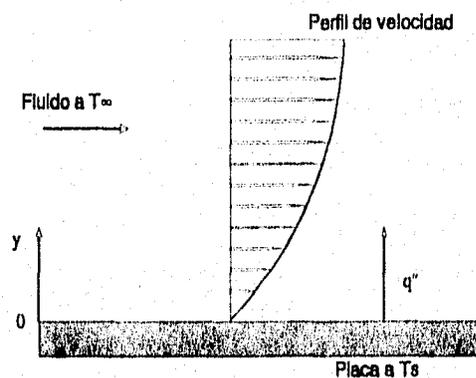
### 5.3 Convección

Este fenómeno de transferencia de calor es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas).

La velocidad del fluido es importante para este proceso, ya que entre mayor sea la velocidad del fluido mayor será el calor disipado.

Consideremos, para efecto de explicación a una placa cuya superficie se mantiene a una temperatura  $T_s$ , la cual disipa calor hacia un fluido cuya temperatura es  $T_\infty$ , como indica la ilustración 4.

La experiencia indica que el sistema disipa más calor cuando se le hace pasar aire proveniente de



Ilustr. 4 Transferencia de calor por convección.

un ventilador, que cuando se encuentra expuesto al aire ambiente. De manera

análoga, la experiencia indica que el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua o en aceite en vez de en aire. De aquí que las propiedades del fluido tengan también un efecto importante sobre la transferencia de calor.

Si analizamos con mayor detenimiento este proceso de transferencia de calor por convección, tenemos que, dado que la velocidad relativa del fluido con respecto a la placa es igual a cero en la interfase sólido-fluido ( $y=0$ ). en ese punto el calor se transfiere únicamente por conducción. Aun cuando podríamos evaluar el calor disipado mediante la ecuación de la Ley de Fourier de la conducción de calor, el gradiente de temperatura en el fluido depende de las características a menudo complejas del flujo de éste. Por consiguiente, es más conveniente calcular el flujo de calor disipado por el sistema, en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie y el fluido:

$$q'' = h ( T_s - T_\infty )$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor (o coeficiente de película). Esta ecuación se le conoce como ley de Newton del enfriamiento.

Los fenómenos convectivos se les suele clasificar como Convección Libre o Natural, o como Convección Forzada. En el caso de la convección forzada el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo (ventilador, bomba u otros agentes que propicien externamente el movimiento), mientras que en el caso de la convección natural, el movimiento del fluido resulta de la diferencia de densidad que presenta el mismo: el fluido de menor densidad (gracias a su mayor temperatura) irá desplazando al fluido de mayor densidad que a su vez será calentado, estableciéndose un flujo al interior del sistema.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> La mayoría de los datos expresados en este apartado fueron tomados de:  
J.A. Manrique, *Op. Cit.*, pp 68-77

Un ejemplo típico de Convección Natural es el que se da al interior de nuestro Calentador Solar Autocontenido tipo Caja.

#### 5.4 Eficiencia

Para hacer una evaluación del comportamiento de algún equipo que aproveche la energía solar es necesario tomar lecturas de las temperaturas que va alcanzando para encontrar los incrementos diarios. Ellos por sí solos ya nos dan un referente a propósito del desempeño del equipo; pero el dato más importante que nos permitirá evaluar ese desempeño es la eficiencia del equipo.

Esta eficiencia en términos sencillos nos indica el porcentaje de la energía que llega, que fue aprovechada.

$$\eta = \frac{\text{energía que se aprovechó}}{\text{energía que llegó}}$$

Para encontrar la eficiencia necesitamos saber la cantidad de calor útil y la cantidad de radiación que incidió en el colector. En otras palabras: de la radiación que llegó, qué porcentaje realmente se llegó a transformar en calor útil.

¿Cómo podemos saber la radiación que llegó y como la cantidad de calor útil?

En el presente capítulo en el apartado correspondiente a la radiación habíamos mencionado que la radiación total es la suma de las radiaciones directa y difusa. Para saber la radiación incidente en un área específica hay que multiplicar el dato de la radiación total por el área correspondiente sobre la que incide, de tal forma que obtengamos la radiación incidente en la superficie de colección.

$$\text{Energía que llega} = H_T A_C$$

donde:

$A_C$  es el área de colección, que normalmente se mide como el área de los vidrios.

Para calcular la energía que realmente se absorbe, necesitamos considerar la masa del fluido a calentarse y el incremento de temperatura que experimentó esa masa, de tal forma que nos queda:

$$\text{Energía que se aprovechó} = \text{Calor útil} = m C_p \Delta T$$

sustituyendo las dos ecuaciones anteriores nos queda:

$$\eta = \frac{m C_p \Delta T}{H_T A_C}$$

donde:

$m$  → masa del fluido de trabajo (Kg)

$C_p$  → calor específico (KJ/kg°K)

$\Delta T$  → incremento de temperatura (°K)

$H_T$  → radiación total (KJ/m<sup>2</sup>)

$A_C$  → área de colección o área de vidrios (m<sup>2</sup>)

Notemos que si tomamos como  $\Delta T$  al incremento experimentado durante las horas de insolación, la eficiencia que encontraremos será la **Eficiencia de Colección**. Pero si tomamos como  $\Delta T$  el incremento experimentado por el calentador de una mañana a la siguiente, tendremos entonces la **Eficiencia Global**.

La eficiencia de colección y la eficiencia global son muy útiles para evaluar el comportamiento de nuestro calentador. La primera nos hablará del comportamiento en las horas de asoleamiento, mientras que la segunda del comportamiento después de 24 horas de trabajo donde se podrá saber qué tanto afectan las pérdidas de calor nocturnas a nuestro calentador.

# **Capítulo 4**

## **Marco Metodológico**

## MARCO METODOLÓGICO

Se había mencionado que el objetivo del presente estudio es la experimentación y evaluación de un Calentador Solar Autocontenido tipo Caja de 200 litros de capacidad, bajo diferentes condiciones de operación. Algunas de dichas condiciones buscaban evitar la pérdida de calor durante la noche y, en esa línea se evaluó el efecto del uso de cubiertas aislantes térmicas sobre el calentador durante las horas en que no hay sol y, también se evaluó el efecto de utilizar dos y tres capas de vidrio. Otras condiciones buscaban mejorar el funcionamiento del calentador durante las horas de captación de energía solar, en esta parte se evaluó el efecto debido a la inclinación al sur del calentador, en lugar de permanecer en forma horizontal, y el efecto de utilizar reflectores planos sobre el mismo.

Se contó con dos Calentadores Solares Autocontenidos tipo Caja de idénticas dimensiones. Uno sirvió como testigo y al otro se le fueron haciendo las modificaciones que se querían probar. Para efectos de identificación llamaremos: **CSATC1** al que sirvió como testigo y **CSATC2** al que se le fueron introduciendo las modificaciones.

Se considera necesario exponer la metodología seguida para orientar el trabajo experimental, ya que de ella depende en gran medida la confiabilidad de los resultados obtenidos.

En este apartado se mencionarán las herramientas con que se contó para hacer la evaluación del desempeño de nuestro calentador. Es decir, cual era el equipo disponible para tomar datos, tanto de temperaturas como de radiación, y cuál era el equipo con que se contaba para realizar el procesamiento de los datos obtenidos.

De la cuenta de dicho equipo se desprenden los alcances máximos que se podrían pretender para la evaluación, y así, no tratar de transitar terrenos cuyo análisis requiere de un equipo más sofisticado del que se tiene.

Después de dar cuenta del equipo que se dispone para el estudio, se pasará a mencionar la metodología de trabajo, propiamente dicha: los pasos que se siguieron en la investigación, y algunos aspectos metodológicos que se tuvieron en consideración cuidar para que la confiabilidad de los datos fuera adecuada, es decir, dentro de estos aspectos metodológicos se apuntarán algunos tópicos que se tuvieron en cuenta para que las lecturas y el procesamiento de la información fueran confiables.

## **1. Equipo disponible para la evaluación**

Este inciso describirá el instrumental con que contaban los calentadores para la toma de lecturas y equipo periférico que se les instaló para que dichas lecturas fueran indicativas de la condición en que se querían experimentar. En la descripción de abajo podrá quedar más claro este punto.

A su vez, se mencionará el equipo instalado en la Unidad Académica de Tecnología Intermedia para la medición de la radiación solar.

Finalmente se dará referencia del herramental instalado que nos permitió procesar los datos.

### **1.1 *Equipo con que cuentan los calentadores***

Todos los calentadores (CSATC1, CSATC2, CSATT y CSCN) contaron con termómetros adecuados para medir las temperaturas que iban presentando. Un termómetro en el tubo de entrada y uno en el de salida. El CSCN contó además con varios termómetros en el tanque de almacenamiento que permitían ver las temperaturas de los diferentes estratos en dicho tanque.

Cada calentador también contaba con una bomba de agua que le permitía

mezclar el agua del tanque de almacenamiento, con el fin de poder determinar la temperatura que iba logrando toda la mezcla. Esta bomba se ponía a andar solamente en las mañanas y en las tardes cuando se tomaban las lecturas de trabajo, inicial y final. La causa que justifica el haber puesto dichas bombas de agua quedará expuesta con mayor profundidad en el apartado 2.2. 1. del presente capítulo.

## **1.2 *Equipo para la medición de la radiación solar***

La Unidad Académica de Tecnología Intermedia lleva más de diez años investigando diferentes equipos para el aprovechamiento de la energía solar. Es por ello que, desde un principio, necesitaba tener un equipo que le permitiera saber la radiación diaria.

Hace algunos años contaba con un piranógrafo mecánico, pero las lecturas que de él se desprendían eran aproximadas a la radiación real, dado que la precisión de estos equipos no es muy alta.

Desde hace varios años se atendió a la necesidad de contar con datos mucho más confiables y se desarrolló en la mencionada Unidad un piranómetro electrónico que les permitió desde entonces contar con datos más confiables de la radiación solar.

Las lecturas que va haciendo se almacenan en una memoria electrónica capaz de retener datos para quince días, es decir, si el día de hoy se conecta la memoria, en quince días se tendrá que poner una memoria nueva y la que está llena se vierte a través de una interfase especialmente diseñada a una computadora personal con programas adecuados que permiten manejar los datos obtenidos.

### *1.3 Equipo y herramientas para procesar datos*

El programa para el manejo de los datos de la radiación solar, que también fue desarrollado en la UATI, se llama DATASOL y permite ver para una fecha cualquiera, y una ubicación geográfica determinada: la radiación total, la radiación directa y la difusa (siempre y cuando en tal ubicación se encuentre un piranómetro que descargue sus lecturas en una memoria electrónica cuyo protocolo sea idéntico al que utiliza el programa). Es capaz de hacer integración numérica de los datos instantáneos, para saber la radiación incidente durante un período determinado. Permite simular la radiación en una atmósfera clara y la radiación extraterrestre. También nos aporta los datos de la radiación incidente (total, directa y difusa) para condiciones donde existe algún ángulo de inclinación del colector.

Los datos que maneja el programa vienen dados en función de la hora solar propia del día que se está analizando.

Los datos, tanto de la radiación obtenidos en el programa DATASOL, como las lecturas de las temperaturas se fueron vaciando en una hoja de cálculo que nos permitió correlacionarlos, calcular los incrementos diurnos y los decrementos de temperatura nocturnos, así como las eficiencias que fueron presentando.

El paquete "hoja de cálculo" que se usó para este efecto fue el QUATTRO PRO 4.0. Los datos obtenidos en cada condición de trabajo fueron almacenados en un archivo independiente y manejados al interior del mismo. Pudiendo exportar o importar datos según se fuera viendo necesario.

Una vez procesados los datos en esa hoja de cálculo se pasó a realizar las gráficas que se consideró oportunas para visualizar las diferentes variables en las distintas condiciones de trabajo. El programa que se utilizó para realizar dichas gráficas fue el HARVARD GRAPHICS 3.2, cuyos archivos son compatibles con el procesador de palabras que se utilizó para la redacción del presente trabajo.

## 2. Metodología de la evaluación

Se decidió que durante todas las fases de la experimentación, se probaran los calentadores a experimentar tantos días, cuantos fueran necesarios para que lograran su estabilización, es decir, que verificáramos que los incrementos de temperatura logrados durante el día fueran más o menos similares a los decrementos experimentados en la noche.

### 2.1 La metodología general

Se experimentó el calentador en diferentes condiciones de operación. Se contaba con uno que sirviera de testigo y otro que se le hicieran los cambios para poder comparar los resultados con los que diera el calentador testigo.

#### a) Primera Fase:

Objetivo: Comprobación de identidad en el desempeño de los calentadores tipo caja.

En primer lugar se trató de ver si los dos calentadores tipo caja se comportarían similarmente bajo condiciones idénticas de operación. Aquí se decidió experimentarlos con un ángulo de inclinación de  $25^\circ$  hacia el sur<sup>1</sup> con un ángulo acimutal igual a  $0^\circ$ . Ambos calentadores contaban con dos vidrios sobre la cara de colección. Junto a esto, durante el mismo lapso se experimentaron los calentadores tipo Tambo y el de Convección Natural con el fin de obtener datos que nos permitieran comparar el desempeño de aquellos calentadores respecto del CSATC.

Tanto el CSATT como el CSCN tenían una inclinación de  $25^\circ$  hacia el sur

---

<sup>1</sup>  $21^\circ$  debidos a la latitud geográfica de Guadalajara y  $4^\circ$  debidos a la consigna de que se desea que en Invierno capten todavía más radiación.

con un ángulo acimutal igual a  $0^\circ$ .

*b) Segunda Fase:*

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la inclinación hacia el sur.

La segunda fase experimental nos ayudó a evaluar el efecto debido a la inclinación hacia el sur, así, se decidió que el CSATC1 permaneciera en la condición precedente y el CSATC2 se experimentó con un ángulo de inclinación igual a  $0^\circ$ , es decir horizontalmente.

*c) Tercera Fase:*

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de una cubierta aislante durante la noche.

La tercera fase experimental nos permitió observar el efecto debido a la colocación de una cubierta aislante durante las horas en que no hay radiación solar. Se decidió: colocar una cubierta de poliestireno de dos pulgadas de espesor sobre los cristales del CSATC2 durante las horas en que no hay radiación para poder comparar los decrementos de temperatura. Una vez evaluado el efecto de inclinación hacia el sur se decidió devolverlo a la posición de  $25^\circ$  hacia el sur con un ángulo acimutal igual a  $0^\circ$ . El CSATC1 se experimentó en la condición precedente, es decir, inclinado  $25^\circ$  hacia el sur y con un ángulo acimutal igual a  $0^\circ$ .

Para lograr que los datos a comparar fueran equiparables, se tendría que lograr que las temperaturas máximas en los dos calentadores a la hora de colocar la cubierta aislante sobre el CSATC2 fueran idénticas. Para ello, se decidió entonces tirar en las mañanas un poco de agua caliente del CSATC2 y agregarle tanta agua fría como fuera necesaria para lograr que comenzara la jornada a la misma temperatura que el CSATC1. Así, si ambos calentadores comenzaban a

trabajar a la misma temperatura y también trabajaban bajo las mismas condiciones de operación durante el día, se aseguraba que llegaran a la misma temperatura al final del día. La diferencia en las condiciones de operación comenzaba en el momento de colocar la cubierta de poliestireno sobre el CSATC2.

*d) Cuarta Fase:*

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de reflectores planos.

La cuarta fase ayudó a evaluar el efecto debido a la colocación de reflectores planos en el CSATC2. Dichos reflectores son superficies reflejantes (láminas galvanizadas forradas de papel aluminio o recubiertas con espejos), colocadas al rededor de la superficie de colección a un ángulo pertinente que logre desviar los rayos solares que les inciden hacia la superficie colectora, de tal forma que la radiación total incidente sea mayor que la que normalmente les llegaría sin ellos. Ambos calentadores estaban operando con un ángulo de inclinación hacia el sur de  $25^\circ$  y un ángulo acimutal igual a  $0^\circ$ .

Los reflectores se instalaron con un mecanismo que garantiza poder moverlos a lo largo del año según las diferentes épocas, para compensar la declinación que va presentando el sol a lo largo del mismo, de tal forma que se pueda asegurar que los rayos desviados sean orientados hacia la superficie colectora.

El ángulo de operación para los reflectores fue determinado experimentalmente, es decir, se fue variando la inclinación de los reflectores hasta lograr que se presentara la mejor condición de reflejamiento de rayos solares hacia la superficie del colector.

Se decidió colocar cuatro reflectores, uno por cada lado de la superficie

colectora. Las dimensiones de los reflectores fueron determinadas en función de las láminas que se consiguieran en el mercado. Es decir, la longitud tendría que ser igual a la longitud del lado en cuestión del colector, pero el ancho tendría que ser igual a la mitad del ancho de una lámina galvanizada comercial para aprovecharla al máximo.

*e) Quinta Fase:*

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de tres capas de vidrio.

La quinta fase nos permitió ver el efecto debido a la colocación de tres capas de vidrio sobre la superficie colectora. Esto con el objeto de disminuir pérdidas nocturnas ya que el colector-almacén estaría más protegido de las inclemencias climáticas por la noche. Ambos calentadores estuvieron operando con 25° de inclinación hacia el sur y un ángulo acimutal igual a 0°.

*f) Sexta Fase:*

Objetivo: Evaluación de todas las mejoras conjuntamente introducidas.

La sexta y última fase se pensó proponerla en función de los resultados obtenidos en las cinco fases anteriores. Esto es, probar conjuntamente en un solo calentador todas aquellas modificaciones cuyos resultados hubieran logrado mejorar el funcionamiento del CSATC.

El CSATC2 presentaría todas las modificaciones favorables, mientras que el CSATC1 seguiría operando bajo la condición precedente: 25° de inclinación hacia el sur y 0° de ángulo acimutal.

Esta fase nos permitirá evaluar todas las mejoras en conjunto respecto de la condición inicial de experimentación en la primera fase.

Cuando llegamos a esta fase, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos

en las anteriores y se decidió experimentar al CSATC2 únicamente con dos vidrios, con cubierta nocturna y con reflectores planos. Las causas de esta decisión se verán en el próximo capítulo.

## 2.2 *Algunos aspectos sobre la metodología*

Enunciados los pasos que se siguieron, toca ahora enunciar algunos tópicos que procuramos cuidar, con el fin de lograr que los datos obtenidos en las lecturas o el procesamiento de la información fueran confiables.

### 2.2.1 *La medición de las temperaturas.*

La medición de las temperaturas se efectuó bajo dos condiciones distintas.

Si queríamos saber la temperatura de la de toda el agua, entonces la mezclábamos auxiliándonos con una bomba instalada junto a cada calentador. Recordemos que en este tipo de calentadores se presenta el fenómeno de transferencia de calor por convección natural, lo cual indica que la temperatura de toda el agua en algún calentador no podía leerse sin antes lograr que ella se homogeneizara. Dicha homogeneización se logró poniendo a funcionar la bomba y esperando a que ambos termómetros marcaran la misma temperatura por más de dos minutos, ya que había ocasiones en que ambos termómetros marcaban la misma temperatura pero se modificaba la lectura en pocos segundos.

De hecho, si nos acercábamos a tomar lecturas podíamos verificar que en el termómetro colocado en el tubo de entrada, siempre se leía una temperatura menor que en el colocado en el tubo de salida.

Las temperaturas de la mezcla eran de interés al comienzo y al final de la jornada, ya que ellas nos permitirían evaluar los incrementos de temperatura que logró el calentador en cuestión.

La otra condición en que se tomaron temperaturas fue cuando se necesitaba saber instantáneamente el desempeño del calentador, para ello no era necesario mezclar el agua, ya que en esas ocasiones se requería saber la temperatura de entrada y la temperatura de salida.

El registro de las temperaturas se hizo en hojas diseñadas para el efecto. El formato de dichas hojas contemplaba la condición a experimentar, la fecha, la hora civil en que se tomaba la lectura, y las lecturas de temperaturas para esa fecha, hora y condición.

El procedimiento que se siguió para tomar las temperaturas fue: por la mañana se tomaba la temperatura inicial ( $T_{wo}$ ), y por la tarde se tomaba la temperatura final ( $T_{wf}$ ).

Si la condición a experimentar requería de agregar agua por la mañana (como en el caso de la tercera fase), entonces se tomaba una temperatura adicional a la que se llamó temperatura del siguiente día ( $T_{sd}$ ). La  $T_{sd}$  se tomaba para tener datos fidedignos sobre el decremento nocturno del CSATC2 antes de tirarle agua caliente y agregarle fría. En todas las demás fases no hubo necesidad de tomar la  $T_{sd}$ .

En ese caso se mezclaba el agua, se tomaba la  $T_{sd}$ , se tiraba una parte del agua caliente, se agregaba el agua fría, se volvía a mezclar para ver si ya había bajado la temperatura hasta igualar a la del CSATC1 y si ya lo había hecho, entonces se tomaba la  $T_{wo}$ . Si no se había alcanzado igualar las temperaturas iniciales de ambos calentadores se repetía la operación de tirar agua caliente, agregar fría y mezclar, hasta que se igualaran las temperaturas de ambos calentadores.

### 2.2.2 *La medición de la radiación solar*

La medición de la radiación solar se hacía automáticamente por el piranómetro. Lo único que se tuvo que hacer fue extraer la información de la computadora para procesarla en la hoja de cálculo.

Se tuvo que tomar en cuenta que había que pedir la información a la computadora introduciendo la variable de el ángulo acimutal y el ángulo de inclinación hacia el sur, porque de otra forma nos hubiera aportado información de la radiación verificada en un colector que operaba horizontalmente.

Otra variable importante que había que considerar era que los datos había que pedirlos en función de la hora solar en cuestión. Por lo tanto se tuvo que calcular la hora solar correspondiente para cada hora civil en que se tomaron lecturas.

### *2.2.3 La limpieza de los vidrios*

Un factor que había que considerar para lograr resultados óptimos y confiables era la limpieza de los vidrios, ya que de no estar limpios se estaría logrando simular un nublado que afectara únicamente a nuestros calentadores. Por esto, cada día de experimentación se les quitaba cualquier residuo de polvo o suciedad acumulado durante las veinticuatro horas anteriores.

La falta de limpieza en los vidrios afecta notablemente a la eficiencia de captación de los mismos. Entre más limpios estén, mejor será la captación de la energía solar; caso contrario, entre más sucios estén, menor será la radiación incidente en el colector.

#### *2.2.4 El llenado de los calentadores y la adición de agua*

Para comenzar cualquier fase de experimentación, se vaciaban los tanques de almacenamiento y eran nuevamente llenados con agua a la temperatura que saliera del grifo. Así se lograba comenzar la fase experimental bajo condiciones físicas del agua similares y con ello se garantizaba poder comparar el desempeño de ambos calentadores autocontenidos.

# **Capítulo 5**

## **Análisis de Resultados**

## ANALISIS DE RESULTADOS

La experimentación se realizó conforme a la metodología vista en el capítulo previo. Se comenzó a experimentar el 17 de marzo de 1993 y se terminó el 11 de junio del mismo año.

Se sistematizaron los datos y aquí se presentan los resultados de dicha sistematización.

### 1. Comportamiento General de un CSATC

En todas las fases de experimentación se pudieron observar los siguientes comportamientos:

Al comenzar la jornada, gracias a la homogeneización por la mezcla (Cfr. capítulo anterior), la temperatura de entrada como la de salida eran iguales para el día dado. Esto es, al comienzo  $T_e = T_s$  para un día cualquiera en un calentador dado. Al ir transcurriendo las horas se verificaba un incremento más o menos notable en la  $T_s$ , mientras que la  $T_e$  experimentaba incrementos más discretos. Este fenómeno se debe a la Convección Natural que se da al interior de los CSATC: el agua de menor densidad sube y la de mayor densidad queda ocupando los estratos bajos del calentador. Pero como también la parte baja del calentador está en contacto con la superficie colectora, se dan incrementos de temperatura, con lo cual se crea el fenómeno de flujo convectivo al interior del calentador.

Este comportamiento puede observarse en la Ilustración 1.

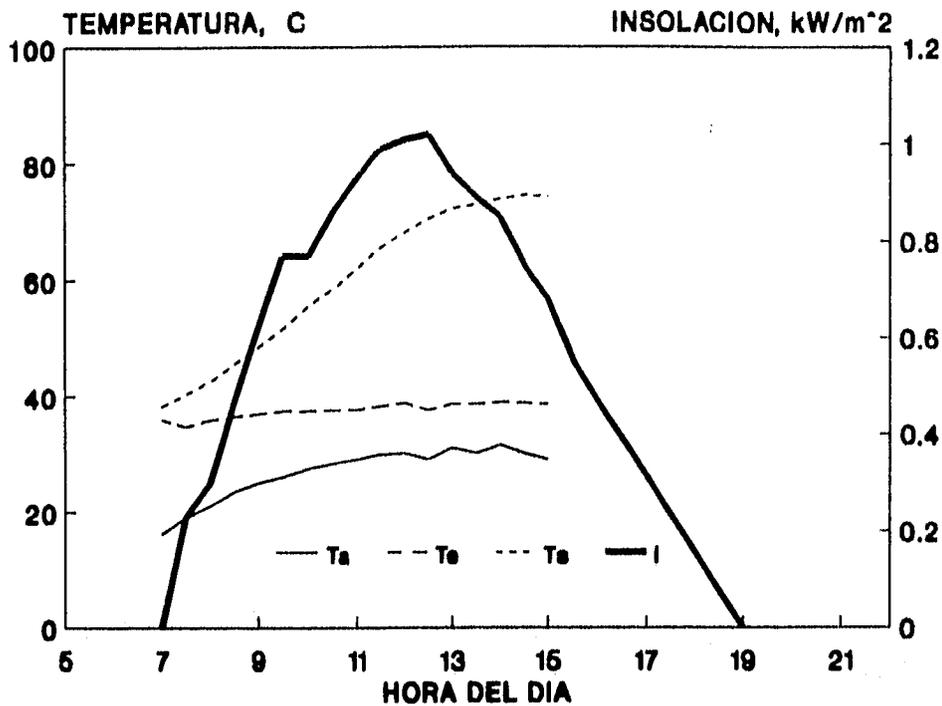


Figura 1 Comportamiento general de un CSATC para un día cualquiera.

La convección natural en estos calentadores, es un fenómeno que permite aprovechar, para el uso doméstico, al agua que ha alcanzado mayores temperaturas, pudiendo disponer en ocasiones de agua a 55 °C o más.

Se pudo verificar que los incrementos de temperatura a la salida eran mayores en las horas en que la insolación era más alta. Y aproximadamente a las 16:30 (hora solar) se dejaban de observar incrementos notables, pasando poco a poco a observarse decrementos de temperatura conforme llegaba y avanzaba la noche. Este comportamiento se puede observar en la ilustración 1.

Al día siguiente la temperatura promedio del agua era mayor que la que se observó a la misma hora en el día precedente, recomenzando el ciclo de incrementos de temperatura, cuyos valores eran menores a los logrados el día anterior.

Al pasar los días se notó que el calentador llegaba a un punto de estabilización, esto es, que los incrementos logrados durante el día eran similares a los decrementos experimentados en la noche, de tal forma que si graficáramos los incrementos globales diarios (tomados cada 24 horas) con respecto al número de día, se podría observar una gráfica de valores discretos cuyas ordenadas describían una curva más o menos asintótica al eje de las abscisas. Este comportamiento se puede observar en la ilustración 2.

También se puede observar en esta ilustración que mientras más alta es la temperatura final ( $T_{wf}$ ), menores serán a su vez los incrementos globales para el calentador.

En cuanto a las eficiencias que reporta un CSATC, en cualquiera de los casos, disminuyen conforme van transcurriendo los días. En el primer día presentan eficiencias de colección bastante altas, pero poco a poco va disminuyendo dicha eficiencia de colección hasta estabilizarse en valores que giran al rededor del 35 a 45%, dependiendo de la condición en que se les experimente. Por otro lado, las eficiencias globales siempre son menores que las eficiencias de colección debido a las pérdidas nocturnas de calor.

Al igual que la eficiencia de colección, la eficiencia global va bajando conforme pasan los días hasta llegar a observarse eficiencias al rededor de 0% cuando el calentador se estabiliza: esto nos indica que lo que gana en el día lo pierde en la noche.

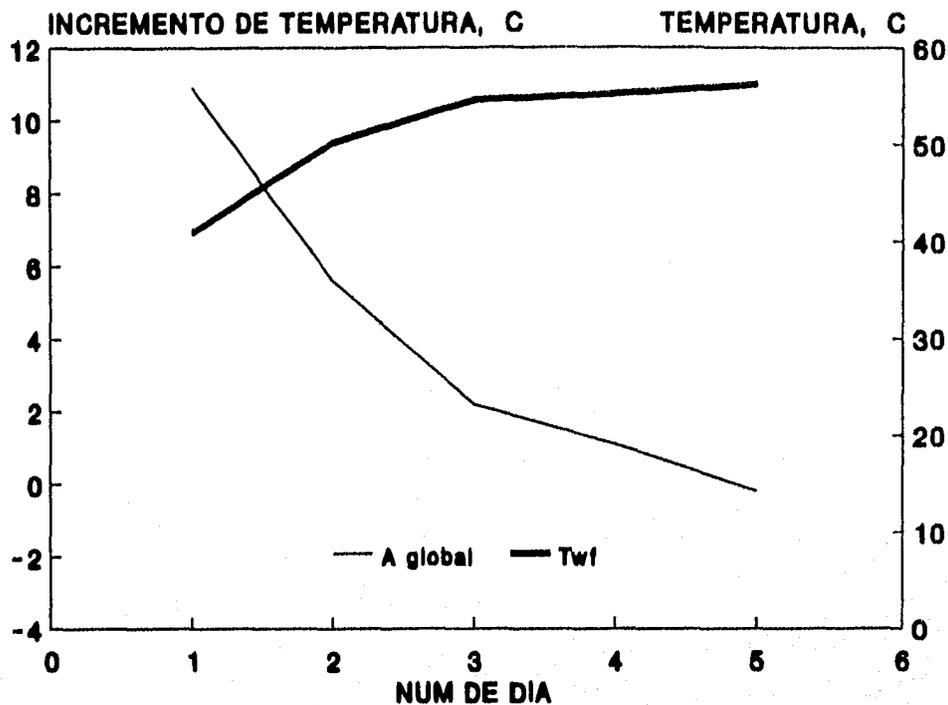


Figura 2 Incrementos globales típicos y Twf respecto al número de día para un CSATC.

## 2. Primera fase:

Objetivo: Comprobación de identidad en el desempeño de los calentadores tipo caja (CSATC).

Experimentando ambos CSATC en iguales condiciones, se pudo observar que tienen un comportamiento ligerísimamente distinto. El comportamiento general fue un poco mejor en el CSATC1, ya que en promedio, diariamente superó al CSATC2 por 0.14 °C, es decir, al restar del incremento de temperatura diurno el decremento nocturno que cada uno de los calentadores experimentó, el CSATC1 en promedio ganó 0.14 °C más.

El incremento global promedio, es decir, el promedio de los distintos incrementos de temperatura cada 24 horas, en el CSATC1 fue de 3.92 °C, mientras

que en el CSATC2 fue de 3.78 °C. Esto hace la diferencia mencionada de 0.14 °C que representa el 3.57% del incremento global promedio del CSATC1.

En la vía de los hechos esta diferencia podría considerarse despreciable; pero se decidió comparar a ambos calentadores en las siguientes fases, introduciendo los cambios en el calentador que tuvo en esta fase un comportamiento menos favorable, para que, si pese a esta pequeña diferencia, al introducirle los cambios, se comportaba mejor, dicha mejoría significaría que habría logrado remontar su desventaja y superar al CSATC1 que se quedó como calentador testigo.

De suceder que el CSATC2 superara al CSATC1 en las siguientes fases, nos indicaría que la modificación introducida resultaría favorable, y por tanto, recomendable.

La causa de esta pequeña diferencia, no se pudo detectar con un alto grado de seguridad, ya que no se disponía de equipos más sofisticados que indicaran la absorptividad, la reflectividad y la transmisividad de los distintos materiales que se usaron en la manufactura de ambos calentadores. Es cierto que son de las mismas dimensiones y se utilizaron los mismos materiales para manufacturarlos.

Puede presumirse que los vidrios que se compraron para proteger las caras de colección, tuvieran diferentes grados de concentración de fierro, lo cual afecta a la absorptividad, reflectividad y transmisividad de los mismos. Un indicador sencillo de la existencia de diferentes concentraciones de fierro u otros metales en los vidrios, es la coloración de los mismos. Y, en este caso, a simple vista se detectó una pequeña diferencia en su coloración (unos venían un poco más verdosos que los demás).

Unos indicadores muy valiosos del comportamiento de los calentadores en esta fase, son las eficiencias que presentaron. En la ilustración 3 podemos observar ya graficadas las eficiencias de colección (EFd) y las eficiencias globales (EFglob) que presentaron ambos calentadores.

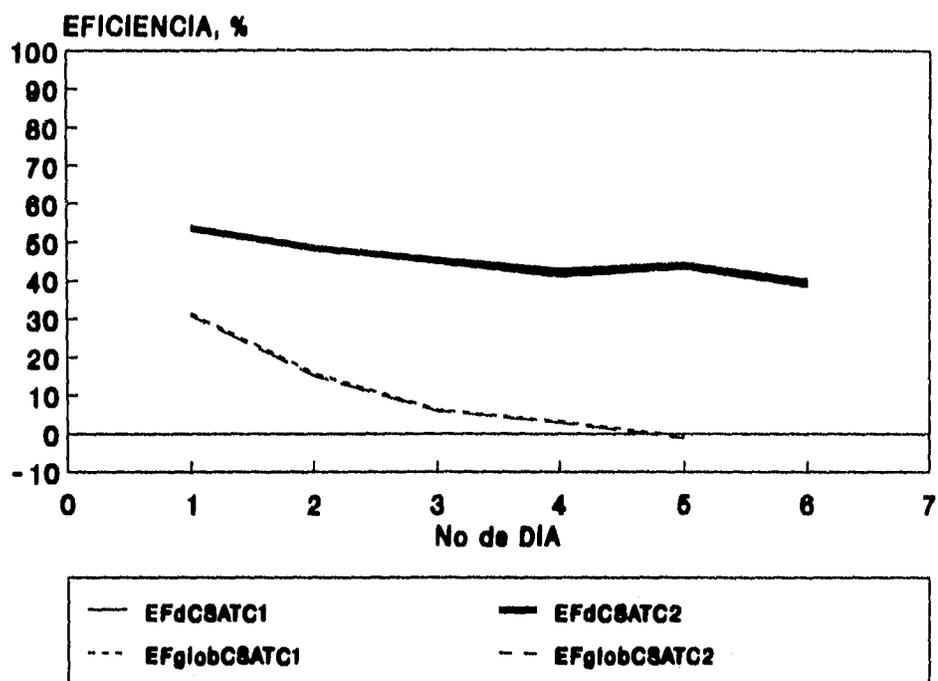


Figura 3 Eficiencias de colección y Eficiencias globales para CSATC1 y CSATC2.

En esta gráfica podemos observar que el comportamiento de ambos calentadores tipo caja fue prácticamente igual, de hecho, casi se encuentran superpuestas las diferentes eficiencias para los calentadores.

Por todo lo anterior se optó por referirse a los CSATC como uno solo *en las siguientes explicaciones de esta fase.*

Otro objetivo que se tenía para esta fase era la comparación del desempeño del CSATC con el del CSATT y el del CSCN, que es lo que a continuación se desarrollará.

Se pudo observar que la eficiencia de colección, en general fue superior en el CSATC a partir del segundo día, y fue disminuyendo lentamente; mientras que el CSCN experimentó una eficiencia de colección muy buena en el primer día (65%), pero a partir del segundo día bajó drásticamente, llegando a un punto de relativa estabilización en el quinto día. Por su parte el CSATT, experimentó

eficiencias de colección bastante uniformes durante toda esta fase, pero menores que las del CSATC.

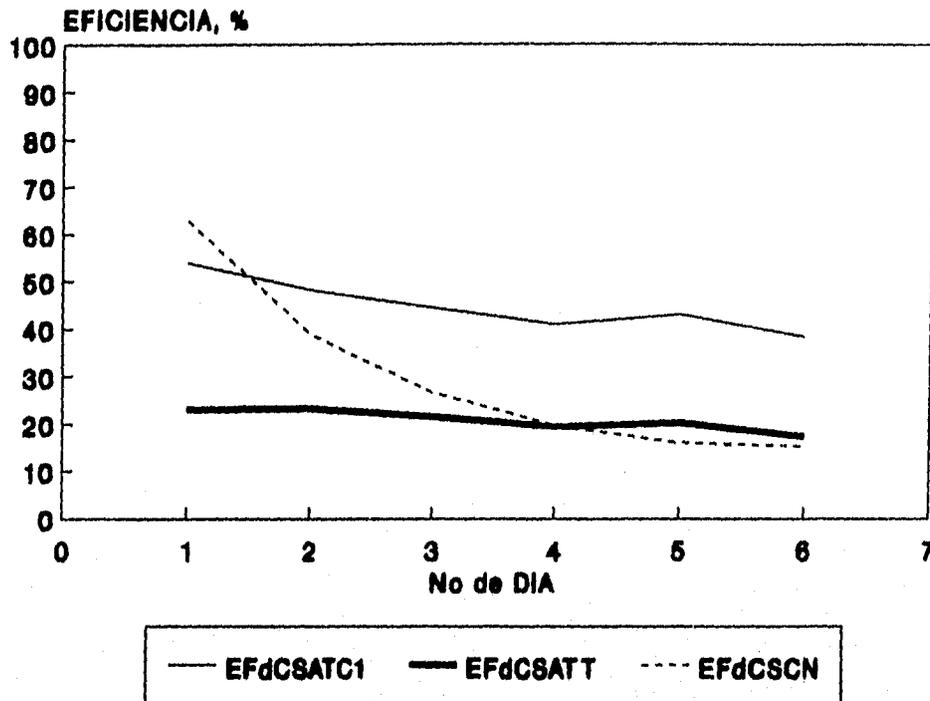


Figura 4 Eficiencia de colección (EFd) para los tres calentadores.

La gráfica de la eficiencia de colección para los tres calentadores, se puede observar en la ilustración 4.

De esta gráfica se desprenden los siguientes resultados:

- 1° El comportamiento del CSATC es superior al del CSATT.
- 2° En general, el CSATC tiene una eficiencia de colección superior a los otros dos calentadores.
- 3° Esta superioridad en la eficiencia de colección evidencia la necesidad de tratar de evitar las pérdidas de calor nocturnas si se desea que su eficiencia global se acerque o iguale a la del CSCN.

En cuanto a las eficiencias globales que experimentaron los tres calentadores, se puede decir que dicha eficiencia, fue en general superior en el CSCN pese a que su eficiencia de colección bajó drásticamente a partir del segundo día (lo cual nos indica que tenía menos pérdidas de calor nocturnas: 4.9 °C en promedio, mientras que el CSATC en promedio experimentó pérdidas de 12.52 °C. El CSATT tuvo una pérdida nocturna promedio menor que la del CSATC; pero dado que su eficiencia de colección fue bastante baja, nunca llegó a igualar al CSATC en cuanto a la eficiencia global).

Se ha insistido en las eficiencias globales porque son buenas indicadoras de la posibilidad de disponer de agua caliente por las mañanas. Entre mayor sea la eficiencia global, mayor será la certeza de que a la mañana siguiente de un día de insolación en el que hubo buena eficiencia se podrá disponer de agua caliente para el uso doméstico.

Esto es verificable en esta fase de experimentación: por ejemplo, el CSCN tuvo una eficiencia global en el primer día de 54%, y al día siguiente tenía agua a una temperatura promedio de 43.7 °C (temperatura bastante agradable para un baño matutino); mientras que el CSATC tuvo en el mismo día una eficiencia global de 31.4%, y a la mañana siguiente el agua se encontraba a 33 °C (temperatura insuficiente para utilizarse en una ducha matutina, ya que la experiencia recomienda una temperatura mínima de 40 °C).

De esta fase se concluyó la necesidad de combinar dos estilos de mejoras en el CSATC:

- a) Tratar de aumentar todavía más la eficiencia del colector, para compensar las pérdidas nocturnas.
- b) Evitar lo más que sea posible las pérdidas de calor nocturnas, ya que, dado que la eficiencia de colección en general es bastante buena, si se disminuyen las pérdidas de calor nocturnas, se puede aumentar la

eficiencia global, y por lo tanto, disponer de agua a mayor temperatura por las mañanas, que es cuando la mayoría de la gente acostumbra ducharse.

Precisamente para atender estas dos consignas, es que se introdujeron los cambios que se experimentaron en las siguientes cinco fases.

### 3. Segunda fase:

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la inclinación hacia el sur.

A partir de esta fase se experimentaron solamente los Calentadores Solares Autocontenidos tipo Caja. Se dejó de experimentar los demás calentadores, ya que sólo era objetivo comparar el funcionamiento de los tipo Caja con los demás en la primera fase, para tener una idea del comportamiento relativo de todos los calentadores en condiciones similares de operación.

Los resultados que se presenten a partir de este inciso corresponderán al efecto que produjo la modificación hecha en el CSATC. Por lo tanto, sólo se experimentaron el CSATC1 y el CSATC2, dejando al primero como testigo del comportamiento en condiciones iniciales, para poder evaluar la modificación introducida en el segundo.

Experimentando al CSATC1 inclinado y al CSATC2 horizontal del 24 de marzo al 2 de abril (ya comenzada la primavera), y se pudieron observar los siguientes resultados:

### 3.1 *Incremento de temperatura durante las horas de colección.*

En promedio, el CSATC1 experimentó incrementos de 15.82 °C durante las horas de colección, mientras que el CSATC2 logró, en promedio, 13.04 °C. Las temperaturas finales promedio de ambos fueron 54.18 °C para el primero y 50.03 °C para el segundo. Se puede notar que en esta fase, uno de los dos calentadores permaneció sin hacerle modificaciones, y con todo y ello logró una temperatura final promedio mayor que en la fase precedente (54.18 °C frente a 51.7 °C de la fase anterior). Esto se debe a que la insolación bajo la que estuvo trabajando fue también mayor en esta segunda fase que en la primera.

Los datos de ambos calentadores en esta fase indican que el CSATC1 logró mayores incrementos de temperatura y además alcanzó temperaturas finales más altas que el CSATC2. Si a ello se le suma que la temperatura promedio en que comenzaron a trabajar por la mañana era mayor en el CSATC1 (0.5 °C en promedio más alta que el calentador horizontal), se podrá concluir que, de acuerdo con los incrementos logrados, y las temperaturas iniciales y finales, el comportamiento del calentador que trabajó inclinado hacia el sur fue mejor que el que trabajó horizontalmente.

El comportamiento enunciado arriba se puede observar en la Ilustración 5. Habrá que tener la precaución de tener en cuenta que se presentan dos escalas para el eje de las ordenadas, y que el punto de intersección que muestran las gráficas no corresponde realmente a un punto en dónde se hubieran intersectado las distintas curvas de valores discretos<sup>1</sup>.

Los decrementos de temperatura nocturnos que se pudieron observar para ambos calentadores fueron mayores para el caso del calentador que trabajó

---

<sup>1</sup> Si se presentan las gráficas como si hubieran sido de valores continuos, sólo es en función de que de esta manera permiten visualizar mejor el desempeño de los calentadores, pero no se presentaron valores continuos como ellas muestran.

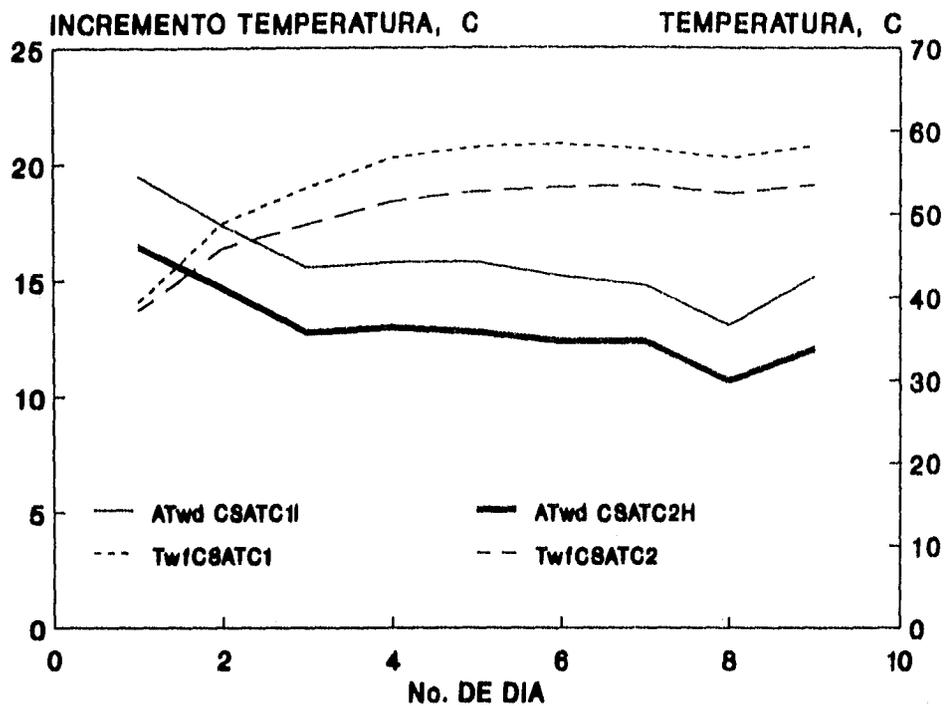


Figura 5 Incrementos de temperatura durante las horas de colección y temperaturas finales respecto de el día en cuestión, para el CSATC1 (incl.) y CSATC2 (horiz.)

inclinado que para el que trabajó horizontalmente. Esto es, el primero perdió 13.14 °C en promedio, mientras que el segundo sólo perdió 10.82 °C en promedio. Esto puede deberse a que el calentador inclinado estuvo más expuesto a la brisa nocturna que el que trabajó horizontalmente; pero no se pudo saberlo con certeza ya que no se disponía del equipo necesario para evaluar el efecto de la brisa nocturna sobre las pérdidas de temperatura durante la noche.

### 3.2 Incrementos de temperatura globales (cada 24 horas).

Un buen indicador del comportamiento del calentador para toda una jornada de experimentación es el incremento global que logró después de 24 horas de trabajo, ya que ello considera el incremento logrado durante las horas de colección

junto con el decremento sufrido durante la noche.

En esta fase, el calentador que trabajó inclinado logró incrementos globales mayores que el que trabajó horizontalmente. Así se pudo observar que el primer día el inclinado tuvo 11.6 °C de incremento global, mientras que el horizontal sólo 9.3 °C; el segundo día 6 °C contra 4.7 °C del otro; 3.4 °C el tercer día en tanto que el segundo solamente 2.5 °C; y así se vieron incrementos globales mayores en el inclinado que en el horizontal.

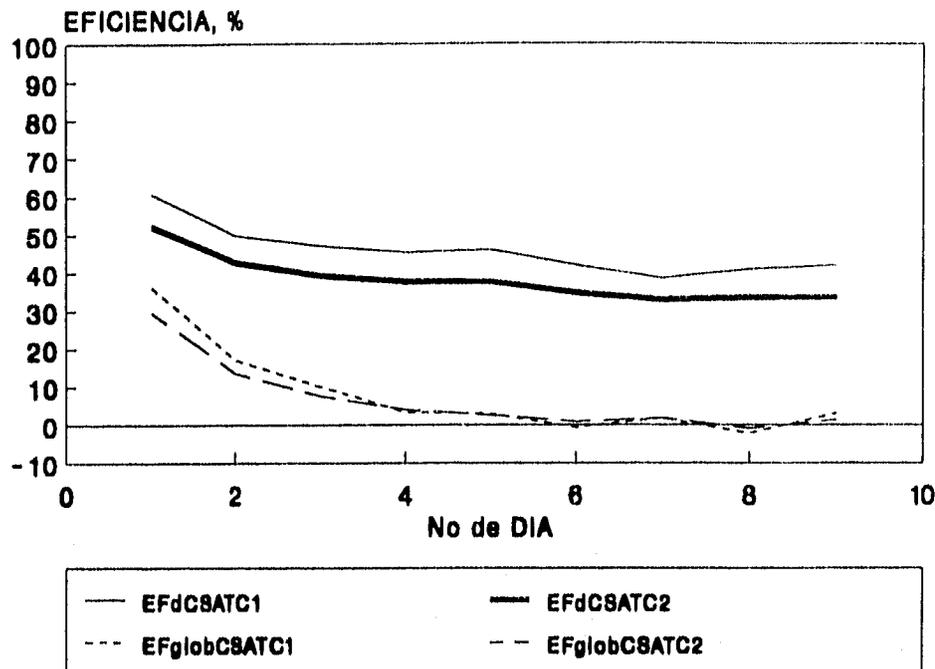
A partir del sexto día, en que el CSATC1 llegó a su estabilización, el CSATC2 verificó incrementos globales ligeramente mayores debido a que todavía no se estabilizaba (lo que ganaba en el día era mayor a lo que perdía en la noche) por ello sus incrementos globales fueron mayores o iguales a partir de ese día.

### ***3.3 Eficiencias de colección y eficiencias globales.***

De acuerdo con los cálculos que se realizaron de las eficiencias, tanto globales como de colección para cada calentador, se puede decir lo siguiente.

Las eficiencias de colección para el calentador que se experimentó inclinado, fueron superiores durante toda la fase que las que verificó el calentador que se experimentó horizontalmente. El primero logró una eficiencia promedio de 45.77% mientras que el segundo solamente llegó a 38.20% en promedio. La Ilustración 6 nos permite observar esto con mayor claridad.

En cuanto a las eficiencias globales, el primer calentador en promedio también tuvo una eficiencia global mejor que el segundo. La ilustración 6 nos las muestra casi traslapadas a partir del cuarto día, pero ello no indica que globalmente se hayan comportado de la misma manera ya que en promedio el primer calentador experimento una eficiencia global de 8.00%, mientras que el segundo llegó a 6.73% de eficiencia global promedio.



**Figura 6** Eficiencias de colección y globales, respecto del día en cuestión para el CSATC1 (inclinado) y CSATC2 (horizontal).

De acuerdo con lo expuesto en los tres subincisos anteriores, se puede concluir que el efecto debido a la inclinación hacia el sur, con un ángulo acimutal igual a cero en el CSATC:

- a) Ayuda a que se alcancen temperaturas al final del día mucho más altas. Debido a que sus incrementos de temperatura en las horas de captación son mayores que experimentándolo horizontalmente.
- b) Logra, sin embargo, aumentar las pérdidas nocturnas que trabajándolo en posición horizontal
- c) Acorta el período en que alcanzará su estabilización, respecto de uno que trabaje horizontalmente.
- d) Mejora notablemente la eficiencia de colección.
- e) Eleva moderadamente la eficiencia global, lo cual nos indica que,

dado que las pérdidas nocturnas son mayores, habrá que introducir modificaciones, en otras fases de la experimentación, que permitan disminuir los decrementos de temperatura sufridos durante la noche.

#### **4. Tercera Fase:**

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de una cubierta aislante durante la noche.

##### **4.1 *Temperaturas al finalizar el día***

En esta fase el interés primordial estuvo centrado en poder evaluar, no tanto la ganancia en el día como, las pérdidas nocturnas. El CSATC1 continuó operando bajo las mismas circunstancias que en la fase precedente, 25° de inclinación hacia el sur con un ángulo acimutal igual a 0°, mientras que el CSATC2 se le introdujo una modificación sencilla que consistía en colocarle una cubierta de poliestireno durante las horas en que no hay captación solar.

Por lo tanto, el primer calentador sirvió de testigo mientras que el segundo se le introdujo el cambio para evaluar el efecto debido al mismo.

Se siguió la metodología descrita en el capítulo anterior para esta fase. Y los resultados fueron los siguientes:

Las temperaturas finales fueron bastante parecidas, aunque pudimos observar una pequeña diferencia, que en promedio fue de 0.09 °C. De hecho al observar la gráfica que describieron las temperaturas finales con respecto al día en cuestión, se observa que prácticamente ambas gráficas de las temperaturas finales (T<sub>wf</sub>) correspondientes a cada calentador se encuentran traslapadas. Este comportamiento

se puede observar en la Ilustración 7.

#### 4.2 *Decrementos de temperatura nocturnos.*

En lo tocante a los decrementos que sufrieron ambos calentadores, se pudo observar una diferencia notable entre ambos. El que estuvo protegido durante la noche por una capa de poliestireno perdió menos temperatura que el que no la tuvo. Este comportamiento también se puede observar en la Ilustración 7.

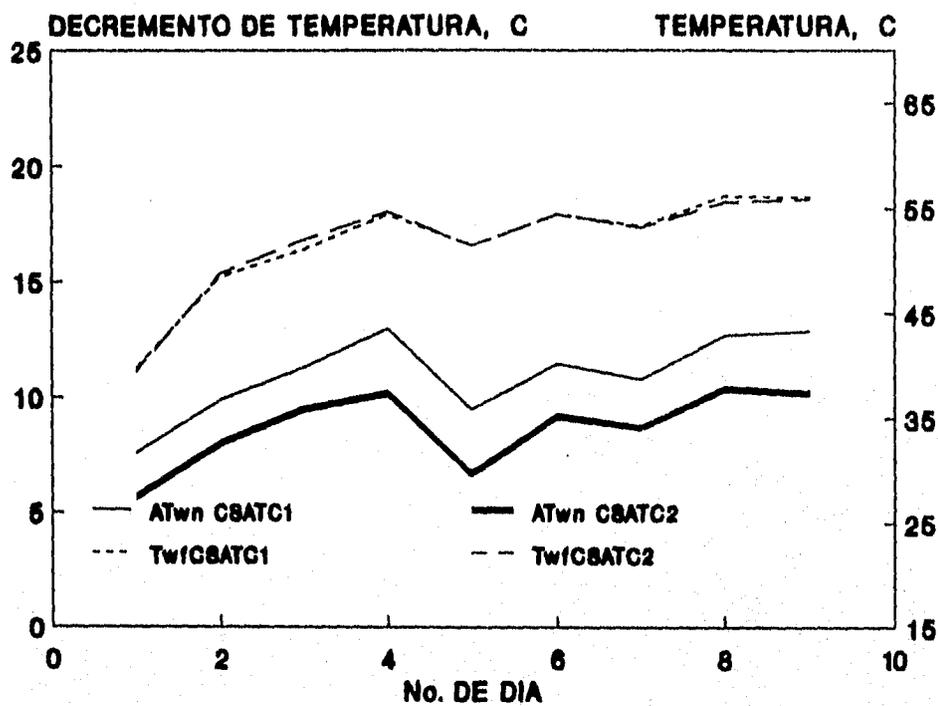


Figura 7 Decrementos nocturnos y Temperaturas finales para CSATC1 como testigo y CSATC2 con cubierta nocturna.

Este era el efecto buscado y la evaluación nos muestra que en promedio el segundo calentador perdió 2.37 °C menos que el primero. La temperatura con que amanecieron al día siguiente de haberle puesto la cubierta al CSATC2 fue en promedio de 40.7 °C para el primero y 43.07 °C para el segundo, lo que hace la

diferencia mencionada de 2.37 °C. A continuación se mostrarán en la Ilustración 8 la ganancia que tuvo el segundo calentador respecto del primero y la diferencia promedio.

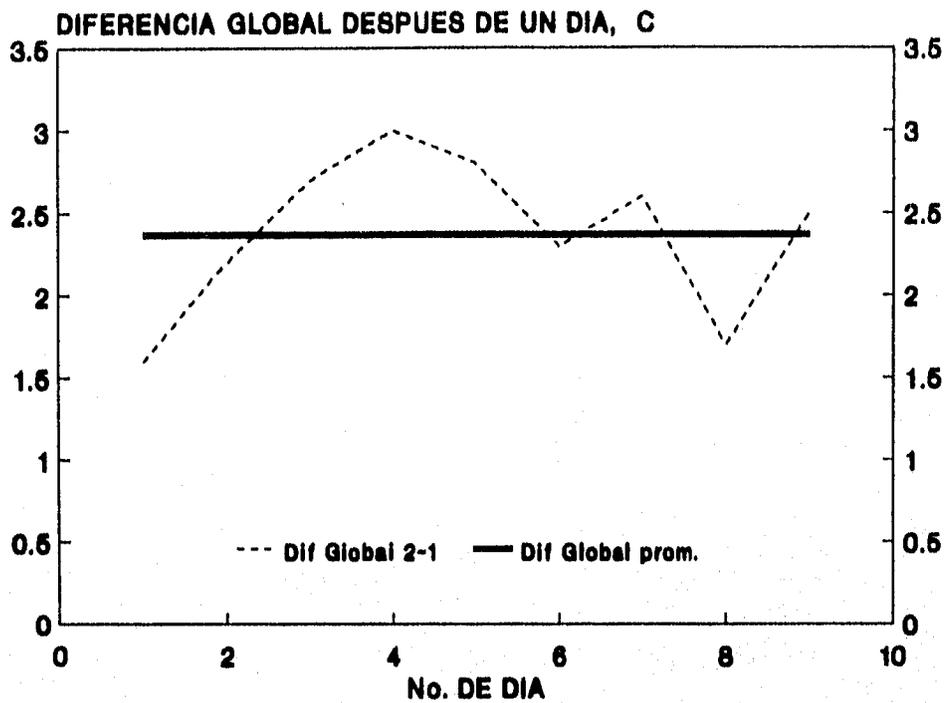


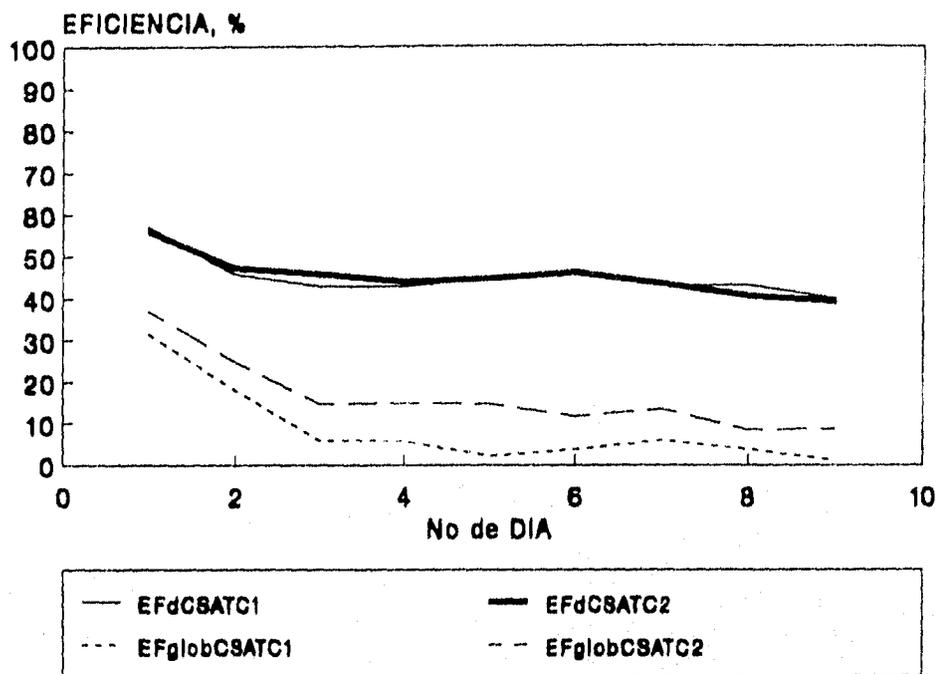
Figura 8 Diferencia diaria favorable al CSATC2 y diferencia promedio.

#### 4.3 Eficiencias de colección y eficiencias globales.

Finalmente se puede observar el comportamiento de ambos calentadores de acuerdo a las eficiencias que experimentaron.

En la Ilustración 9 se puede ver que las eficiencias de colección fueron prácticamente iguales para ambos calentadores, pero las eficiencias globales fueron mucho mayores para el calentador que se le puso la cubierta de poliestireno durante

la noche. El CSATC2 manifestó una eficiencia global promedio de 16.45% mientras que el CSATC1 sólo llegó a 8.65%. Esto indica que el segundo prácticamente duplico la eficiencia global del primero.



**Figura 9** Eficiencias de colección y eficiencias globales respecto del día en cuestión para el CSATC1 como testigo y CSATC2 con cubierta nocturna.

De acuerdo con lo expuesto en los tres subincisos anteriores se puede concluir que el efecto debido a la colocación de una cubierta de poliestireno durante las horas en que no hay radiación del Sol:

- a) Ayuda a disminuir notablemente las pérdidas de calor debidas: a la brisa nocturna, o al decremento de la temperatura ambiente durante esas horas, o a otros factores que influyen en dichas pérdidas.
- b) Aumenta notablemente la eficiencia global del CSATC.

## 5. Cuarta Fase:

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de reflectores planos.

En esta fase se pretendía ver el efecto de colocar reflectores planos que desviarán la radiación solar que en ellos incidía hacia la superficie colectora de el CSATC. Los reflectores fueron hechos con láminas galvanizadas y recubiertos con papel aluminio como superficie reflejante.

Esta etapa se realizó del 17 al 24 de mayo de 1993, y los resultados obtenidos se enuncian a continuación.

### 5.1 *Incremento de temperatura durante las horas de colección.*

Se vio una mejoría en el calentador que se le colocaron los reflectores, ya que en promedio alcanzó un incremento diario de 15.06 °C mientras que el que se quedó de referencia logró en promedio un incremento de 14.02 °C. Este comportamiento se puede observar en la Ilustración 10.

Vale la pena mencionar que los incrementos obtenidos por el CSATC2 fueron logrados partiendo de temperaturas iniciales más altas, lo cual habla de que sí hay una franca mejoría de colección, respecto del que no utilizó los reflectores, ya que normalmente en todas las fases se pudo observar que, entre mayores eran las temperaturas iniciales, menores eran los incrementos logrados durante el día.

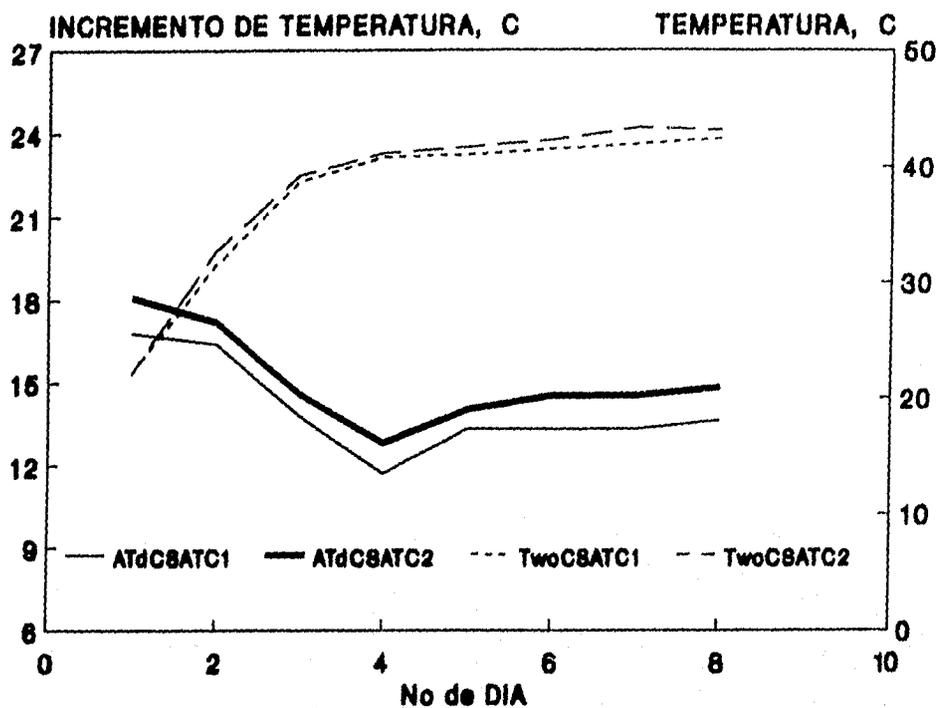


Figura 10 Incrementos de temperatura y temperatura inicial para CSATC1 de referencia y CSATC2 con reflectores planos.

### 5.2 *Decrementos de temperatura por la noche*

Como un efecto no deseado se verificó que con los reflectores instalados se lograba, además de un incremento diario mayor, un decremento nocturno también más grande, lo cual nulificaba de alguna forma el incremento ganado durante el día.

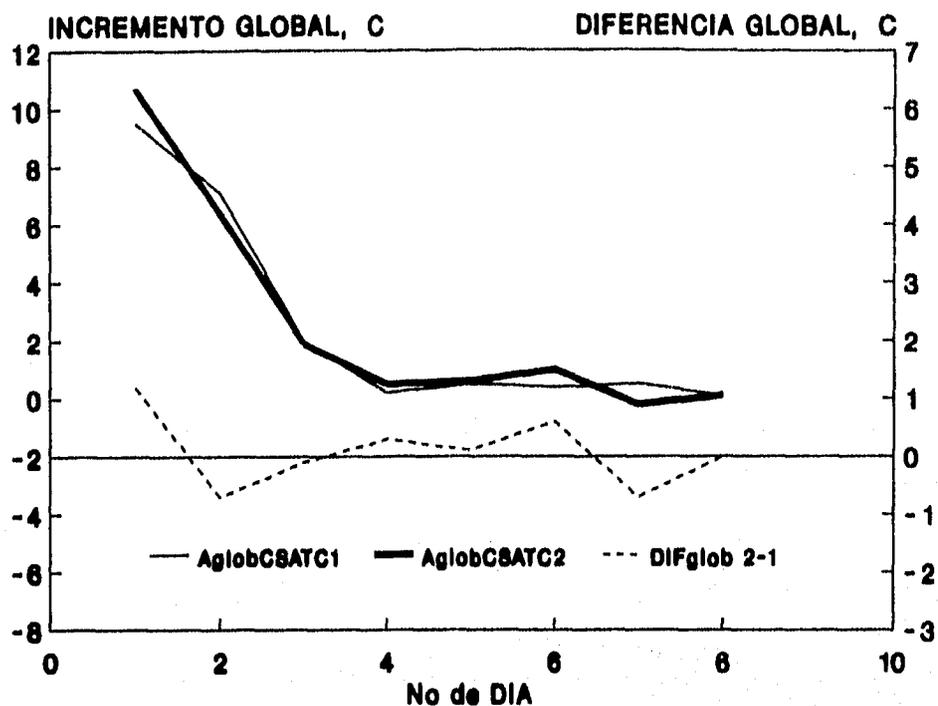
Las temperaturas finales a las que llegó el calentador con los reflectores fueron mayores, pero también mayores fueron los decrementos nocturnos. Esto pudo deberse a que los reflectores propiciaran que se atraparan las corrientes nocturnas sobre los vidrios, aumentando una pérdida por convección de los vidrios

hacia el aire de la atmósfera. No se pudo verificar esta hipótesis ya que no se contaba con el equipo necesario que permitiera evaluar las corrientes nocturnas sobre la cara colectora y su influencia en la pérdida de calor hacia el exterior.

El CSATC2 perdió durante la noche en promedio 12.43 °C, mientras que el que no tenía reflectores solamente perdió 11.48 °C.

Se pudo también observar en todas las fases, que mientras más alta era la temperatura final a la que llegaban los calentadores, mayores eran las pérdidas que presentaron durante la noche, y así las pérdidas de calor que presentó el CSATC2 en esta fase se inscribiría dentro de los parámetros normales de comportamiento de los CSATC.

El caso es que con estos decrementos nocturnos del CSATC2 se lograba prácticamente nulificar los incrementos alcanzados durante el día. Con esta nulificación de los logros diurnos, se verificó un comportamiento global apenas ligeramente superior en el calentador que tenía los reflectores que el que no los utilizó. Este comportamiento se puede observar en la Ilustración 11, donde se gráfica también la diferencia global entre ambos calentadores.

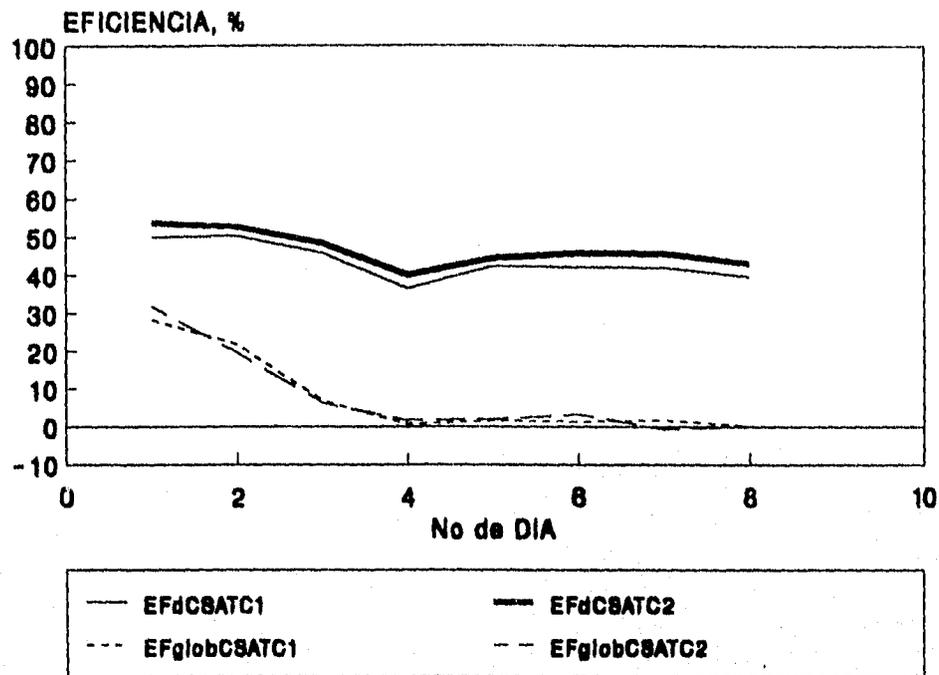


**Figura 11** Incrementos globales y diferencias globales respecto del día en cuestión para el CSATC1 como referencia y el CSATC2 con reflectores planos.

### 5.3 Eficiencias de colección y eficiencias globales.

En la Ilustración 12 se pueden observar las eficiencias de colección y las globales logradas por ambos calentadores.

Como se puede ver, las eficiencias de colección fueron superiores en el calentador que operó con reflectores planos (en promedio logró una eficiencia de colección de 46.66% mientras que el de referencia solo llegó a 43.45%). Las eficiencias globales fueron bastante similares para ambos calentadores, si observamos la gráfica que describieron se pueden ver traslapadas (el CSATC2 logró una eficiencia global promedio de 7.99%, mientras que el CSATC1 experimentó una eficiencia global promedio de 7.73%).



**Figura 12** Eficiencias de colección y eficiencias globales experimentadas por CSATC1 (testigo) y CSATC2 (con reflectores planos).

De acuerdo con lo expuesto en los tres subincisos anteriores se puede concluir que el efecto debido a la colocación de reflectores planos:

- Ayudó a tener mayores incrementos de temperatura en las horas de captación de la radiación solar, pese a que sus temperaturas iniciales eran mayores que con las que comenzó cada día el calentador que no tenía los reflectores.
- Sin embargo, y como un efecto no deseado logró que los decrementos nocturnos fueran también mayores. Logrando un comportamiento global similar entre ambos.
- Casi es obvio mencionar que las eficiencias de colección fueron mayores en el calentador con reflectores planos que en el otro. Y sus eficiencias globales fueron bastante parecidas.

- d) Dado que las eficiencias de colección fueron mayores con los reflectores y las globales similares; se vio que esta modificación sólo podría ser recomendable para introducirse junto con otra modificación tendiente a disminuir las pérdidas nocturnas (como es el caso de la colocación de la cubierta de poliestireno).

## 6. Quinta Fase:

Objetivo: Evaluación del efecto debido a la colocación de tres capas de vidrio.

En esta fase se pretendía evaluar el efecto, tanto sobre el gradiente ganado durante el día como en el perdido por la noche, debido a la colocación de tres capas de vidrio sobre la cara colectora. Es evidente que el efecto perseguido era la disminución de pérdidas nocturnas, pero esto acarrearía colateralmente una disminución de ganancias diurnas dada la absorptividad, reflectividad y transmisividad de la nueva capa de vidrio, que vendrían a disminuir inevitablemente, la cantidad de radiación solar aprovechable sobre la cara colectora del calentador.

Pese a esa pérdida inevitable, se decidió evaluar bajo esta condición al calentador para observar si, con todo y ello podría aportar una mejoría en el funcionamiento.

La experimentación se realizó del 26 de mayo al 2 de junio de 1993 y se le colocó una capa adicional de vidrio al CSATC2, operándolo con 25° de inclinación hacia el sur y con un ángulo acimutal igual a cero. El CSATC1 se quedó trabajando bajo las condiciones precedentes, tal como se había venido trabajando a lo largo de todas las fases de experimentación, es decir, continuó siendo un

calentador testigo que permitiera evaluar los cambios hechos en esta fase al otro calentador.

Los resultados obtenidos se mencionan a continuación:

### ***6.1 Incremento de temperatura durante las horas de colección***

A lo largo de toda la fase se pudo observar que los incrementos alcanzados por el calentador con tres vidrios fueron menores que los alcanzados por el que tenía solamente dos vidrios. El que operó con tres vidrios alcanzó en promedio un incremento diario de 11.72 °C, mientras que el que tuvo dos vidrios manifestó un incremento promedio diario de 12.93 °C.

Este comportamiento lo podemos observar en la Ilustración 13, donde también podemos verificar que el que tenía tres vidrios comenzó a trabajar diariamente con una temperatura ligeramente mayor que el que no; lo cual podría justificar que se dieran incrementos menores en aquel que en este, pero con todo y ello, como veremos en el tercer subinciso de este apartado, el calentador con dos vidrios tuvo una eficiencia de colección mejor que el que el que tuvo tres vidrios.

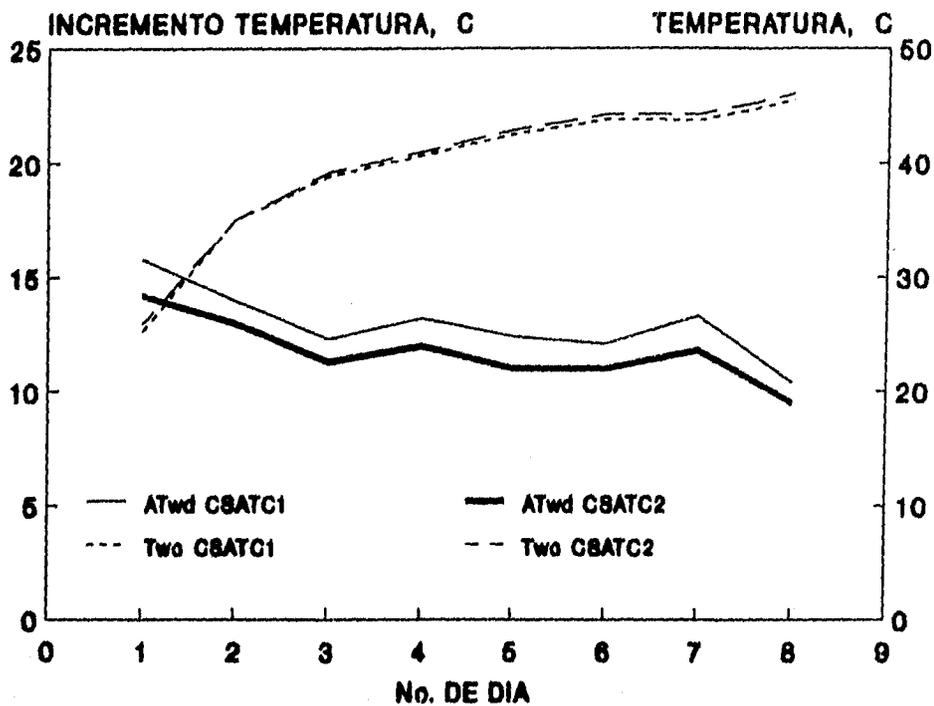
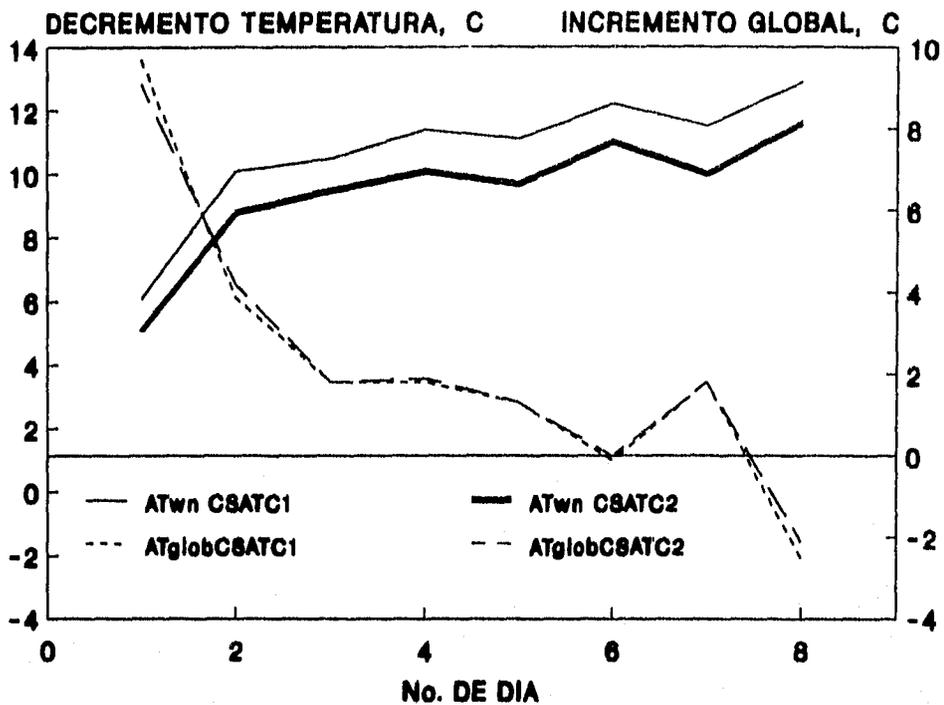


Figura 13 Incremento de temperatura en el día y Temperatura inicial para CSATC1 con dos vidrios y CSATC2 con tres vidrios.

## 6.2 *Decrementos de temperatura nocturnos e incrementos globales.*

Como era de esperar, los decrementos nocturnos fueron menores en el que trabajó con tres vidrios, pero pese a esto, el comportamiento global respecto al gradiente de temperatura cuantificado cada veinticuatro horas resultó ser prácticamente idéntico. Este comportamiento lo podemos observar gráficamente en la Ilustración 14, donde se ve que las gráficas de los incrementos globales se encuentran traslapadas en la mayor parte del recorrido. Ello indica que el comportamiento global de acuerdo a los gradientes de temperatura cuantificados cada 24 horas fue el mismo.



**Figura 14** Decrementos nocturnos e incrementos globales diarios para CSATC1 de referencia y CSATC2 con tres vidrios.

Si bien, lo que se buscaba en esta fase era disminuir las pérdidas nocturnas, no se pretendía como efecto colateral el que se disminuyeran a tal grado los incrementos, que la mejoría en la noche compensara la dismejoría en el día, en tal forma que el comportamiento global fuera similar. Se buscaba sí, una mejoría nocturna pero en tal forma que todavía se pudiera verificar un comportamiento global mejor en el caso de la introducción de los tres vidrios.

Este argumento quedará mejor sustentado en el siguiente subinciso.

### 6.3 Eficiencia de colección y eficiencia global.

La eficiencia de colección fue mejor en el caso de operar con dos vidrios ya que en promedio se pudo observar un eficiencia de colección en el calentador con dos vidrios de 40.51%, mientras que en el caso de la operación con tres vidrios se alcanzó solamente 36.73% de eficiencia de colección promedio.

Esto podría no ser un dato determinante si las eficiencias globales hubieran sido mayores en el caso de la operación con tres vidrios, pero no sucedió así, ya que respecto a estas eficiencias globales, ambos calentadores se comportaron prácticamente igual, como podemos ver en la Ilustración 15.

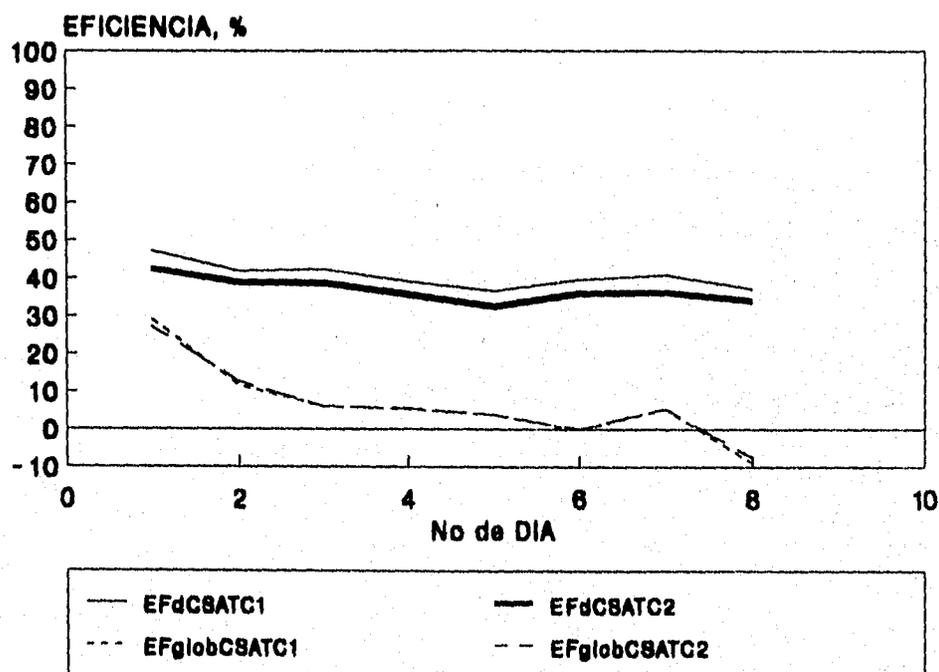


Figura 15 Eficiencias de colección y eficiencias globales para CSATC1 de referencia y CSATC2 con tres vidrios.

De lo dicho en los tres subincisos anteriores se puede concluir que el efecto debido a la colocación de tres vidrios en la cara de colección:

- a) Redujo, como era previsible, las pérdidas nocturnas debidas al intercambio de calor entre el calentador y la atmósfera.

De alguna forma se podría decir que se presentaron "ganancias" nocturnas.

- b) Redujo a su vez el gradiente diurno a tal grado que a penas se alcanzó a compensar con la disminución de las pérdidas nocturnas.

Esto nos indica que de alguna manera se presentaron "pérdidas" diurnas.

- c) Esta compensación entre las ganancias nocturnas y las pérdidas diurnas, hizo que el calentador se comportara globalmente de manera muy similar a la condición determinada por la presencia de únicamente dos vidrios sobre la cara colectora.

- d) Dado que el comportamiento global fue muy similar entre las dos condiciones de operación, y, el comportamiento durante las horas de captación más bien fue desfavorable con la introducción de tres vidrios: no se pudo encontrar ninguna razón suficiente que impulsara a sostener esta condición como un cambio favorable en el comportamiento del calentador, ni para ser introducida junto con otras condiciones que ayudaran a aumentar la captación diurna.

## 7. Sexta Fase:

Objetivo: Evaluación de todas las mejoras conjuntamente introducidas.

Esta sexta y última fase, se pensó proponerla en función de los resultados obtenidos en las cinco fases anteriores. Es decir, se pensó probar conjuntamente en

un sólo calentador todas aquellas modificaciones cuyos resultados hayan logrado mejorar el funcionamiento del CSATC.

Entonces, se decidió: de acuerdo con los resultados de la segunda fase, experimentar al CSATC2 con una inclinación de  $25^\circ$  hacia el sur y con un ángulo acimutal igual a cero; tomando en cuenta los resultados de la tercera fase, colocarle una cubierta aislante durante las horas en que no hay radiación solar; los resultados de la cuarta fase indicaron la conveniencia de colocarle los reflectores planos para aumentar la ganancia durante las horas de captación. Finalmente, los resultados de la quinta fase permitieron decidir operar al calentador únicamente con dos vidrios y no con tres ya que no hubo mejoría palpable.

Por lo tanto esta condición de operación estaría determinada por experimentar al CSATC2 con dos vidrios sobre su cara de colección, inclinado hacia el sur con un ángulo de  $25^\circ$  y un ángulo acimutal de cero grados, con una cubierta aislante nocturna, y con reflectores planos.

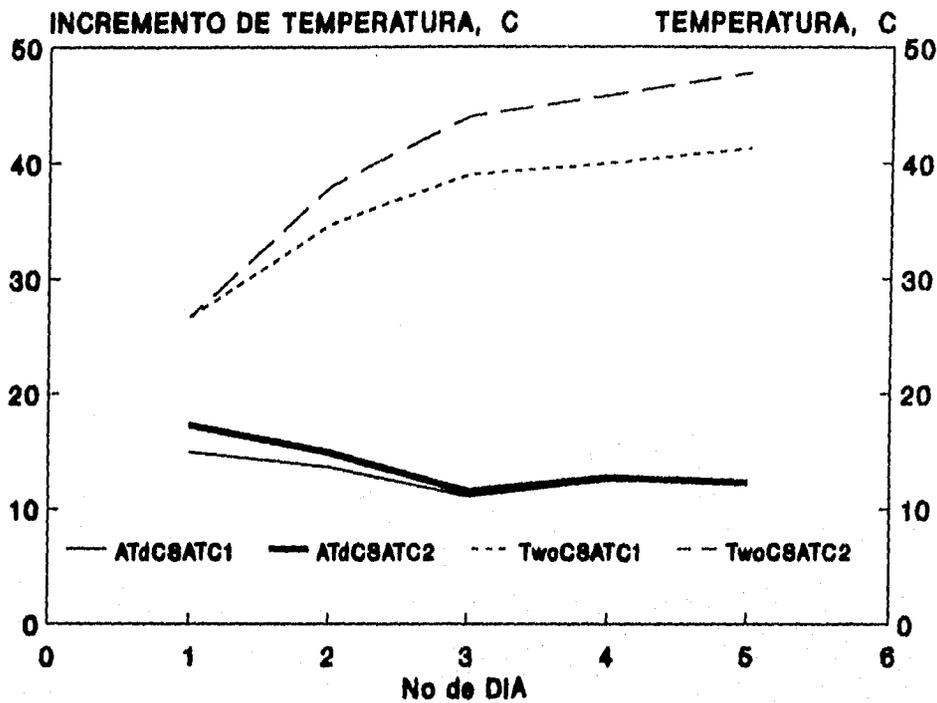
Es obvio decir que el CSATC1 se quedaría en la condición precedente para usarlo como calentador testigo.

La experimentación se realizó del 7 al 11 de junio, y los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

### ***7.1 Incremento de temperatura durante las horas de colección***

Los incrementos de temperatura fueron superiores en el calentador que se le introdujeron todas las modificaciones. En promedio se pudo observar que alcanzó un incremento diario de  $13.74^\circ\text{C}$ , mientras que el de referencia sólo logró  $12.88^\circ\text{C}$ . Estos datos no nos dirían mucho si no se considera que también en promedio el que se le introdujeron los cambios comenzó a trabajar a  $40.46^\circ\text{C}$ , mientras que el otro comenzó a  $36.34^\circ\text{C}$ , lo cual nos indica que si, pese a que

comenzó a trabajar con una temperatura más alta, logró incrementos mayores, su desempeño fue bastante favorable ya que en todas las fases anteriores se pudo observar que entre mayores eran las temperaturas de inicio, menores eran los incrementos logrados comparando a un calentador con el otro. Esta condición logró superar esa barrera. Este comportamiento se puede observar en la Ilustración 16.



**Figura 16** Incrementos de temperatura diurnos y temperaturas iniciales para CSATC1 de referencia y CSATC2 con todas las modificaciones favorables.

Comparando las temperaturas finales logradas, podemos observar que el calentador con todas las modificaciones logró una llegar a una temperatura de 54.2 °C en promedio, en tanto que el otro solamente llegó a 49.22 °C de temperatura final promedio.

## 7.2 *Decrementos de temperatura e incrementos globales*

Conforme transcurrió esta fase se vio que ambos calentadores fueron teniendo decrementos mayores pero el calentador con todas las modificaciones se mantuvo por debajo de los decrementos que presentó el de referencia, esto es, que el CSATC2 tuvo decrementos nocturnos menores a los que presentó el CSATC1. En promedio se pudo observar que el modificado presentó un decremento diario de 9.26 °C, en tanto que el de referencia lo superó con un decremento de 9.82 °C.

Esto, también es muy favorable ya que se podía haber esperado que los decrementos fueran mayores para el que tenía todas las modificaciones dado que alcanzó temperaturas finales más altas, porque ello en las fases anteriores indicaba la seguridad de perder mayor temperatura en la noche.

La idea anterior queda más clara al observar este comportamiento en la Ilustración 17, donde también se puede ver que los incrementos globales (tomados cada 24 horas) para el calentador con todas las modificaciones siempre fueron mayores.

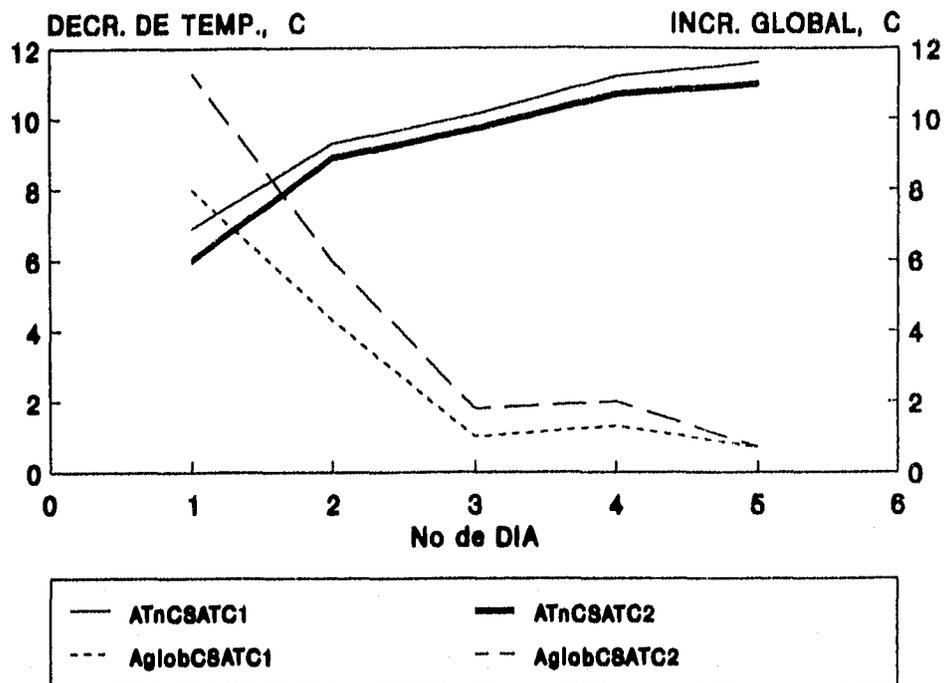


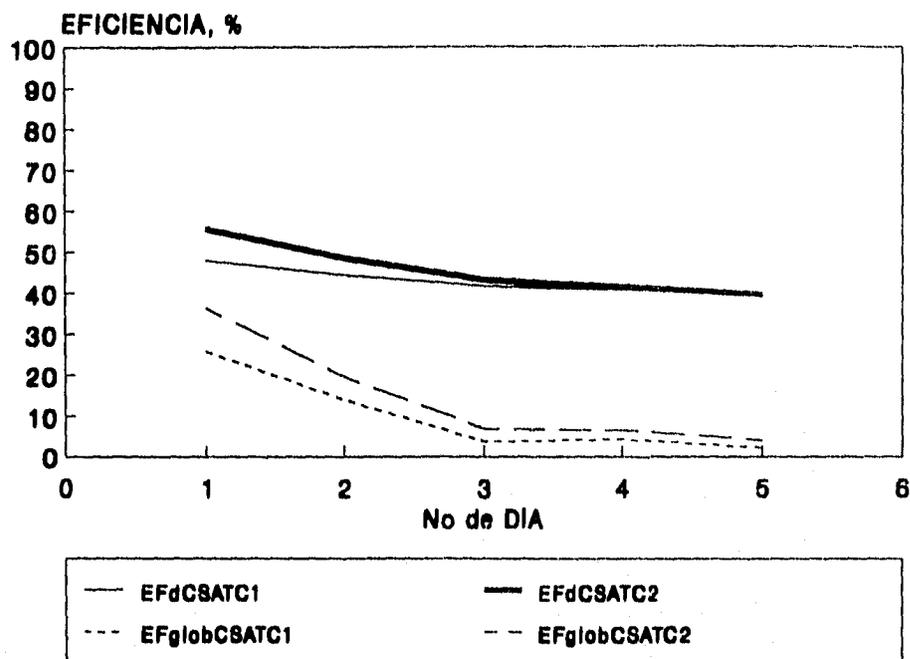
Figura 17 Decrementos de temperatura e Incrementos Globales para CSATC1 de referencia y CSATC2 con todas las modificaciones.

### 7.3 Eficiencias de Colección y Eficiencias globales

En lo tocante a las eficiencias de colección para los calentadores se observó que el calentador modificado tuvo una eficiencia de colección promedio de 45.74%, en tanto que el otro sólo una eficiencia de colección promedio de 42.91%. Estas eficiencias de colección fueron decreciendo en ambos calentadores, aunque en el modificado decreció más rápidamente hasta que en último día de experimentación se igualaron como se puede verificar en la Ilustración 18.

En esa Ilustración también podemos observar que las eficiencias globales fueron superiores durante toda la fase para el calentador modificado que en el otro.

La eficiencia global promedio para el calentador modificado fue de 14.7%, mientras que en el otro sólo fue de 10.01%.



**Figura 18** Eficiencias de colección y eficiencias globales para CSATC1 de referencia y CSATC2 con todas las modificaciones favorables.

De lo dicho en los tres subincisos anteriores se puede concluir que el hecho de introducir todas las modificaciones en el CSATC2:

- a) Aumentó el gradiente ganado durante las horas de colección.
- b) Disminuyó notablemente las pérdidas de calor nocturnas.
- c) Hizo que el comportamiento global del calentador fuera más eficiente.

Sólo hace falta decir que precisamente estas tres condiciones que se encontraron como conclusión era lo que pretendía todo el trabajo (Cfr. pág. 96 del presente trabajo). Se quería aumentar la eficiencia de colección y se logró como se indica en el inciso "a" de esta página, se quería disminuir las pérdidas nocturnas

y lo mismo se logró según lo muestra el inciso "b" y, finalmente, se quería tener un comportamiento global mejor y también se logró tenerlo como se indica en el inciso "c". Es, por lo tanto, evidente el éxito logrado con este pequeño esfuerzo de investigación experimental, y por ello lo he propuesto como trabajo conclusivo para obtener la titulación de mis estudios de Ingeniería Mecánica.

# Conclusiones

## Conclusiones

En el capítulo precedente se pudo comprobar que tanto la inclinación debida hacia el sur, como la colocación de una cubierta nocturna junto con la colocación de reflectores planos al Calentador Solar Autocontenido tipo Caja, trabajando solamente con dos vidrios mejoró notablemente el desempeño del mismo.

Con la inclinación hacia el sur el Calentador modificado logró en promedio mejorar por  $2.78^{\circ}$  C al de referencia, y logró temperaturas finales que en promedio fueron  $4.15^{\circ}$  C mayores al testigo.

También logró incrementos de temperatura globales (cada 24 horas) mayores.

Las eficiencias de colección para el calentador que se experimentó inclinado, fueron superiores durante toda la fase que las que verificó el calentador que se experimentó horizontalmente.

En cuanto a las eficiencias globales, el primer calentador en promedio también tuvo una eficiencia global mejor que el segundo.

En resumen se concluye que la inclinación hacia el sur:

Ayuda a que se alcancen temperaturas al final del día mucho más altas. Debido a que sus incrementos de temperatura en las horas de captación son mayores que experimentándolo horizontalmente.

Logra, sin embargo, aumentar las pérdidas nocturnas que trabajándolo en posición horizontal

Mejora notablemente la eficiencia de colección.

El aumento en las pérdidas nocturnas indicó que habría que introducir modificaciones, en las siguientes fases de la experimentación, que permitieran disminuir los decrementos de temperatura sufridos durante la noche. En función de ello fue que se introdujeron los cambios en las siguientes fases de experimentación.

La colocación de un aislante térmico sobre la cara de colección durante la noche ayudó a disminuir notablemente las pérdidas de calor debidas a la brisa nocturna o al decremento de temperatura ambiente durante esas horas. En promedio, el calentador protegido perdió 2.37 °C menos que el calentador de referencia.

Aumentó notablemente la eficiencia global del calentador protegido, a tal grado de casi duplicar la eficiencia del otro. Mientras el protegido manifestó una eficiencia global promedio de 16.45%, el calentador de referencia sólo llegó a 8.65% de eficiencia global promedio.

En cuanto al efecto debido a la colocación de reflectores planos para aumentar la radiación solar incidente se vio una mejoría en el calentador que se le colocaron los reflectores, ya que en promedio alcanzó un incremento diario de 15.06 °C mientras que el que se quedó de referencia logró en promedio un incremento de 14.02 °C.

Sin embargo, se verificó un decremento nocturno también mayor en ese calentador con los reflectores, logrando un comportamiento global similar entre ambos.

En cuanto a las eficiencias de captación y globales, se vio que el Calentador con reflectores tuvo una eficiencia de captación mayor que la del testigo, pero dadas las pérdidas nocturnas, se pudo observar que las eficiencias globales en promedio fueron bastante similares. Esto hizo reconocer que esta modificación sólo podría ser recomendable para introducirse junto con otra modificación tendiente a disminuir las pérdidas nocturnas (como es el caso de la colocación de la cubierta de poliestireno).

Una fase que no dio el resultado esperado fue la que trataba de disminuir las pérdidas nocturnas gracias a la colocación de tres vidrios sobre la cara de colección sin disminuir notablemente la eficiencia global. En esa fase, si bien, si

se redujeron las pérdidas nocturnas, también se redujeron las ganancias diurnas, dando como resultado un comportamiento global muy parecido.

Junto a esto, y gracias a que el comportamiento durante las horas de captación fue desfavorable para el calentador con tres vidrios, no se pudo encontrar ninguna razón suficiente que impulsara a sostener esta condición como un cambio favorable en el comportamiento del calentador, ni para ser introducida junto con otras condiciones que ayudaran a aumentar la captación diurna.

Los resultados hasta aquí resumidos impulsaron a experimentar finalmente a el calentador introduciendole conjuntamente todas las modificaciones que en su momento resultaron favorables para mejorar el desempeño del mismo.

El calentador con dos vidrios, cubierta nocturna y reflectores planos fue experimentado logrando un incremento de captación promedio de 13.74 °C, mientras que el otro sólo verificó un incremento de captación promedio de 12.80 °C. Los decrementos nocturnos fueron ligeramente menores en el modificado, ya que en promedio perdió durante la noche 9.26 °C, mientras que el de referencia perdió en promedio 9.82 °C.

Se observó entonces, que gracias a las modificaciones introducidas se logró mayor ganancia de captación y menor pérdida nocturna, lo cual nos habla de que la eficiencia de colección fue mayor (45.74% en promedio para el modificado frente a 42.91% del testigo), y que la eficiencia global también fue mayor (en promedio de 14.7% para el modificado y 10.01% para el de referencia).

De esta última fase se concluye que las modificaciones conjuntamente introducidas fueron una buena decisión, ya que hicieron que el comportamiento global del calentador fuera más eficiente.

El objetivo técnico del presente estudio consideró que fue bien solucionado, ya que se logró aumentar el desempeño durante las horas de captación y se logró disminuir las pérdidas nocturnas.

Todavía quedan algunos aspectos que haría falta estudiar en futuras ocasiones, como el efecto debido a la colocación de aislantes transparentes, que comienzan a investigarse en Perú con tecnología Alemana (como los descritos en el artículo citado en la nota al pie No 8 del capítulo 2) . Quizá ellos podrían aumentar mucho más la eficiencia de captación y disminuir las pérdidas nocturnas. También se podría estudiar el efecto debido a la utilización de superficies selectivas que ayuden a aumentar la eficiencia de colección, u otros aspectos que dada la limitación de equipos de medición no se pudo estudiar en el presente trabajo (pérdidas debidas a las corrientes de aire, evaluación de la absorptividad, reflectividad y transmisividad de diferentes materiales para la construcción de Calentadores solares Autocontenidos Tipo Caja).

Si bien, no se logró igualar el desempeño global del Calentador Solar Autocontenido Tipo Caja al del Calentador Solar de Convección Natural, sí se presentaron resultados atractivos para aquellos sectores para los que fue pensado el presente estudio y, que constituyen, en último término, la razón del presente esfuerzo. Creo que si los frutos de la técnica no se hacen accesibles a los sectores más desfavorecidos de la sociedad, son frutos que únicamente van a lograr consolidar el confort e indolencia de los que tienen mucho mientras que, en la vía de los hechos seguiríamos condenando al ostracismo al pueblo que espera recuperar su lugar como sujeto digno de seguridad, justicia, libertad y -por qué no- confort.

*José Eugenio Gómez Díaz Barriga*

Enero de 1994

---

# **Bibliografía**

## BIBLIOGRAFIA

- K. Butti and J. Perlin, The Golden Tread, Van Nostrand Reinhold, Palo Alto California 1980
- A. Castellanos y M. Escobedo, La Energía Solar en México: situación actual y perspectivas, Centro de Ecodesarrollo, México 1980
- A. A. Concheiro y L. Rodríguez, Alternativas energéticas, Fondo de Cultura Económica, México 1985
- H. Coviantes, La Energía Solar, Colección Biblioteca Joven, Fondo de Cultura Económica, México 1989
- D. Gudiño y R. Alvarado, Calentadores Solares Autocontenidos (Alternativa para economías en crisis), *Memorias de la VII Reunión Nacional de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)*, Saltillo, Coah., México 1983
- J. J. Hermosillo, Apuntes para el curso de Energía Solar, ITESO, mimeo
- B. V. Karlekar y R. Desmond, Transferencia de Calor, Editorial Interamericana, México 1986
- P. J. Lunde, Solar Thermal Engineering (space heating and hot water systems), John Wiley & Sons, USA 1980

- J. MacNeil, Strategies for Sustainable Economic Development, *Scientific American* v.261 n.3, September 1989
- B. Maeda and B. Melzer, A comeback for Breadboxes, *Solar Age* v.5 n.10, October 1980
- J. A. Manrique, Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Harper & Row Latinoamericana (HARLA), México 1984
- K. McCartney, Agua Caliente Solar: manual práctico, Hermann Blume Ediciones, Madrid 1980
- A. B. Meinel, Applied Solar Energy (An Introduction), Addison-Wesley Publishing Company, USA 1976
- R. H. Montgomery, The Solar Decision Book, John Wiley & Sons Inc., USA 1986
- H. Raw, Energía Solar: aplicaciones prácticas, Marcombo Boixareu Editores, España 1981
- M. Rommel and A. Wagner, Application of Transparent Insulation Materials in Improved Flat-Plate Collectors and Integrated Collector Storages, *Solar Energy* 49, November 1992