



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGON**

# **LOS COLECTORES SOLARES EN MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**P R E S E N T A:**

**EVERARDO LENIN RAMÍREZ RAMOS**

**ASESOR. ING. EVERARDO SOLÍS ALCANTAR**

**SAN JUAN DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO.**

**2009**





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.

Dedico esta tesis con agradecimiento:

La realización de esta tesis fue posible gracias al estímulo, colaboración y apoyo del Ing. Everardo Solís Alcantar, a quien le agradezco por brindarme sus conocimientos y experiencia, pero sobretodo la paciencia que tuvo para conmigo.

También agradezco al M. en I. Gilberto García Santamaría González, al Ing. Luis Pomposo Viguera Muñoz, al Ing. Martín Ortíz León, al M. en I. Mario Sosa Rodríguez, por la revisión y los comentarios hechos a esta tesis.

A mis padres, Everardo Ramírez Mendoza y Lucina Ramos Villalobos, por su apoyo incondicional, su paciencia y por creer en mí.

A mi abuela Concepción Mendoza Jiménez (q.e.p.d.), porque representa las raíces de mi familia y representa un ejemplo a seguir y por haber sido como una segunda madre para mí.

A mis hermanos, Pavel, Erandi, Miguel, Ninel y Yoame, por los momentos inolvidables que hemos pasado juntos y su confianza.

A mi familia toda, a mis tíos: Martha Ramírez Mendoza y Juan Nava García; Antonio Lee Chong; Carlos Ramírez Mendoza y Blanca Martínez Soriano; Teresa Ramírez Mendoza (q.e.p.d.) y Rubén Beltrán Hernández.

A mis primos, María de Jesús Ramírez Mendoza y José Luis Martínez; Martha Beltrán Ramírez; Carlos; Margarita; Pepito; Rubén; Araceli; Maricruz; Maricela; Juan; Patricia; Ismael y Gilberto; a Ignacio Tovar Liceaga; a mis sobrinos Amanda; Ángel; Mariana; Mario y Luis.

A mis amigos, Graciela I. Soria Juárez, Fernando Vega Palacios, Miguel Ángel Vega Soria, Harlen Vega Soria; Adrian Macías Santos; Efrén Pichardo

---

Peña; Enrique Sánchez Lara; José Arturo Rodríguez García; Nayeli García López; Rosa Elena Tovar Liceaga; Gabriela Alejandra González Domínguez; Marco Antonio Piñuela Navarro; A todos ellos por su apoyo y por los momentos que compartimos juntos.

A mis maestros que me impartieron clase en la FES Aragón, por compartir sus conocimientos y experiencia.

A la UNAM mi *alma mater*.

---

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPITULO I HISTORIA DE LOS COLECTORES SOLARES</b>	7
<b>CAPITULO 2 FUNDAMENTOS</b>	
2.1 El Sol	18
2.1.1 Características físicas	18
2.1.2 Distribución espectral de la radiación solar	19
2.2 Efecto atmosférico sobre la radiación solar	21
2.2.1 Irradiancia y constante solar	21
2.2.2 Componentes de la radiación en la superficie	22
2.2.3 Masa aire	24
2.2.4 Medida de la radiación solar	25
2.3 Geometría del movimiento del Sol	27
2.3.1 Cálculo de las coordenadas horarias	29
2.3.2 Cálculo de las coordenadas horizontales	31
2.3.3 Diagramas de trayectoria solar	32
2.4 Irradiación extraterrestre horizontal	34
2.4.1 Insolación máxima	34
2.4.2 Irradiación extraterrestre en el plano horizontal	35
2.4.3 Irradiancia en un captador	36
2.4.4 Ángulo de incidencia	36
2.4.5 Irradiancia en el plano inclinado	38
2.4.6 Irradiación en un captador	39

---

2.4.7 Irradiación mensual en planos inclinados	39
2.5 Disponibilidad de la radiación solar	42
2.5.1 Estimación de la insolación solar	46
2.5.2 Radiación solar sobre la República Mexicana	49
2.5.3 Radiación sobre un plano horizontal	51
2.5.4 Radiación sobre planos no horizontales	52
2.6 Trasmisión de la radiación solar	53

### **CAPITULO 3 EL COLECTOR SOLAR PLANO Y EL COLECTOR DE TUBOS DE VACÍO**

3.1 El calentador solar plano	59
3.1.1 Principales componentes de un calentador solar plano	60
3.2 El calentador solar de tubos de vacío	68
3.3 Tipos de calentadores de tubos de vacío	70
3.3.1 Tubos evacuados simples	72
3.3.2 Tubo de vacío de flujo directo	73
3.3.3 Tubo de vacío Heat pipe o tubo de calor	74
3.4 Dimensionamiento y beneficios del uso de calentadores solares	77

### **CAPITULO 4 CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS**

4.1 Definición de instalación solar térmica	84
4.2 Componentes de una instalación solar térmica	85
4.3 Clasificación de las instalaciones solares térmicas	86
4.3.1 Clasificación según el principio de circulación	88
a) circulación natural	88

---

b) circulación forzada	89
4.3.2 Clasificación según el sistema de intercambio	91
4.3.3 Clasificación según la solución de integración con el sistema de energía solar	
a) Acumulación solar y auxiliar centralizada	93
b) Acumulación solar centralizada que alimenta a una caldera de gas natural individual de tipo mixto modulante	95
c) Acumulación solar distribuida que alimenta a una caldera de gas individual natural de tipo mixto modulante	97
4.3.4 Clasificación según la aplicación	100
a) Producción de agua caliente	100
b) Calentamiento de piscinas	104
 <b>CAPITULO 5 PERSPECTIVAS DE LOS COLECTORES SOLARES</b>	
5.1 Aspectos generales del análisis de mercado	108
5.2 Sector de construcción de la vivienda	116
5.3 Lecciones relevantes de la experiencia internacional	121
5.4 Barreras e impulsores para el desarrollo del mercado	128
<b>CONCLUSIONES</b>	130
<b>ANEXO A</b>	133
<b>ANEXO B</b>	154
<b>ANEXO C</b>	169
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	170

---

## INTRODUCCIÓN.

La característica principal de las diversas formas de energía es su posibilidad de transformación. Por ejemplo, en una central eléctrica solar, la energía del sol en forma de ondas electromagnéticas se transforma en electricidad por efecto fotovoltaico, la que a su vez puede convertirse en energía mecánica cuando se accionan motores o en energía eléctrica para las lámparas.

Del mismo modo quemando combustible en una caldera de una central termoeléctrica, la energía térmica sobre una masa de agua genera vapor a alta presión, que a su vez arrastra una turbina la que adosada al generador produce, energía eléctrica, susceptible de convertirse en energía mecánica, eléctrica.

Surge de los dos ejemplos planteados que el resultado final de transformación energética es el mismo, pero en el proceso parte por un lado de la captación en forma directa de la energía solar, mientras que por el otro, se suelen emplear combustibles fósiles como el petróleo, gas natural o carbón mineral.

Estos recursos naturales, que en los últimos años se han empleado para satisfacer necesidades de todo orden, están destinados a un agotamiento más o menos próximo, por lo que normalmente se les denomina como no renovables.

La radiación solar, por el contrario, constituye el ejemplo clásico de una forma de energía no sujeta al agotamiento.

El gran avance tecnológico ha originado el uso cada vez mayor de energía, produciendo un aumento casi exponencial de sus necesidades, lo que ha llevado a una explotación muchas veces irracional de los combustibles tradicionales, originando de ese modo, una continua disminución de las reservas.

Por lo tanto, es de vital interés para la humanidad analizar los medios de aprovechamiento de las fuentes de energía no convencionales, a fin de mantener e incrementar el desarrollo tecnológico e industrial.

**El objetivo de esta investigación es conocer el funcionamiento y aprovechamiento de la energía solar mediante los colectores solares de baja temperatura de uso más frecuente en México para la producción de agua caliente de uso doméstico conocidos como: colector solar de placa plana y colector solar de tubos de vacío**

La energía solar, según su forma de captación y aplicación puede clasificarse de la siguiente manera:

- Energía solar directa
- Energía solar indirecta

La energía solar directa constituye la energía térmica, termodinámica y fotovoltaica.

La energía solar indirecta la componen la energía eólica, hidroeléctrica, biomasa y geotérmica.

Todas estas formas de energía, así como la atómica, deben ser consideradas como factor de complemento e integración para que el consumo de los energéticos tradicionales se reserve a usos de mayor valor en el presente y sobre todo en el futuro.

La observación de la conversión de la radiación solar en energía solar térmica del fluido dio lugar, ya en el siglo XIX, a los primeros colectores térmicos comerciales y a las instalaciones de energía solar térmica activa.

Un colector solar es un tipo especial de intercambiador térmico que transforma la radiación solar en energía térmica utilizable. El aprovechamiento

mediante colectores térmicos de la energía solar es la aplicación más inmediata de las tecnologías solares, se basa en la captación de energía mediante cuerpos expuestos a la radiación, preferentemente de color oscuro con el fin de mejorar la conversión. Usualmente el dispositivo se utiliza para calentar un fluido que circulando por el colector transfiere la energía a un sistema de almacenamiento intermedio para su uso final en el momento de la demanda.

Los colectores solares térmicos se dividen en tres categorías:

- Colectores de baja temperatura.- Proveen calor útil a temperaturas menores de 70°C mediante absorbedores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua sanitaria y, en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el calor de proceso no es mayor a 60°C, por ejemplo la pasteurización, el lavado textil, etc.
- Colectores de temperatura media.- Son dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100° y 300°C. En esta categoría se tienen a los concentradores estacionarios y a los canales parabólicos, todos ellos efectúan la concentración mediante espejos dirigidos hacia un receptor de menor tamaño. Tiene el inconveniente de trabajar solamente con la componente directa de la radiación solar por lo que su utilización queda restringida a zonas de alta insolación.
- Colectores de alta temperatura.- Existen tres tipos diferentes: los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central. Operan a temperaturas mayores a los 500°C y se usan para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica: en algunos países estos sistemas son operados por

productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotos.

El colector es únicamente un componente del sistema de energía térmica. Para obtener agua caliente a partir de la energía solar son imprescindibles también otros elementos: depósito, bombas (según sea el caso), válvulas y tuberías. La complejidad del sistema solar térmico es innegable, su correcto funcionamiento depende de un equilibrio entre la superficie de captación, los caudales empleados, el volumen del depósito de almacenamiento, y todo ello en función de la irradiación disponible y la temperatura de los consumos.

La producción de agua caliente sanitaria es la aplicación de la energía solar más popular dada su alta rentabilidad. La tecnología usada para ello se centra en el colector solar de placa plana, dado que las temperaturas máximas deseadas quedan por debajo de los 70°C.

El colector solar de placa plana está constituido por un elemento absorbente metálico protegido térmicamente mediante un aislante y una cubierta de material transparente. Una caja rígida o carcasa de cuerpo y resistencia mecánica a todo el dispositivo permitiendo su anclaje en el lugar determinado. Este captador térmico es denominado colector de placa plana, porque básicamente está constituido por una caja de superficie mucho mayor que su altura. Utiliza una placa metálica como superficie absorbente. Los colectores de placa plana son habituales en aplicaciones donde se requiere disponer energía térmica a temperaturas bajas, aprovechan tanto la radiación directa como la difusa, no necesitan de seguimiento del Sol y requieren un mantenimiento casi nulo.

Uno de los problemas de los colectores solares planos es causado por el calentamiento del aire que rodea los tubos y que forma celdas conectivas que transmiten energía de los tubos al vidrio y de ahí al aire del ambiente, con la consiguiente pérdida de eficiencia. Para evitar esto se inventaron los colectores de tubos de vacío o evacuados, estos como su nombre lo indican son unos tubos de

vidrio que en su interior tienen otro tubo de cobre cubierto con una película selectiva, pero donde se ha extraído el aire provocando una atmósfera enrarecida en donde no se producen celdas convectivas eficientes y se aumenta la energía solar captada en el tubo negro.

Los colectores de tubos de vacío tienen el mismo principio de trabajo que los colectores de placa plana, o sea, la radiación es recibida por el absorbedor y llevada en forma de calor hacia un tanque de almacenamiento. La diferencia consiste en el absorbedor que está formado por tubos en las cuales se ha hecho vacío para disminuir el calor y dentro del tubo van colocadas las secciones de la placa absorbidora.

Algunos modelos están formados por tubos sencillos de vidrio, los cuales tienen en su interior un sector de placa plana de absorción acoplada a un tubo metálico por donde fluye el líquido. En otros modelos el absorbedor suele ser un tubo interior con tratamiento óptico selectivo, lo que mejora todavía más la eficiencia del colector. Entre el tubo interior y el exterior, ambos concéntricos, existe vacío. Hay varios modelos de colectores al vacío, en dependencia del movimiento del fluido y el modelo de transferencia de calor utilizado, siendo los principales:

- Tubos al vacío simples
- Tubos de vacío de flujo directo
- Tubos de vacío de heat pipe

Para la mayoría de los colectores solares se tienen dimensiones características. En términos generales la unidad básica consiste de un colector plano de 1.8 a 2.1 m<sup>2</sup> de superficie, conectado a un termotanque de almacenamiento de 150 a 200 litros de capacidad; a este sistema frecuentemente se le añaden algunos dispositivos termostáticos de control a fin de evitar congelamiento y pérdidas de calor durante la noche. Las unidades domésticas funcionan mediante el mecanismo de termosifón, es decir, mediante la circulación que se establece en el

sistema debido a la diferencia de temperatura de las capas de líquido estratificados en el tanque de almacenamiento.

Las perspectivas globales de la energía solar son muy importantes. Determinadas aplicaciones como la calefacción y el calentamiento de agua, es ya muy competitiva con los energéticos tradicionales, así como la producción de electricidad mediante conversión fotovoltaica, y lo serán cada vez más en la medida de dichos combustibles, sean escasos y costosos.

Por último, debe señalarse la ventajosa aplicación de estos sistemas en asentamientos aislados, establecimientos rurales, lugares alejados, de acceso difícil para el suministro de combustibles tradicionales.

## CAPITULO 1 HISTORIA DE LOS COLECTORES SOLARES.

La energía solar ha llegado a la tierra durante millones de años, con una intensidad y una distribución espectral muy parecidas a las que ahora se registran. Este fue el origen de mayor parte de los fenómenos geofísicos que han conformado la corteza terrestre y la biosfera, con la consecuente evolución de las especies y formas de vida que, como el hombre, ahora pueblan el planeta.

El ser humano ha dedicado desde sus orígenes una parte importante de su actividad intelectual a entender la función del sol en su entorno, por lo que no es sorprendente que cuando la ciencia apenas nacía, el hombre colocaba al sol entre los objetos más importantes de su adoración, junto con fenómenos físicos también desconocidos como el viento y la lluvia.

La adoración al sol comprende y caracteriza una etapa importantísima en la evolución de la sociedad, lo que parece ocurrir en distintos momentos de la historia en todo el orbe. Las culturas prehispánicas no podrían ser una excepción, y es quizá esa participación la memoria fresca de este antecedente para entender de manera más fácil la identificación emocional de la importancia del sol en el entorno latinoamericano.

Aunque en general se asocia el interés por la explotación racional de la energía solar con la llamada crisis energética, que tanto afecta a las sociedades desarrolladas, la curiosidad científica por la naturaleza del sol, de la forma en que se relaciona con la Tierra tiene orígenes muy remotos; una, la teoría heliocéntrica, y la otra el aprovechamiento de la energía solar. En 270 a. C, Aristarco de Saros, astrónomo griego, sostenía que la Tierra giraba alrededor del sol, adelantándose 17 siglos a Copérnico. Quien anuncio su descubrimiento en 1505. Los trabajos de Aristarco fueron dados a conocer por Arquímedes en su libro "Arenarias", en el que cita la obra helio centrista del primero, titulada "*Sobre las dimensiones y distancias del sol y la luna*".

Pero el hombre parece ser renuente a aceptar avances revolucionarios en el entendimiento del sol; simplemente, en la era cristiana, Claudio Tolomeo, nacido en Egipto en el año 90 D.C, sostuvo que la tierra era el centro del universo y en torno a ella giraba el sol y las estrellas. Titulo su obra "*Almagesto*" con el pomposo nombre de "*Gran tratado de astronomía*", en la que apoyaba su teoría geocéntrica con cálculos, explicando que el cielo era esférico y que contenía a todos los astros, ubicando además, en su centro de giro a la tierra. La teoría resulto cómodamente aceptable por el individuo de entonces, y esa deducción fue obligatoria por espacio de 1,400 años.

No fue sino hasta los siglos XVI y XVII cuando renació la teoría heliocéntrica con Nicolás Copérnico, secundado por Tycho Brahe (1546-1601), Juan Kepler (1571-1630) y Galileo Galilei (1564.1642); por ello se les llama los cuatro grandes de la astronomía moderna.

Esos cuatro grandes hombres rescataron, fundamentaron y validaron el trabajo de Aristarco más por un sentimiento de responsabilidad científica que por una motivación utilitaria, ignorando el beneficio que podría tener el conocimiento de la energía del sol para la humanidad.

Respecto a aprovechar la energía solar, la historia tiene ejemplos de la explotación racional de esa energía desde los albores de la humanidad, aunque muchos de ellos se confunden con leyendas.

El empleo de la energía solar se remonta a Egipto, durante el reinado de Amenkhotep III (1455-1419 a.C), con las estatuas sonoras cuyo leve silbido era producto de la fuga del aire calentado por el sol. Otro curioso dispositivo de este tipo y con igual sistema fue el pájaro cantante, hecho de cerámica, que adornaba la tumba de Zari-Memmon, hijo de Amenkhotep, y le acompañaba en su soledad mortuoria.

A los egipcios se debe el efecto de invernadero, con lo que se podían alcanzar temperaturas de hasta 130° C.

La descripción de esos dispositivos provocó una discusión durante la Edad media, llevando a los hombres de ciencia a especular acerca de cómo la expansión del aire en los pedestales de las estatuas podían provocar dicho fenómeno.

Otro hecho que hizo ver a los hombres de ciencia que la luz solar ya se había entendido como una fuente poderosa de energía, aunque su aplicación quedaba circunscrita más bien a acciones muy limitadas o a juegos, fue el hallazgo de los pequeños lentes de aumento encontrados en Ninive, los cuales datan del siglo VII a.C y que se supone servían como pasatiempo para prender fuego.

Si las estatuas egipcias y ese pájaro mortuario despertaron la curiosidad del siglo XVII, más impactante fue el relato de cómo Arquímedes (287-212 a.C) contribuyó en el asedio a Siracusa, a repeler la flota romana comandada por Marcellus. Para ello utilizó espejos colocados a lo largo de las murallas del muelle, que incendiaron los barcos. Haber incidido los rayos solares en determinados puntos descontroló tanto a los soldados romanos, que al ver que sus naves eran quemadas por una inexplicable y misteriosa fuerza pensaron, aterrados, que luchaban contra dioses.

Después de Arquímedes, el empleo de la energía solar, según un relato de Ione Zonaras en el siglo XII acerca del imperio romano, se repitió con Proclus, que con gran número de espejos incendió la flota de Vitellius durante el sitio de Constantinopla. No se vuelve a encontrar evidencia de la energía solar sino hasta el siglo XVII con Athanasius Kircher (1601-1680), que realizó algunos experimentos incendiando pilas de madera a fin de probar si la historia de Arquímedes tenía validez científica. En 1615, Salomón de Caux publicó la

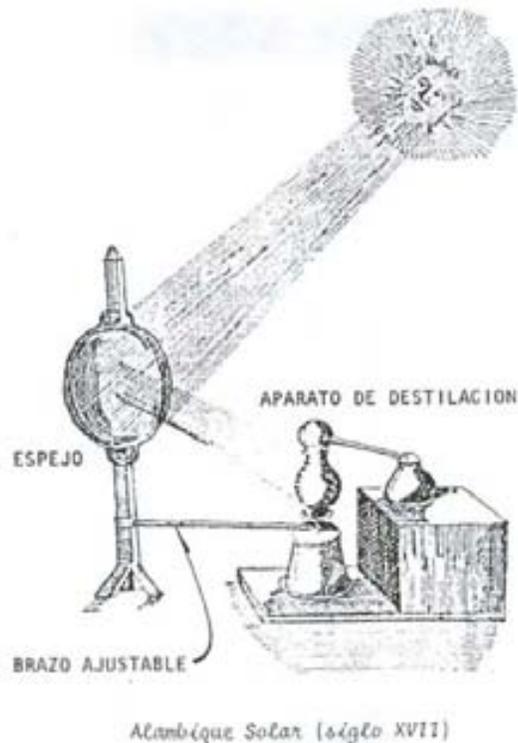
descripción de un aparato o motor a base de energía solar, que consistía en un conjunto de lentes de cristal, montados en una estructura que concentraba los rayos solares en una cámara de metal hermética, parcialmente cubierta de agua.

El aire, al calentarse con el sol se expandía, por lo que forzaba a salir el agua a través de los surtidores de una pequeña fuente.

Un empleo más práctico de energía solar fue desarrollado por Ehrenfried Von Tschirnhaus (1651-1700), miembro de la Academia Nacional Francesa de Ciencia, que utilizó lentes de 76 cm de diámetro para fundir materiales cerámicos. Uno de esos lentes fue hechura de Homber, médico del duque de Orleans. Un colega de él dio otro empleo a estos lentes, el de derretir fierro, cobre, estaño y mercurio mineral en bruto.

Se puede decir que el siglo XVII fue una centuria de inquietudes acerca de cómo aprovechar la energía solar; un ejemplo de ello fue un aparato que el escritor e ilustrador Athanasius Kircher describió con detalle: se trata de un destilador solar bastante sencillo pues consistía en un espejo cóncavo montado en un eje, que le permitía moverlo conforme la dirección del sol y reflejar los rayos a un depósito insolado podía subirse o bajarse de acuerdo con un brazo ajustable a fin de estar siempre dentro del haz del sol.

Esa inquietud por utilizar la energía solar se multiplicó en el siglo XVIII. Uno de sus principales exponentes fue George Louis Leclerc Bufón (1707-1788) que construyó el primero de los espectaculares hornos franceses de espejos múltiples. Consistió en 360 pequeños espejos colocados de tal manera que hacían incidir los rayos solares en un punto determinado. Otro experimento de Bufón fue su pequeño dispositivo de 140 espejos planos cuadrangulares, con el que incendió en los jardines reales en 1747 una pila de madera a una distancia de 60 m; así validó ante la corte francesa la hazaña de Arquímedes.



El primer experimento relativo a hornos solares destinados a la cocción de alimentos fue descrito por Nicolás de Saussure (1740-1799). Se trataba de una serie de cristales espaciados sobre una superficie ennegrecida, encerrada en una caja que había sido aislada, con lo cual se alcanzaba una temperatura de 88° C, pero si se añadían a la superficie de cristal una cubierta negra, entonces la temperatura subía hasta los 160° C. Saussure también desarrolló a fines del siglo XVIII varias máquinas solares basadas en el efecto invernadero. No fue, sin embargo, hasta un siglo después cuando empezaron a difundirse sencillos dispositivos basados en ese efecto para calentar agua para usos domésticos.

Antoine Lavoisier (1743-1794) trabajó también con hornos solares, ya que trataba de encontrar una nueva fuente de energía. Su dispositivo estaba hecho de dos vidrios curvados, montados de tal manera que formaran dos lentes convexas cuyo espacio fue llenado con alcohol. Los lentes líquidos tenían un diámetro de 130 cm.

Como el poder de refracción de esos lentes fue insuficiente para obtener altas temperaturas en el foco, se colocaron pequeños lentes cerca de este a fin de reducir la longitud focal, con lo cual fue posible fundir platino a una temperatura de 1760° C.

En 1747, Jaques Cassini, del observatorio de Paris, construyó un espejo de 112 cm de diámetro, el cual fue presentado a Luis XV. Con dicho lente se alcanzaron temperaturas de los 1000° C, lo que hizo posible en una demostración fundir una varilla de fierro en pocos segundos, y derretir plata a un estado líquido tal que se formaron hilos rizados de este metal al caer en agua helada.

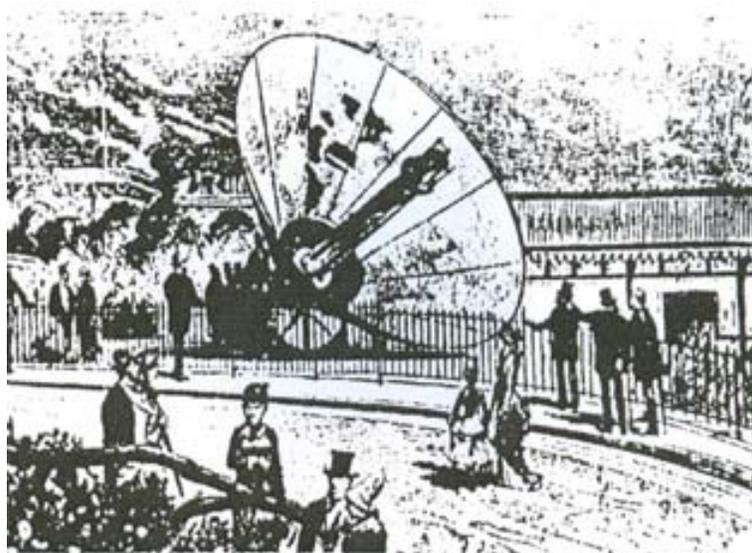
El siglo XIX fue escenario de intentos cada vez más refinados y novedosos; al respecto, el astrónomo John Herschel construyó un simple aparato solar que utilizó en su expedición al cabo de Buena Esperanza, en 1837. Era una simple caja negra enterrada en arena a fin de aislarla, cubierta con una doble capa de vidrio que permitía la entrada de los rayos solares y evitaba que el calor escapara. Alcanza temperaturas de los 116° C y fue utilizado durante toda la expedición para la preparación de alimentos.

Otro horno fue construido por Henry Bessemer (1813-1898). Era de 305 cm de diámetro, y contenía muchos pequeños espejos planos; lo utilizó para fundir metales, y aunque logro buenos resultados con el zinc y con el cobre pronto perdió interés.

Los primeros experimentos en los que la energía solar fue utilizada para proveer calor dentro de una cápsula al vacío fueron llevados a cabo por Stock y Heynemann, en Alemania. Su horno tenía lentes de 76 cm de diámetro y una longitud focal de 50 cm. El bulbo, sin que se calentara, transmitía la energía solar a un espécimen apoyado en un crisol de magnesio. Piezas de sílice, fierro y manganeso fueron sucesivamente fundidas.

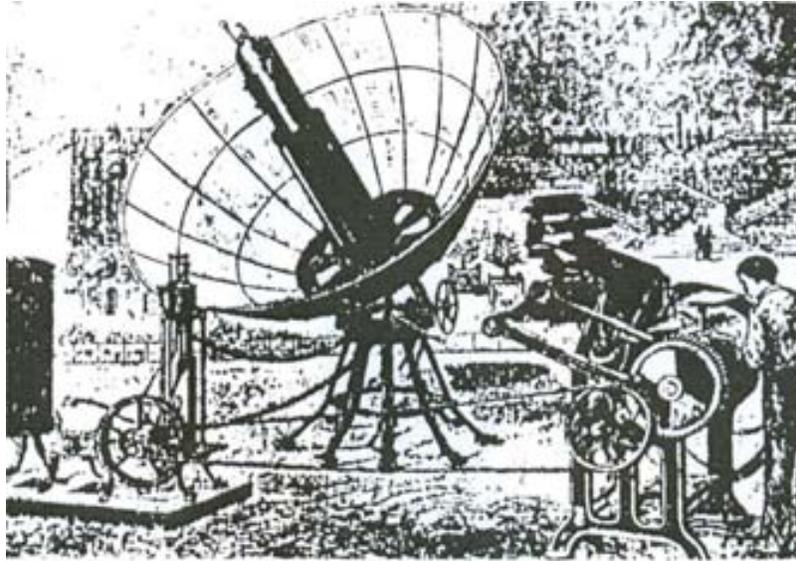
Los intentos de obtener otras formas de energía giraron alrededor de los investigadores que pensaron utilizar máquinas operadas con vapor a fin de encontrar la manera de transformar la energía solar en mecánica. August Mouchot fue el pionero de los constructores de los aparatos que emplearon energía solar para generar vapor y aprovecharlo. Al respecto Mouchot dio un notable avance al diseño de colectores solares, habiendo creado un reflector en forma de cono truncado.

El cono de Mouchot se conoció como oxicon. Consistía en placas de metal plateado; tenía un diámetro de 540 cm, un área de captación de 18.6 m<sup>2</sup> y un peso de 1400 kg. Se aseguraba que podía captar 87 % del calor solar, y producir vapor a 3.5 atm., con lo cual se podía obtener definitivamente fuerza motriz.



*Primer gran colector solar tipo oxicon que exhibió Mouchot en 1878*

Abel Pifre, contemporáneo de Mouchot, desarrolló un colector solar de reflectores parabólicos a base de pequeños espejos; era muy parecido al cono truncado de Mouchot. Lo presentó en la exposición de París, en 1878, haciendo operar una prensa para imprenta mediante energía solar.



*Colector solar de Abel Pifre (1878)*

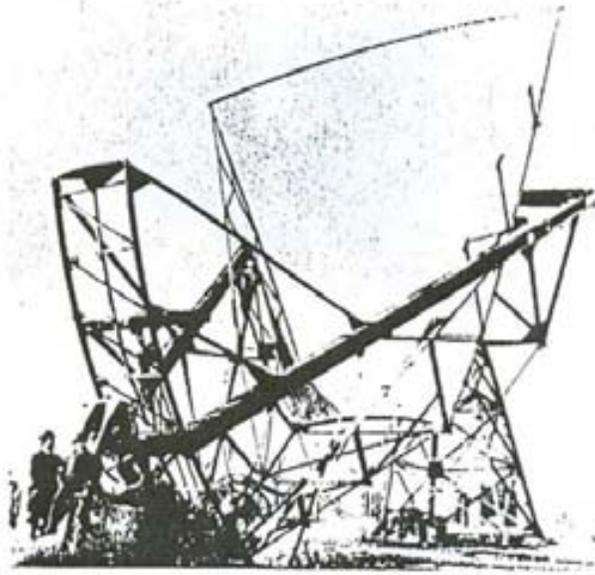
Ese mismo año se puso en funciones el primer refrigerador de absorción con un sistema solar como fuente calorífica. El entusiasmo por las máquinas de energía solar nunca se detuvo en esta centuria. John Ericsson invento su máquina Ericsson de ciclo de aire caliente, que convertía al calor solar en fuerza motriz mediante un colector parabólico.

Otro intento de que a través de un sistema de espejos, más una caldera se llegaría a convertir la energía solar en fuerza mecánica se debe a Weston, en 1888.

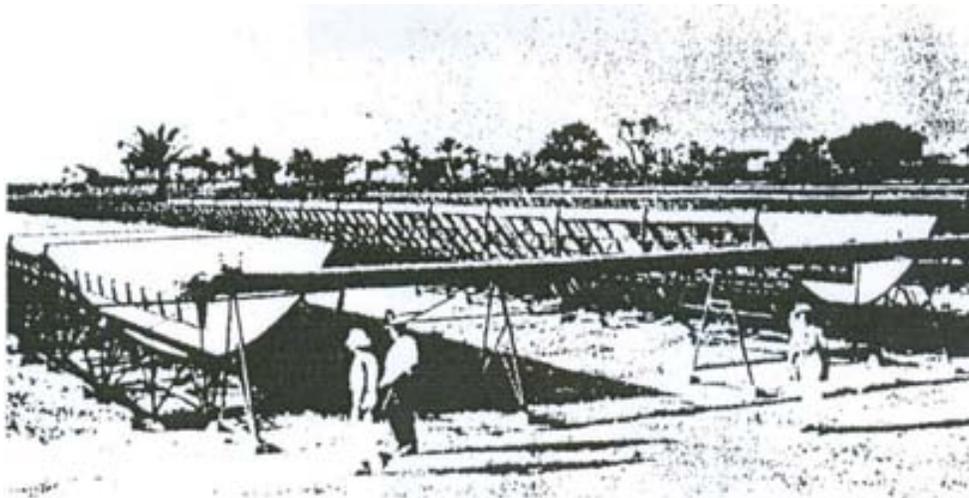


*Máquina Ericsson de ciclo de aire caliente (1882)*

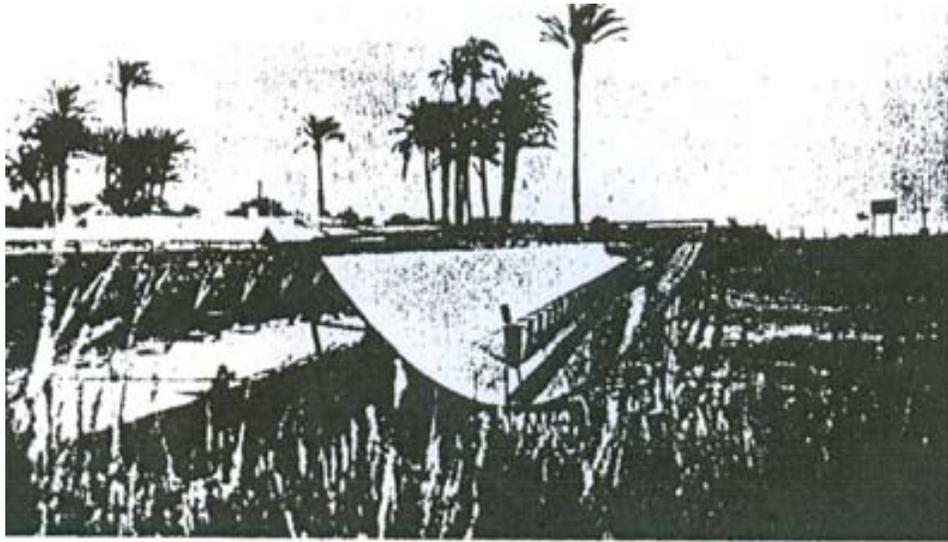
Ya en los albores del siglo XX, Schumann operaba una bomba de 60 CV cerca de El Cairo, que extraía agua del río Nilo. En esa época, el padre Himilaya, portugués arraigado en Estados Unidos, accionaba un espejo parabólico de 80 m<sup>2</sup> formado por 6000 elementos, alcanzando temperaturas cercanas a los 4000° C.



*Horno solar construido por Himilaya para fundición de metales (1904)*



*Vista sur del sistema de colectores solares Shuman-Boys (Meadí, Egipto, 1913)*



*Vista parcial norte de los mismos colectores  
(Meadí, Egipto, 1913)*

Los primeros colectores planos comerciales procedían de una patente realizada por el estadounidense Clarence L. Kemp en 1889. Se denominaba climax y en el año de 1900 ya había instalado más de 1,600 sistemas de este tipo en California. Nueve años más tarde, William J. Bailey empezó a vender unos revolucionarios sistemas solares que suministraban agua caliente las 24 horas del día aunque el día estuviera nublado. Lo conseguía separando el sistema de captación del de almacenamiento. Era el nacimiento de la tecnología que hoy se ha generalizado para el calentamiento del agua a partir del sol. A finales de la primera guerra mundial, Bailey había instalado más de 4,000 sistemas, bajo la marca comercial Day and Night (día y noche).

En 1938 un equipo de ingenieros de Massachusetts Institute of Technology (MIT) diseñaron y construyeron una vivienda con colectores solares en el tejado, que almacenaba la energía del sol en forma de agua caliente en un depósito subterráneo de 65,000 litros, situado en el subsuelo de la misma. La segunda guerra mundial interrumpió este trabajo, si bien uno de los miembros del equipo, el ingeniero George Löf, continuó con las investigaciones y desarrolló un sistema

de aprovechamiento de la energía solar mediante colectores solares planos de aire situados en el tejado de un edificio. Finalizada la guerra, el equipo del MIT volvió sobre la vivienda con colectores solares e introdujeron algunas modificaciones: dotarla de una fuente de energía auxiliar y equiparla con grandes ventanales en su fachada sur. Durante dos años fue ocupada por una familia y monitorizada completamente. El resultado fue espectacular: casi tres cuartas partes de las necesidades de calefacción fueron cubiertas mediante la energía solar.

Así que estamos ante una tecnología con un largo historial tras sí, si bien se ha tenido que esperar a los albores del siglo XXI y a la crisis energética que nos acompaña para replantearnos el gran papel que puede jugar esta fuente de energía en nuestras vidas.

Esos acontecimientos marcan el inicio de una interrupción de medio siglo en los avances de la ingeniería solar, propiciada por el advenimiento del petróleo, sustancia petroquímica. Con la fácil industrialización y comercialización de los derivados petrolíferos sobrevino un orden económico internacional que favoreció la fácil y rápida concentración de la riqueza, y con ella, de la tecnología suficiente para cambiar dramáticamente la distribución global del poder político, económico y social. Ocurrieron además dos guerras mundiales, que culminaron con el advenimiento de la bomba atómica, producto de la más avanzada tecnología mundial.

Los años recientes acusan un resurgimiento del interés por la energía solar, aunque los científicos solares de la primera mitad del siglo XX fueron tan escasos y oscuros como los de la Edad Media.

## CAPITULO 2 FUNDAMENTOS

### 2.1 El Sol.

El Sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares. La energía irradiada por el Sol procede de la fusión de átomos de deuterio para dar átomos de helio. El astro irradia en un segundo más energía que la consumida por la humanidad en toda su historia. Una parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. La tierra recibe en el exterior de su atmósfera una potencia total de  $1.73 \cdot 10^{14}$  kW. Bajo la perspectiva humana, la fuente energética solar puede considerarse como inagotable.

#### 2.1.1. Características físicas.

El Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, de 1, 390, 000 kilómetros de diámetro y situado a una distancia media de 150 millones de Kilómetros de la Tierra, unos 8 minutos de viaje a la velocidad de la luz (fig. II.1). Para un observador terrestre el disco solar subtende un ángulo de aproximadamente 32 minutos ( $0.53^\circ$ ). Visto desde la Tierra el Sol rota alrededor de su eje una vez cada cuatro semanas. La edad estimada de la estrella es de 5 mil millones de años, restándole otros 8 mil millones de años más de vida.

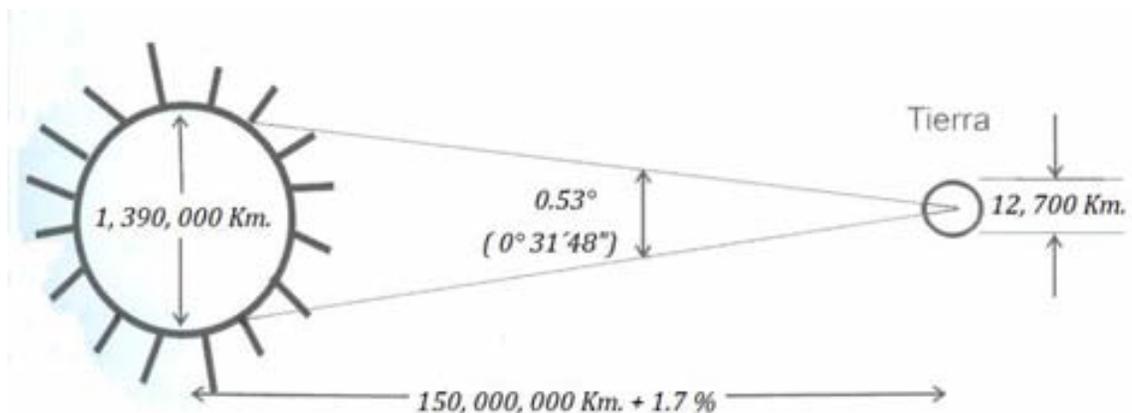


Figura II.1 Relación de tamaños y distancia Tierra-Sol.

El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro. Este corresponde a tan solo el 15% del volumen pero contiene el 40% de la masa y genera el 90% de la energía. En esta región la temperatura es del orden de  $10^7$  °K y la densidad de  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>. A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura es de unos  $10^5$  °K y la densidad  $70$  kg/m<sup>3</sup>. La zona que comprende desde el 70% al 100% del radio solar, se conoce como una zona convectiva y su temperatura cae hasta valores entre 5000 y 6000 °K, mientras que la densidad desciende a  $10^5$  kg/m<sup>3</sup>.

La capa externa de esta región recibe el nombre de fotosfera y es considerada como la superficie del Sol, por ser ésta una región opaca, desde donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio. La fotosfera es la superficie aparente del Sol cuando se observa con un filtro adecuado, sin embargo como todo el Sol desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida, como la hay en la Tierra. Sobre la fotosfera existen también gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, constituyen la corona solar, observable durante los eclipses totales de Sol. La corona solar es la atmósfera del Sol. De forma similar a como sucede en la atmósfera terrestre, la corona es cada vez más tenue a medida que se está a mayor distancia del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

### **2.1.2 Distribución espectral de la radiación solar.**

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada **radiación térmica** que incluye sólo la ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR).

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida:

1. La intensidad de la emisión es mayor, refiriéndose a, un mayor número de watts por metro cuadrado abandonan el cuerpo.
2. El **color** o tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda, esto es, del IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

Pero debido al efecto de la fotosfera, que se encuentra próxima a los 6000 °K, el flujo de energía emitido por el Sol corresponde al de un cuerpo a esa temperatura. La figura II.2 demuestra la energía emitida por un *cuerpo negro* a 6000 °K en las diferentes longitudes de onda.

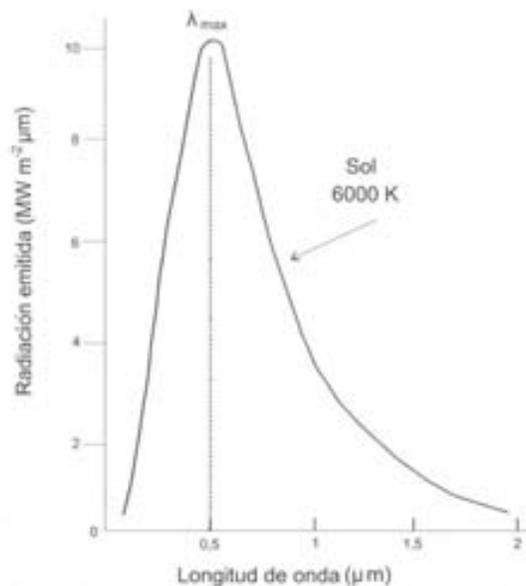


Figura II.2 Distribución espectral de la energía emitida por un cuerpo negro a 6000 K.

Esta distribución espectral hace que se considere que la radiación solar, o de onda corta, procedentes del Sol tiene longitudes entre 0,3 μm (micras, una micra equivale a una milésima de milímetro) y 4 μm, aun cuando se reciben pequeñas cantidades de energía en otras zonas del espectro correspondiente a los rayos gamma y rayos X. Aumentando la longitud de onda a medida que la temperatura desciende al alejarnos del núcleo solar.

El máximo de emisión de un cuerpo negro se desplaza hacia longitudes de onda mayores a medida que disminuye su temperatura.

Las ondas electromagnéticas que transportan mayor cantidad de energía proveniente del Sol tienen una longitud de onda aproximada de  $0.55 \mu\text{m}$ . Es por ello que casi la mitad de la energía solar que recibimos se encuentra en la región visible del espectro.

## 2.2 Efecto atmosférico sobre la radiación solar.

La distribución temporal de la energía solar que alcanza la superficie es muy irregular. No solamente varía la insolación máxima diaria (horas en las que el Sol está por encima del horizonte del lugar) sino que la radiación solar es más o menos atenuada según la composición instantánea de la atmósfera que atraviesa.

En término medio sólo el 47% de la radiación incidente sobre la atmósfera terrestre alcanza la superficie del planeta. El 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser dispersada por polvo en suspensión, vapor de agua y moléculas de aire. La energía restante, un 53% es reflejada hacia el espacio exterior o absorbida en la atmósfera.

### 2.2.1. Irradiancia y constante solar.

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como **irradiancia** ( $I_s$ ) y se expresa en  $\text{W m}^2$ . Para una distancia media Tierra-Sol el valor de la irradiancia en un plano exterior a la atmósfera y perpendicular a los rayos del Sol se conoce como **constante solar**. El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es de  $1.353 \text{ Wm}^2$  ( $\pm 1.6\%$ ). Un estudio detallado del espectro revela que un 5% de la energía correspondiente al intervalo de longitudes de onda inferiores a  $0.38 \mu\text{m}$ , un 49% a longitudes de onda en el visible, entre  $0.38$  y  $0.78 \mu\text{m}$  y el 46% restante a longitudes de onda superiores a los  $0.78 \mu\text{m}$  (figura II.6).

### 2.2.2. Componentes de la radiación en la superficie.

La atmósfera terrestre está constituida por gases, nubes y partículas sólidas en suspensión. Los diversos constituyentes de la atmósfera provocan la atenuación de la radiación. A medida que la radiación solar atraviesa la masa de aire sufre procesos de absorción, reflexión y refracción. En referencia a la absorción: los rayos X y otras radiaciones de onda corta del espectro solar son absorbidos en la ionosfera por el  $N_2$  y  $O_2$ ; la mayor parte de la radiación ultravioleta sufre el efecto del  $O_3$  y para longitudes de onda superiores a  $2.5 \mu m$  se produce una fuerte absorción por el  $CO_2$  y el  $H_2O$ .

La irradiancia se atenúa disminuyendo su valor respecto al dado en la cima de la atmósfera. En las condiciones más óptimas en cuanto a la transmisión atmosférica la atenuación de la radiación hasta la superficie es de un 25%. Por ello una irradiancia de  $1000 Wm^2$  se utiliza como valor estándar de referencia en la ingeniería relacionada con la energía solar. A consecuencia de la interacción de la radiación solar con la atmósfera la energía que llega a la superficie tiene diferentes componentes nombradas como la **radiación directa** –no ha sufrido ninguno de los citados fenómenos y llega a la superficie en la dirección del disco solar- y **radiación difusa** –procede del resto de direcciones de la bóveda celeste (fig. II.3). A las componentes directa y difusa hay que añadir que un captador inclinado también puede recibir radiación previamente **reflejada** en el suelo. El conjunto de radiaciones que alcanza la superficie es la **radiación global**.

El tanto por ciento de la energía solar que se refleja en una superficie respecto al total incidente, llamado reflectividad, depende de la longitud de onda de la radiación y de la naturaleza de la superficie. Las diferentes reflectividades en función de la longitud de onda dan lugar a la signatura espectral de la superficie.

La reflectividad global considerando todo el espectro de radiación solar se conoce como albedo de la superficie (tabla 1.1).

TABLA 1.1  
Albedo de diferentes superficies

Nieve virgen	0,95
Agua (ángulos de incidencia grandes)	0,07
Suelos (arcillas)	0,14
Bosques de coníferas	0,07
Hojas muertas	0,30
Hierba seca	0,20
Hierba verde	0,26
Gravas	0,13
Paredes oscuras (ladrillo rojo)	0,27
Paredes claras (pinturas luminosas)	0,60

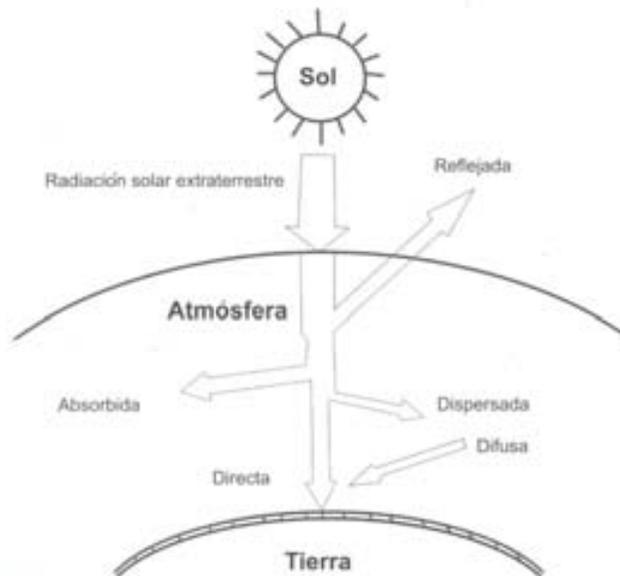


Figura 11.3 Atenuación de la radiación por la atmósfera.

El porcentaje en la radiación global de una u otra componente depende de las condiciones meteorológicas. Cuando más nublado es el día más importante es la radiación difusa y por el contrario en días despejados la componente directa representa el porcentaje mayoritario.

Un parámetro importante relacionado con la componente directa y difusa de la radiación es el índice de claridad que se define como el porcentaje de irradiancia global en superficie respecto a la que se alcanza la cima de la atmósfera en el plano horizontal. El índice de claridad tanto diario como mensual ha resultado de gran utilidad en la ingeniería solar.

### 2.2.3. Masa aire.

Un concepto que caracteriza el efecto de una atmósfera clara sobre la radiación solar es la masa aire, relacionado con la longitud de la trayectoria recorrida por la radiación directa hasta alcanzar la superficie. En un día claro al nivel del mar y con el Sol situado en el cenit se tiene una masa de aire de 1, abreviadamente AM1. En otros instantes la masa de aire es  $1/\cos(\theta_z)$ , siendo  $\theta_z$  el ángulo que forma la radiación directa del Sol con la vertical del lugar (figura II.4).

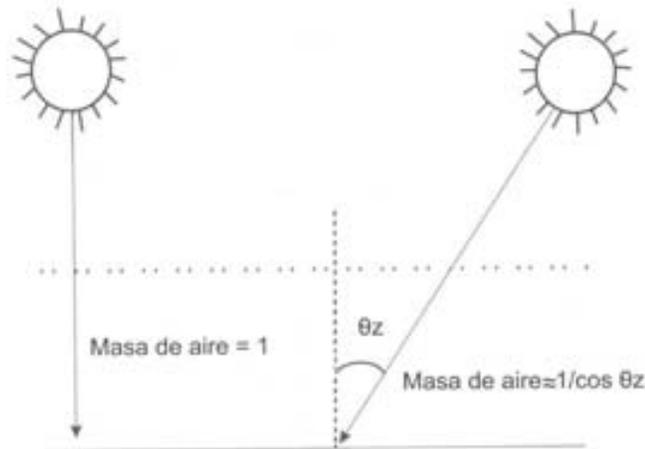


Figura II.4 Definición del concepto Masa de aire.

Si la presión  $p$  del medio es diferente a los 101.300 Pa que corresponden a la presión atmosférica estándar se multiplica la masa atmosférica obtenida por  $p/101.300$ .

El efecto atmosférico expresado por la masa de aire ha llevado a definir el espectro AM0, que refiere las condiciones en el exterior de la atmósfera, importante para las aplicaciones fotovoltaicas en los satélites (figura II.5).

La figura II.6 muestra un resumen del efecto atmosférico sobre la distribución espectral de la energía solar recibida en el exterior y en superficie refiriéndose a la distribución AM1.5.

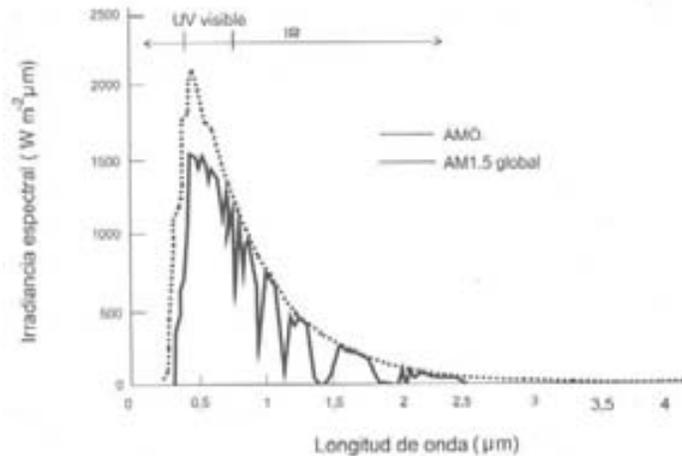


Figura II.5 Distribución espectral de la radiación solar.

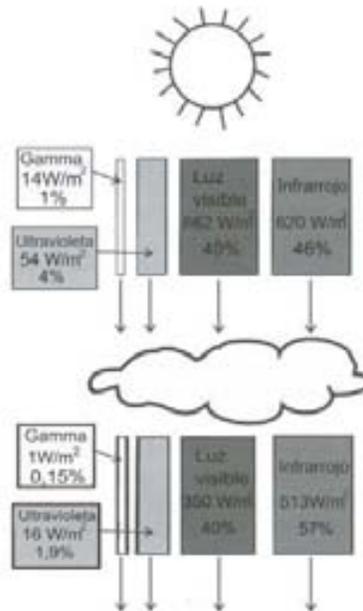


Figura II.6 Radiación solar exterior a la atmósfera y en superficie según región del espectro.

#### 2.2.4. Medida de la radiación solar.

La irradiación ( $H_s$ ) corresponde al valor acumulado de la irradiancia en un intervalo de tiempo determinado. Esta es la magnitud de mayor interés para la ingeniería solar. Las redes de estaciones meteorológicas automática miden la irradiancia, el valor instantáneo de la energía solar que alcanza la superficie, que es almacenada, filtrada y puesta a disposición de los usuarios como irradiación en base horaria, diaria o mensual.

Para muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector.

Existen varios métodos para medir la radiación solar, ya sea en forma de irradiancia o de irradiación. El método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro.

Un **piranómetro**, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal.

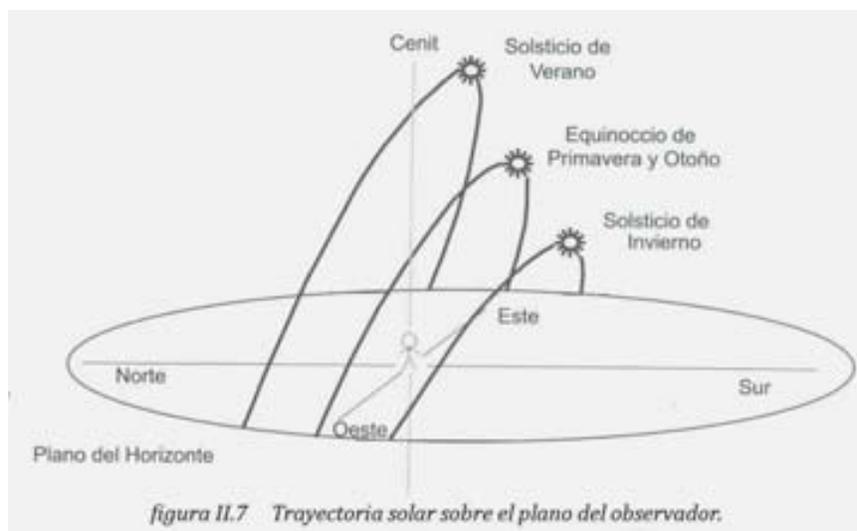
El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecido y el otro, protegido de la radiación. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos. La hipótesis de trabajo de un piranómetro, es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores. Para evitar ruido en las lecturas, causado por el viento y otros factores meteorológicos, el sensor expuesto a la radiación (y a veces también el otro) suelen estar protegidos por un hemisferio de vidrio. Este hemisferio, de características ópticas adecuadas, permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento por viento, lo cual alteraría la lectura.

Es posible utilizar piranómetros para medir radiación directa y difusa por separado, de la siguiente forma. Se requieren dos piranómetros. Uno de ellos se instala horizontalmente y mide radiación global. Al otro se le coloca una "sombra" que consiste en una banda o un disco para obstruir la radiación directa. Entonces, este piranómetro medirá sólo radiación difusa. La resta de la global menos la difusa, da como resultado la directa.

Otro instrumento para medir radiación solar es el piroheliómetro. El **piroheliómetro** es un instrumento que se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos. Es decir, es un instrumento que mide radiación directa. A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir el Sol con gran precisión.

### 2.3 Geometría del movimiento del Sol.

Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie de la tierra, el Sol parece describir un arco de círculo desde su salida (orto) hasta su puesta (ocaso) (figura II.7). A mitad de este recorrido, al medio día solar, se sitúa por definición el plano meridiano local. La vertical del observador sobre la superficie terrestre intersecta a la *bóveda celeste* en un punto llamado *cénit*. El eje de la Tierra forma un ángulo igual a la latitud del lugar ( $\varnothing$ ) con el plano del horizonte del observador.



La posición del sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas centradas en el observador según el sistema de referencia escogido: *horarias* ( $\delta_s$  *declinación*,  $\omega_s$  *ángulo horario*) y *horizontales* ( $h_s$  *altura solar*,  $a_s$  *acimut*). Estas coordenadas determinan el vector solar entendido como un vector con origen en el observador y extremo en el Sol.

A. Coordenadas horarias (figura II.8)

$\delta_s$ , declinación solar ( $^\circ$ ): posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador terrestre.

$\omega_s$  ángulo horario solar ( $^\circ$ ): desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo horario del mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol, cada hora es igual a  $15^\circ$ .

B. Coordenadas horizontales (figura II.9)

$h_s$  altura solar ( $^\circ$ ): ángulo que forma la radiación solar directa y el plano horizontal. El ángulo complementario es llamado ángulo cenital solar.

$a_s$  azimut solar ( $^\circ$ ): ángulo que forma la radiación solar directa y el meridiano del observador. Se toma como origen de azimuts el mediodía solar y valores crecientes en sentido horario observando el norte desde el sur del lugar (en el hemisferio norte).

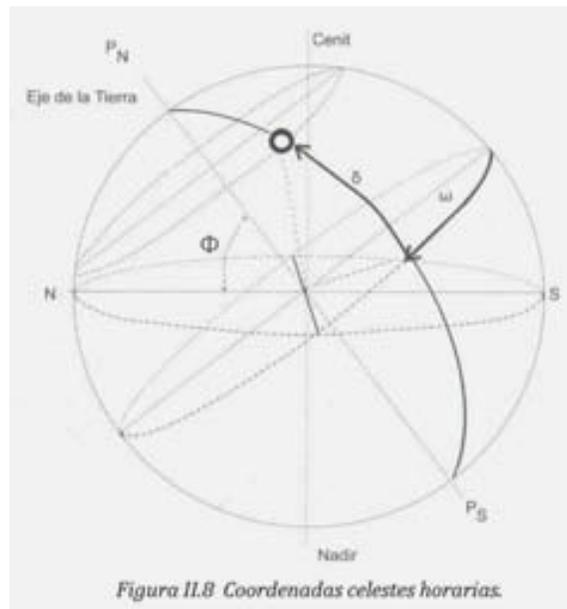
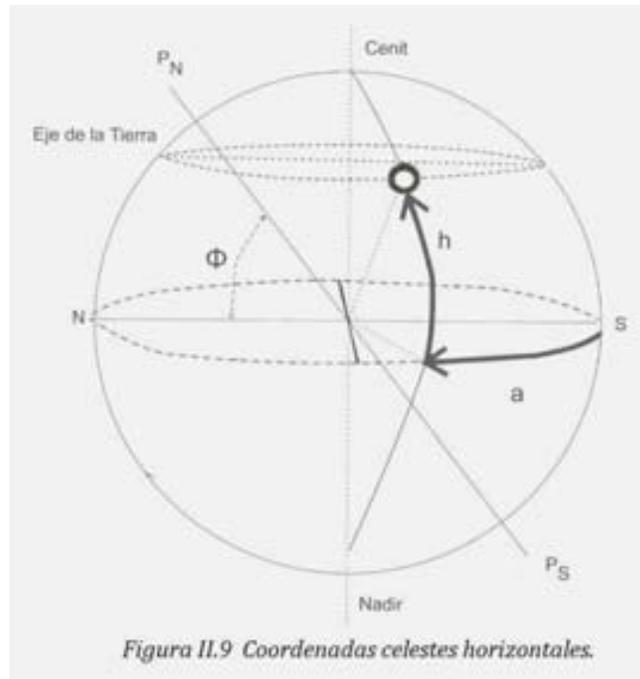


Figura II.8 Coordenadas celestes horarias.



### 2.3.1 Cálculo de las coordenadas horarias.

Las coordenadas horizontales del Sol, azimut y altura solar varían dependiendo de la hora del día, el día del año y la latitud del lugar. Por el contrario, las coordenadas horarias son más fáciles de obtener, la declinación sólo depende del día del año y el ángulo horario de la hora. Se determinan las coordenadas horarias como paso previo para el cálculo de las horizontales.

La mayoría de los cálculos solares requieren la hora solar pero nuestros relojes indican la hora local. Para establecer husos horarios se ha convenido en fijar una misma hora civil en ciudades de diferente hora solar. La hora solar se calcula a partir de:

$$\text{hora solar} = \text{hora solar local} + 4 (\text{min}/^\circ)(L_{\text{Ref}} - L_{\text{loc}}) + \Delta t \quad (1.1)$$

donde  $L_{\text{Ref}}$  es la longitud geográfica del meridiano de referencia ( $^\circ$ ) y  $L_{\text{loc}}$  la longitud del meridiano local ( $^\circ$ ).

Una segunda corrección es necesaria debido a que el Sol se adelanta y retrasa respecto a la hora solar media. Esta corrección se conoce como ecuación de tiempo:

$$\Delta t \text{ (min)} = 9.87 \text{ sen}^2 B - 7.53 \cos B - 1.5 \text{ sen } B \quad (1.2)$$

Siendo  $B(^{\circ}) = \left(\frac{360(N-81)}{364}\right)$  y siendo N el día del año.

La ecuación de tiempo también puede leerse gráficamente (figura II.10).

Conocida la hora solar se calcula el ángulo horario recordando que el origen de coordenadas se encuentra en el meridiano local y que una hora solar corresponde a  $15^{\circ}$ :

$$\omega_s = \frac{(\text{hora solar} - 12)}{15^{\circ}} \quad (1.3)$$

El ángulo horario resulta negativo por las mañanas y positivo por las tardes. Por otra parte, la declinación del Sol depende del día del año según la expresión.

$$\delta_s = 23.45^{\circ} \text{ sen} \left( 360 \frac{284 + N}{365} \right) \quad (1.4)$$

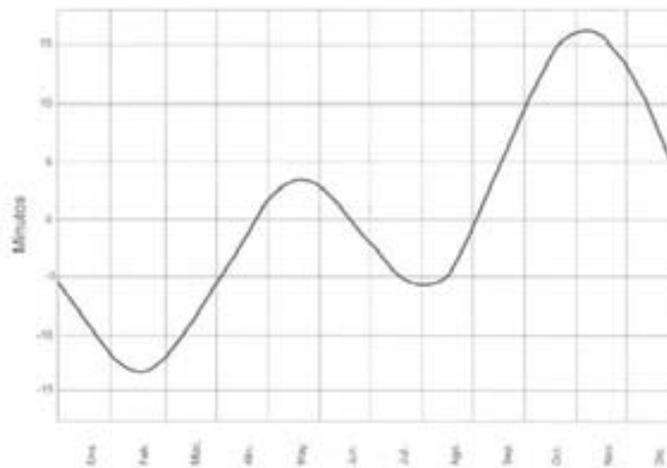


Figura II.10 Ecuación de tiempo.

### 2.3.2 Cálculo de las coordenadas horizontales.

Utilizando trigonometría esférica calculamos las coordenadas horizontales a partir de las coordenadas horarias, relacionadas mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{sen}(h_s) &= \text{sen } \phi \text{ sen } \delta_s + \cos \phi \cos \delta_s \cos \omega_s \\ \text{sen}(h_s) \cos(a_s) &= \text{sen } \phi \cos \delta_s + \cos \omega_s - \cos \phi \text{ sen } \delta_s \\ \text{sen}(h_s) \text{ sen}(a_s) &= \cos \phi \text{ sen } \omega_s \end{aligned} \quad (1.5)$$

Donde  $\phi$  es la latitud del lugar.

A partir de estas ecuaciones se puede obtener la altura solar máxima para un día y latitud determinados. Al mediodía el ángulo horario y el ángulo acimutal del Sol son cero,  $\omega_s = 0^\circ$  y  $a_s = 0^\circ$ , correspondiendo a la altura máxima ( $h_{sm\acute{a}x}$ ). Incorporando estos valores en la segunda de las ecuaciones (1.5) resulta:

$$h_{sm\acute{a}x} = 90^\circ - \phi + \delta_s \quad (1.6)$$

#### Ejemplo.

Calcule la altura y el azimut del Sol el 1 de octubre a las 10 horas en la ciudad de Chiquimula (Guatemala) ( $89^\circ 32' 48''$  W,  $14^\circ 47' 05''$  N). Determine también la altura solar máxima de ese mismo día.

#### Solución.

Cálculo de la declinación: el 1 de octubre corresponde al día del año  $N = 274$ , y sustituyendo en la ecuación (1.4):

$$\delta_s = 23.45^\circ \text{sen} \left( 360 \frac{284 + 274}{365} \right) = -4.21^\circ$$

Calculando el ángulo horario, según las ecuaciones (1.1, 1.2, 1.3)

$$B = 190.9^\circ \Rightarrow \Delta t = 7.46 \text{ min}$$

$$\text{hora solar} = 10 \text{ h} + 4 (\text{min}/^\circ)(90^\circ - 89.55^\circ) + 7.46 \text{ min} = 10.15 \text{ h}$$

A partir de las coordenadas horarias haciendo uso de las ecuaciones (1.5) se obtienen las coordenadas horizontales:

$$\text{sen}(h_s) = \text{sen}(14.78^\circ)\text{sen}(-4.21^\circ) + \cos(14.78^\circ) \cos(-4.21^\circ) \cos(-27.85^\circ)$$

Esto implica que la altura solar  $h_s = 56.50^\circ$

$$\cos(56.50^\circ) \text{sen}(a_s) = (-4.21) \text{sen}(-27.85^\circ)$$

Y el azimut solar  $a_s = -57.57^\circ$

La altura solar máxima se obtiene considerando  $\omega_s = 0^\circ$  o haciendo uso directamente de la ecuación (1.6):

$$h_{sm\acute{a}x} = 90^\circ - 14.78^\circ - 4.21^\circ = 71.01^\circ$$

### 2.3.3 Diagramas de trayectoria solar.

La proyección de la trayectoria solar en la bóveda celeste sobre un plano horizontal es conocida como *diagramas de la trayectoria solar*. Como ya se ha mencionado los ángulos  $(h_s, a_s)$  dependen del ángulo horario, la declinación y la latitud. En un diagrama bidimensional sólo se puede representar una variable frente a otra. Habitualmente se realizan representaciones en diferentes fechas del año de las trayectorias para una latitud determinada. Estos gráficos permiten una lectura directa en aquel lugar de altura y azimut en la hora y día de interés. En el caso de la figura II.11 cada latitud de la tierra se caracteriza por un grupo de trayectorias solares tomadas el día 21 de cada mes, a lo largo del año.



## 2.4 Irradiación extraterrestre horizontal.

La relación trigonométrica existente entre las coordenadas horarias y horizontales del Sol permite desarrollar una serie de cálculos de interés para la ingeniería solar

### 2.4.1 Insolación máxima.

El intervalo de tiempo transcurrido entre la salida y la puesta del Sol, define el máximo tiempo de radiación solar directa posible o *insolación máxima*. La insolación máxima naturalmente depende de la localidad estudiada y del día del año. Imponiendo que en el instante de salida y puesta del Sol la altura solar es nula,  $h_s = 0^\circ$ .

$$n_{s,m\acute{a}x} = \frac{2\omega_{s,p}}{15^\circ} = \frac{2 \operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta_s)}{15^\circ} \quad (1.7)$$

Donde  $\omega_{s,p}$  es el ángulo horario en la puesta del Sol ( $^\circ$ ) y  $n_{s,m\acute{a}x}$  el número de horas máximas con radiación solar directa.

### Ejemplo.

Calcule la insolación máxima el 1 de octubre en la ciudad de Chiquimula (Guatemala) ( $89^\circ 32' 48''$  W,  $14^\circ 47' 05''$  N).

### Solución.

$$n_{s,m\acute{a}x} = \frac{2\omega_{s,p}}{15^\circ} = \frac{2 \operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg} (14.78^\circ) \operatorname{tg} (-4.21^\circ))}{15^\circ} = 11.85 = 11 \text{ h } 51 \text{ min}$$

### 2.4.2 Irradiación extraterrestre en el plano horizontal.

Para evaluar la irradiación diaria en un plano horizontal en superficie es necesario evaluar primero la *irradiación extraterrestre*, entendida como la irradiancia que incide a lo largo de un día sobre un plano tangente a la superficie del planeta exterior a la atmósfera. Se ha definido la Constante solar como la irradiancia que llega al plano perpendicular al Sol en el exterior de la atmósfera. Debido al movimiento del Sol el ángulo que forman los rayos con un plano tangente es siempre menor o igual a la Constante solar. La relación entre la Constante solar y la irradiancia en el exterior de la atmósfera sobre un plano horizontal ( $I_{s0}^e$ ) se expresa matemáticamente por:

$$\begin{aligned} I_{s0}^e &= S_s F_{TS} \cos(\theta_z) = S_s F_{TS} \text{sen } h_s \\ &= S_s F_{TS} (\text{sen } \phi \text{ sen } \delta_s + \cos \phi \cos \delta_s \cos \omega_s) \end{aligned} \quad (1.8)$$

El factor  $F_{TS}$  resulta del movimiento de la Tierra alrededor del Sol en una órbita elíptica, esto hace que la distancia Tierra-Sol varíe a lo largo del año. La irradiancia que llega a la cima de la atmósfera depende de esta distancia. Este factor se evalúa fácilmente a partir del día del año, N:

$$F_{TS} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360 N}{365}\right) \quad (1.9)$$

La irradiancia en la cima de la atmósfera en un día determinado se obtiene integrando la expresión anterior para las 24 horas ( $H_{s0}^e$ ). El resultado de esta integral es:

$$H_{s0}^e = \frac{24}{\pi} S_s F_{TS} (\omega_{s,p} \text{ sen } \phi \text{ sen } \delta_s + \cos \phi \cos \delta_s \text{ sen } \omega_{s,p}) \quad (1.10)$$

Donde  $\omega_{s,p}$ , se expresa en radianes.

### 2.4.3 Irradiancia en un captador.

Las medidas de irradiancia directa y difusa disponibles en algunas estaciones meteorológicas se realizan en el plano horizontal. El paso de estas medidas al plano inclinado del captador requiere de modelos para la radiación difusa y la reflejada en los alrededores del captador. En este apartado se presentan relaciones que permiten calcular las componentes de la irradiancia para cualquier inclinación y orientación del captador.

### 2.4.4 Ángulo de incidencia.

La orientación del plano de un captador se determina a partir de las coordenadas del vector director, perpendicular a él. Este vector queda definido por el ángulo cenital que coincide con la inclinación del plano ( $\beta_c$ ) respecto a la horizontal y el ángulo azimutal ( $a_c$ ) (figura II.13). Se define el ángulo de incidencia como el ángulo que forma la radiación solar directa con el vector director en el plano.

De forma análoga a lo estudiado para superficies horizontales, la irradiancia recibida sobre un plano inclinado, y por extensión en un captador, depende del ángulo de incidencia ( $i$ ) de los rayos solares sobre éste.

El ángulo de incidencia sobre un plano depende de las coordenadas horarias del Sol ( $\omega_s, \delta_s$ ), según la expresión trigonométrica:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \operatorname{sen}\delta_s \operatorname{sen}\phi \cos\beta_c - \operatorname{sen}\delta_s \cos\phi \operatorname{sen}\beta_c \cos(a_c) + \cos\delta_s \cos\phi \cos\beta_s \cos\omega_s \\ & + \cos\delta_s \sin\phi \sin\beta_c \cos(a_c) \cos\omega_s + \cos\delta_s \sin\beta_c \sin(a_c) \sin\omega_s \quad (1.13) \end{aligned}$$

Haciendo uso de las coordenadas horizontales del Sol ( $a_s, h_s$ ) la ecuación se simplifica notablemente:

$$\cos(i) = \text{sen}(h_s) \cos\beta_c + \text{sen}(h_s) \text{sen}\beta_c \cos(a_s - a_c) \quad (1.14)$$

Se observa que para el caso particular de superficies horizontales  $\beta_c = 0^\circ$ , el ángulo de incidencia coincide con el ángulo cenital solar y la ecuación (1.14) ha sido ya empleada en la ecuación (1.8).

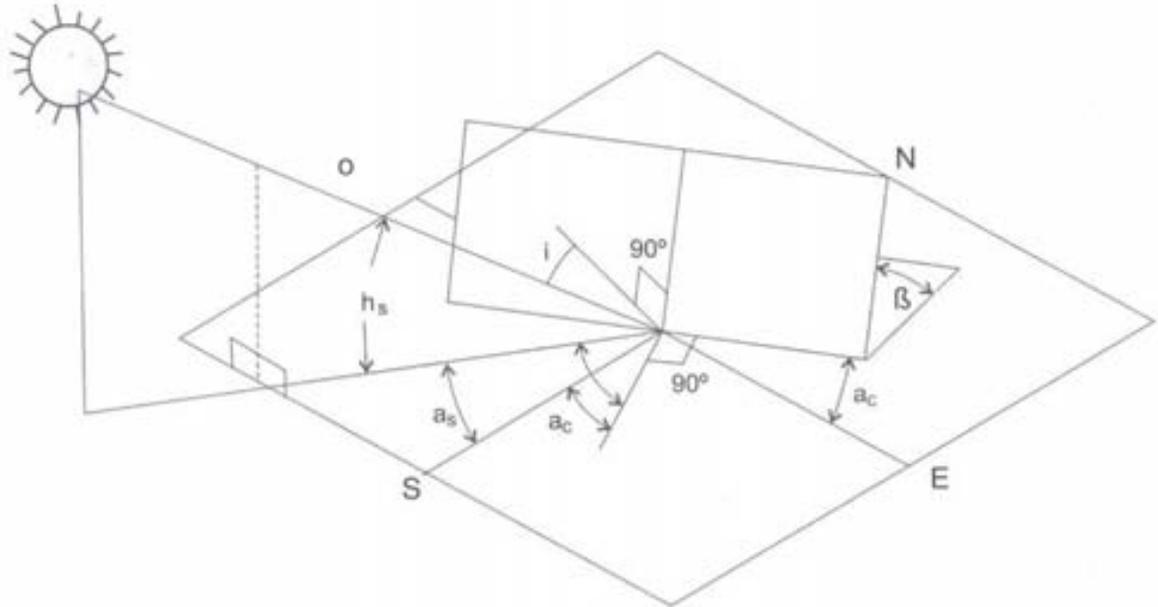


Figura II.13 Definición del ángulo de incidencia sobre un plano inclinado y orientado.

**Ejemplo.**

Calcule el ángulo de incidencia de la radiación solar, a las 11 h de la mañana en el día del solsticio de verano sobre una superficie situada a  $40^\circ$  N de latitud. La superficie esta inclinada  $70^\circ$  y orientada al SW.

**Solución:**

Se resumen las informaciones que definen la situación:

Hora solar = 11 h .....  $\omega_s = -15^\circ$

Día del solsticio de verano .....  $\delta_s = 23.45^\circ$

Inclinación  $70^\circ$  .....  $\beta_c = 70^\circ$

Orientación SW .....  $a_c = 45^\circ$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \operatorname{sen}(23.45^\circ)\operatorname{sen}(40^\circ)\cos(70^\circ) - \operatorname{sen}(23.45^\circ)\cos(40^\circ)\operatorname{sen}(70^\circ)\cos(45^\circ) \\ & + \cos(23.45^\circ)\cos(40^\circ)\cos(70^\circ)\cos(-15^\circ) \\ & + \cos(23.45^\circ)\sin(40^\circ)\sin(70^\circ)\cos(45^\circ)\cos(-15^\circ) \\ & + \cos(23.45^\circ)\sin(70^\circ)\sin(45^\circ)\sin(-15^\circ) \end{aligned}$$

El ángulo de incidencia resulta  $i = 83^\circ 20'19''$

#### 2.4.5 Irradiancia en el plano inclinado.

La irradiancia recibida por un captador inclinado en superficie es la combinación de la irradiancia directa ( $I_{s,b}$ ), la difusa ( $I_{s,d}$ ) y la reflejada en la superficie frente al captador ( $I_{s,re}$ ):

$$I_s = I_{s,b} + I_{s,d} + I_{s,re} \quad (1.15)$$

La irradiancia en el plano del captador se evalúa a partir de medidas de la radiación directa y difusa en la horizontal. La primera componente, la radiación directa en el plano del captador se determina a partir de las medidas de radiación directa en la horizontal:

$$I_{s,b} = I_{s0,b} \cos(i)$$

La distribución de la radiación difusa en la bóveda celeste depende de la nubosidad y claridad atmosféricas, altamente variables. Incluso en días despejados la irradiancia difusa que alcanza la superficie es claramente anisótropa. Es una sencilla descripción cualitativa la radiación difusa comprende: una componente isótropa, uniforme en todas las direcciones de la bóveda celeste; una componente circumsolar, resultante de la dispersión atmosférica y concentrada en la zona de la bóveda alrededor del Sol, y el brillo del horizonte, especialmente pronunciado en cielos muy despejados.

Un ejemplo de modelo matemático para la evaluación de la componente difusa sobre un plano inclinado a partir de medidas de irradiancia directa y difusa en la horizontal es el propuesto por Pérez (1990):

$$I_{s,d} = I_{s0'd} [0.5(1 - F_1)(1 + \cos\beta_c) + F_1 a/b + F_2 \text{sen}\beta_c] \quad (1.17)$$

Donde  $I_{s0'd}$  es la irradiancia en el plano horizontal ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $F_1$  el factor de anisotropía circumsolar y  $F_2$  el factor de anisotropía del horizonte, ambos tabulados para diferentes condiciones atmosféricas. Los factores a y b se definen según:

$$\begin{aligned} a &= \text{máx} \{0; \cos(i)\} \\ b &= \text{máx} \{0.087; \text{sen}(h_s)\} \end{aligned} \quad (1.18)$$

La radiación reflejada en el suelo recibida por el captador es función de la radiación global incidente en el plano horizontal:

$$I_{re} = 0.5 p' I_{s0} (1 - \cos\beta_c)$$

#### 2.4.6 Irradiación en un captador.

En la sección anterior se ha descrito el paso de las componentes de la irradiancia del plano horizontal a un plano de captación inclinado pero en las localidades en las que son disponibles datos medidos de irradiación, se refiere a la magnitud global sobre un plano horizontal ( $H_{s0}$ ). En muy pocas estaciones se mide por separado la componente directa y difusa incidentes sobre la superficie. Por lo tanto hay que considerar que los datos de partida generalmente serán irradiaciones globales. Además, para el plano horizontal a datos de irradiación en el plano inclinado, considerando las diversas componentes de la radiación.

#### 2.4.7 Irradiación mensual en planos inclinados.

Liu y Jordan (1962) desarrollaron un método para resolver la cuestión aproximando a partir de la irradiación global horizontal las componentes directa, difusa y reflejada. El algoritmo de Liu y Jordan, que considera modelo de cielo isotrópico, es aplicable únicamente a captadores orientados al sur. Klein (1977)

extendió este trabajo a cualquier orientación. La irradiación diaria sobre un plano inclinado se expresa como:

$$H_s = R_A H_{s0} \quad (1.19)$$

Siendo  $R_A$  el cociente entre la media mensual de irradiación global diaria sobre el plano inclinado y sobre el horizontal.

Este factor se evalúa considerando separadamente las componentes:

$$R_A = (1 - H_{s,d}/H_s) R_B + H_{s,d}/H_s \frac{(1 + \cos \beta_c)}{2} + \frac{p(1 - \cos \beta_c)}{2} \quad (1.20)$$

Donde  $H_{s,d}$  es la irradiación difusa diaria,  $R_B$  es el análogo a  $R_A$  para la radiación difusa y  $p$  es el albedo del suelo entorno del captador. En esta ecuación el primer sumando es la componente de la radiación directa, el segundo la radiación difusa desde el cielo y el tercero la radiación reflejada en el suelo.

Como no suele disponerse de medidas de la media mensual de la radiación difusa diaria, se ha relacionado la fracción entre la radiación difusa y la global con el índice de claridad, según:

$$\frac{H_{s,d}}{H_s} = 1.39 - 4.03 K_T + 5.53 K_T^2 - 3.11 K_T^3 \quad (1.21)$$

Collares-Pereira y Rabl (1979) también correlacionaron la irradiación difusa y global pero introdujeron la hora de puesta del Sol para tener en cuenta la variación estacional de la componente difusa:

$$\frac{H_{s,d}}{H_s} = 0.775 + 0.347 \left( \omega_{s,p} - \frac{\pi}{2} \right) - \left[ 0.505 + 0.026 \left( \omega_{s,p} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos(2K_T - 1.8) \quad (1.22)$$

Donde  $\omega_{s,p}$  se expresa en radianes.

Teóricamente  $R_B$  es una función complicada de la transmisión de la atmósfera. Sin embargo aplicando el método dado por Klein (1977) se puede tener una buena aproximación. Para planos orientados al Sur ( $a_c = 0$ ):

$$R_B = \frac{\cos(\phi - \beta_c) \cos \delta_s \operatorname{sen} \omega'_{s,p} + (\pi/180)\omega'_{s,p} \operatorname{sen}(\phi - \beta_c)\operatorname{sen} \delta_s}{\cos \phi \cos \delta_s \operatorname{sen} \omega_{s,p} + (\pi/180)\omega_{s,p} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta_s} \quad (1.23)$$

Donde expresando en radianes  $\omega_{s,p}$  es el ángulo horario del ocaso del Sol en el plano horizontal y  $\omega'_{s,p}$  el ángulo horario del ocaso del Sol en el plano inclinado, determinado por:

$$\omega'_{s,p} = \operatorname{mín} \{ \omega_{s,p}, \operatorname{arc} \cos[-\operatorname{tg}(\phi - \beta_c) \operatorname{tg} \delta] \} \quad (1.24)$$

Y para planos en cualquier orientación:

$$\begin{aligned} R_B = & \left( \cos \beta_c \operatorname{sen} \delta_s \operatorname{sen} \phi \frac{\pi}{180} (\omega'_{s,sal} - \omega'_{s,p}) \right. \\ & - \operatorname{sen} \beta_c \operatorname{sen} \delta_s \cos \phi \cos(a_c) \frac{\pi}{180} (\omega'_{s,sal} - \omega'_{s,p}) \\ & + \cos \beta_c \cos \delta_s \cos \phi (\operatorname{sen} \omega'_{s,sal} - \operatorname{sen} \omega'_{s,p}) \\ & + \operatorname{sen} \beta_c \cos \delta_s \operatorname{sen} \phi \cos(a_c) (\omega'_{s,sal} - \omega'_{s,p}) \\ & \left. - \operatorname{sen} \beta_c \cos \delta_s \operatorname{sen}(a_c) (\cos \omega'_{s,sal} - \cos \omega'_{s,p}) \right) \\ & / \left( \cos \delta_s \cos \phi \operatorname{sen} \omega_{s,sal} + \frac{\pi}{180} \omega_{s,sal} \operatorname{sen} \delta_s \cos \phi \right) \quad (1.25) \end{aligned}$$

Donde  $\omega_{s,sal}$  y  $\omega'_{s,sal}$  son los ángulos horarios (expresados en radianes) en la salida del Sol para el plano horizontal e inclinado,  $\omega'_{s,p}$  y  $\omega_{s,p}$  son los correspondientes ángulos para la puesta del Sol.

Este método desarrollado inicialmente para valores mensuales de irradiación fue extendido para valores horarios (Duffie y Beckman 1991).

### Ejemplo.

Datos medidos en el desierto del Sahara (25° N) indican que la irradiación en el mes de enero es  $H_{s0} = 16.21 \text{ MJ m}^2 \text{ día}^{-1}$ . Determinar la irradiación que incidirá en un colector orientado al sur e inclinado 25° respecto a la horizontal.

### Solución.

Se determina la radiación extraterrestre tal y como se expuso anteriormente para calcular el índice de claridad, resultando:  $H_{s0}^e = 23.90 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .

$$K_T = 16.21/23.90 = 0.678$$

Cálculo de la hora de puesta del Sol a mediados de enero.

$$J = 16 \Rightarrow \delta_s = -21.1^\circ \Rightarrow \omega_{s,p} = 79.6^\circ = 1.389 \text{ rad}$$

$$\frac{H_{s,d}}{H_s} = 0.775 + 0.347 (1.389 - 1.5708)$$

$$- [0.505 + 0.026(1.389 - 1.5078)] \cos(2(0.678) - 1.8) = 0.212$$

La irradiación global se descompone en difusa  $3.44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y directa  $12.78 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

$$R_B = \frac{\cos(0) \cos(-21.1) \text{sen}(-79.6) - 1.389 \text{sen}(0) \text{sen}(-21.1)}{\cos(25^\circ) \cos(-21.1) \text{sen}(-79.6) + 1.389 \text{sen}(25^\circ) \text{sen}(-21.1^\circ)} = 1.47$$

Asumiendo un albedo  $p' = 0.2$  la irradiación en el plano inclinado es:

$$H_s = (1.47) (12.78) + (0.953) (3.44) + (0.009) (16.21) = 22.20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}.$$

## 2.5 Disponibilidad de radiación solar.

La cantidad de radiación que incide en un plano perpendicular a la dirección de la insolación, fuera de la atmósfera terrestre, es de aproximadamente de  $1.392 \text{ kW/m}^2$ , según ha sido medido por varios laboratorios en órbita terrestre.

Esta cantidad varía en la tercera cifra decimal, además de las variaciones estacionales (+3.5 por ciento en Enero y -3,5 por ciento en Julio), aunque dicha

variación puede imputarse a error de medición; así se habla de la *constante solar*,  $I_{sc} = 1.392 \text{ kW/m}^2$ .

Esta magnitud de radiación solar que incide sobre un plano, o insolación, es el máximo valor posible de obtener fuera de la atmósfera sin concentración. Diversos factores reducen considerablemente dicho valor; uno de los más importantes es la dispersión de la radiación a su paso por la atmósfera. Debe señalarse que esta dispersión depende de la masa de aire a atravesar, por lo cual aumenta la latitud (fig. II.14), y que repercute en una atenuación mayor, para un sitio y una estación dados, lejos del mediodía.

Este mecanismo de atenuación es responsable de buena parte de las variaciones estacionales.

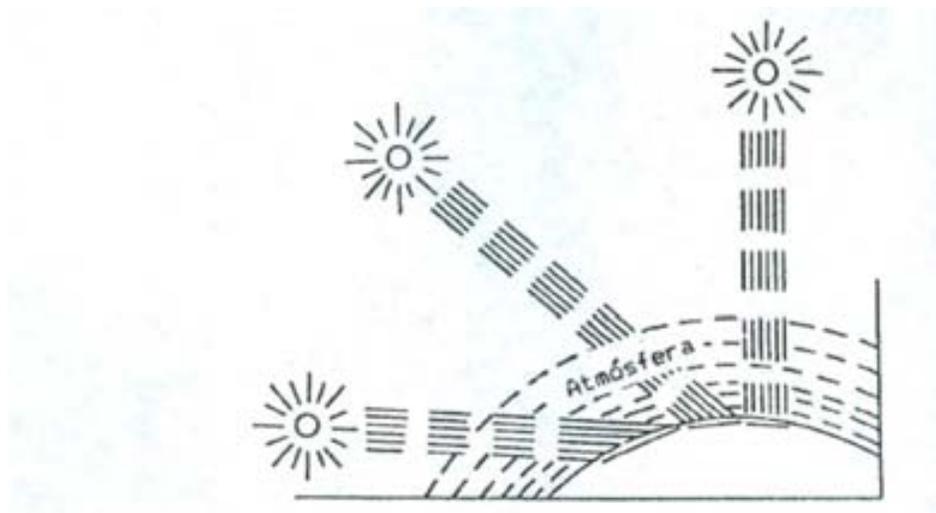


Figura II.14 Masa aire vs latitud. A mayor distancia recorrida, mayor es la pérdida de radiación solar por dispersión atmosférica.

La radiación solar tiene un espectro variable con la atenuación por dispersión atmosférica. En la fig. II.15, la curva para  $M = 0$  representa la distribución espectral para la radiación libre de atmósfera cuya área bajo la curva resulta en el valor de  $I_{sc}$  mencionado. Para masas de aire  $M = 1$ , típicas de regiones ecuatoriales al mediodía, y para masas de aire  $M = 2$ , características de la región norte de los Estados Unidos al mediodía, la reducción es aparente.

Se observa también la alteración en el espectro, la que, sin embargo, puede ignorarse en muchas aplicaciones de ingeniería, donde lo que se busca es aprovechar una banda espectral amplia.

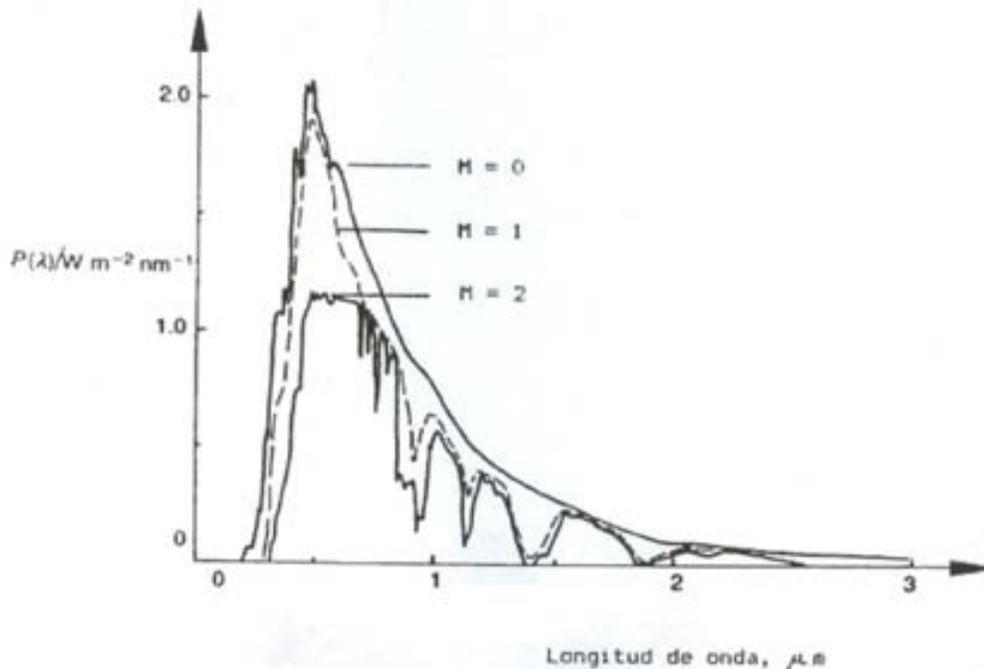
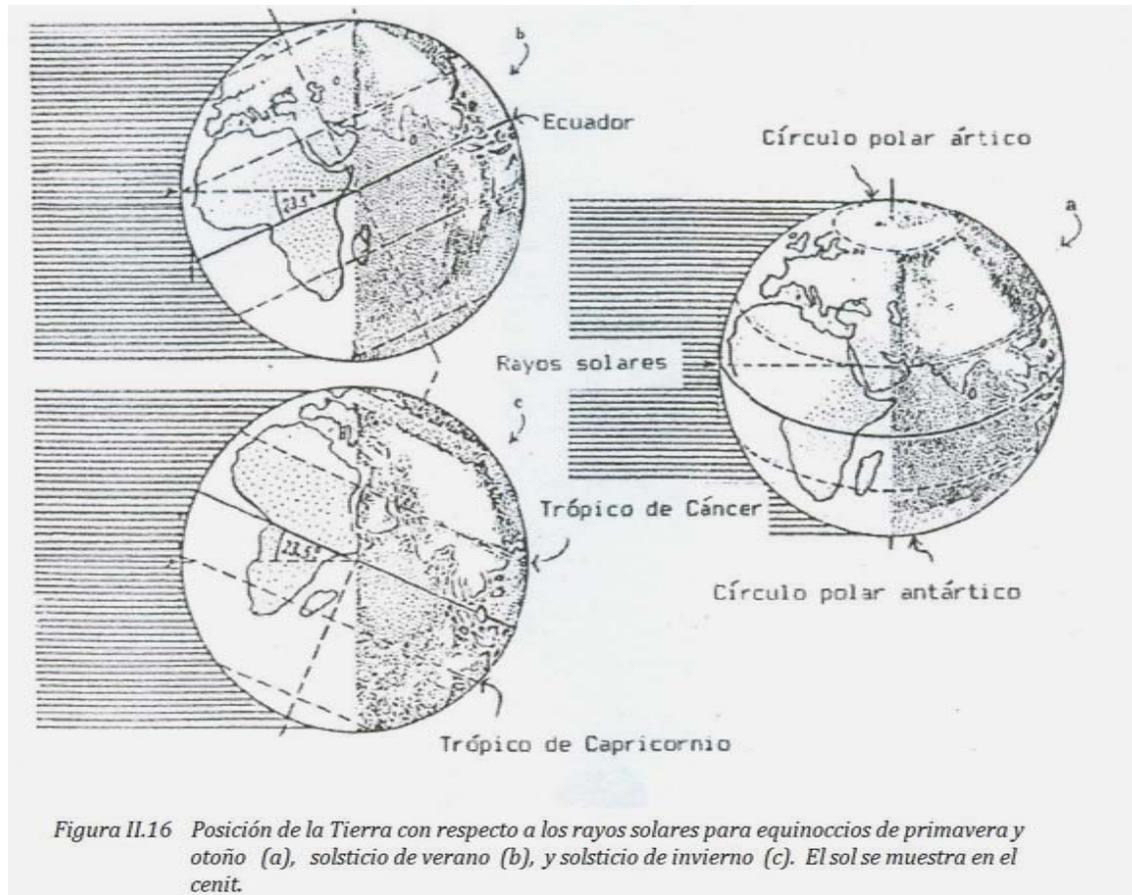


Figura II.15 Distribución espectral de la energía solar sobre una superficie horizontal, para varias masas de aire  $M$ .

La magnitud de la radiación se altera también a lo largo del año debido a la variación estacional como resultado de la inclinación del eje terrestre con respecto al plano de traslación, y de la variación de la duración del día solar, o longitud del día en todo el planeta, excepto en el ecuador. Dado que la inclinación del eje terrestre es de aproximadamente  $23^\circ 27''$ , entonces, en el intervalo de paralelos terrestres de latitud  $23^\circ 27''$  N a  $23^\circ 27''$  S, hay al menos un día del año en el cual el sol al mediodía se observa verticalmente sobre el lugar. Esta región, limitada al norte por el Trópico de Cáncer y al sur por el Trópico de Capricornio, es la de máxima radiación solar en el planeta. El Trópico de Cáncer cruza el país por el sur de Baja California Sur y Sinaloa, en el occidente, y por la zona sur de Tamaulipas en la costa del Golfo de México.

Por esta razón, la duración de los días en la zona central del país es muy parecida a lo largo de todo el año.



El complemento de  $23^{\circ} 27''$  define los círculos polares ártico y antártico, dentro de los cuales (fig. II.16) hay seis meses de día y seis de noche. El resto del planeta, entre las latitudes de  $23^{\circ} 27''$  y  $66^{\circ} 33''$  (norte y sur) tienen un clima solar sumamente variable a lo largo del año, con días muy largos, de 14 a casi 24 horas en el verano, y proporcionalmente cortos en el invierno. La posición del sol en el cenit (o zenit) coincide con el Trópico de Cáncer en el solsticio de verano el 21 de junio, y con el Trópico de Capricornio en el solsticio de invierno el 21 de diciembre, y con el ecuador en el equinoccio de primavera el 21 de marzo, y en el otoño el 22 de septiembre.

La naturaleza de estos movimientos terrestres es importante en la atenuación por masas de aire variables, pero el efecto estacional sobre las condiciones climáticas es más importante en las que a su vez cambian las características atmosféricas.

De hecho, se ha determinado que las condiciones atmosféricas producen el mayor efecto atenuador de la radiación solar. La energía del sol se absorbe parcialmente en las capas atmosféricas más altas, de modo que se filtra prácticamente la totalidad de la radiación ultravioleta; esto es, la de longitud de onda menor a unas 0.2 micras. De ahí que el cielo claro se vea azul. El vapor de agua y diversos gases en la atmósfera absorben la radiación selectivamente, por lo que las nubes tienen un efecto devastador sobre los niveles de radiación solar recibida sobre un sitio cualquiera. Dada la naturaleza errática del clima, la predicción de la radiación solar terrestre es virtualmente imposible. Así, la estimación de la insolación disponible, para fines de ingeniería, se hace con base en información climatológica y registros históricos meteorológicos.

### **2.5.1. Estimación de la insolación local.**

La importancia de las características climáticas se ilustra en la fig. II.17, donde se aprecia la intensidad media anual de la radiación solar global sobre un plano horizontal, en  $W/m^2$  como promedio en 24 h (se multiplica el valor de la isopleta por 24 y se divide entre 1,000 para obtener la irradiancia media anual, en  $kW h/m^2$ ). La variabilidad del clima solar es clara, pero la información de la figura dista de ser la requerida para conocer la insolación esperada en un sitio específico, en un instante en particular.

El paralelismo entre el clima solar y la temperatura ambiental es aparente en la fig. II.18. El conocimiento de la temperatura ambiente es también importante para calcular sistemas solares, pues de ella dependen las pérdidas de calor. El posible paralelismo entre los mecanismos de atenuación de radiación solar y los que determinan la temperatura ambiental pueden ser una base para determinar niveles instantáneos de insolación.

La factibilidad de determinar la tendencia de la intensidad de la radiación solar con apoyo en registros históricos se reconoció desde hace varias décadas, ya que los niveles de radiación solar medios mensuales de muchas localidades siguen ciclos anuales. Durante la década de los años cincuenta, en un gran esfuerzo internacional, se completo un ciclo de mediciones anual, comprendiendo las radiaciones global, directa y difusa, sobre un plano horizontal, en todo el mundo. Los datos de la fig. II.16 provienen en parte de esas mediciones. Desgraciadamente, la radiación varía, además de anualmente, con otros ciclos terrestres (por ejemplo, hay ciclos hidrológicos que determinan el microclima en algunas regiones, con duraciones de hasta 32 años), y la información de un solo año es insuficiente.

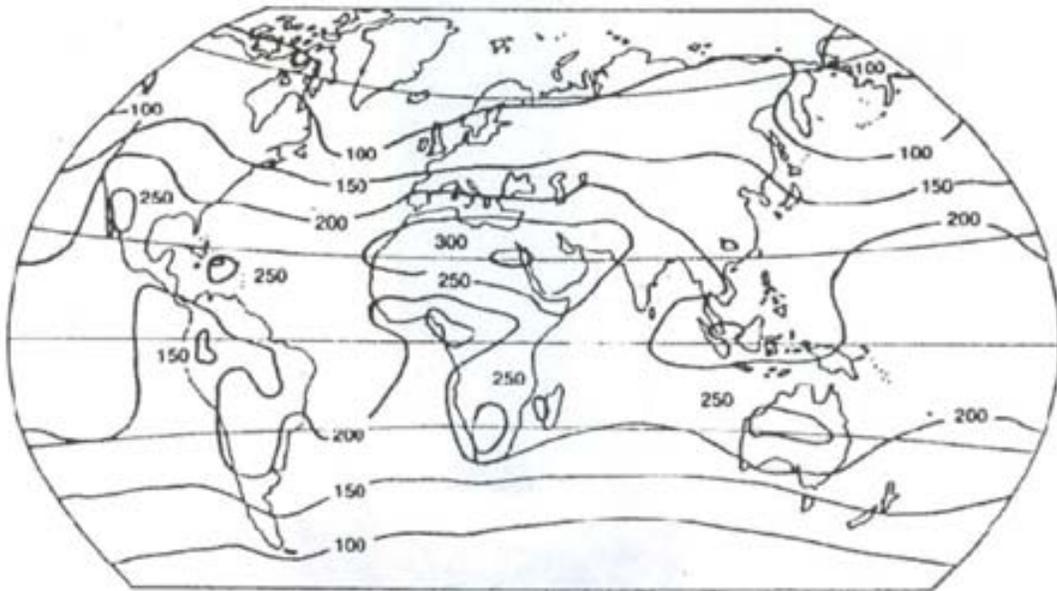


Figura II.17 Irradiancia global media anual sobre un plano horizontal (líneas de igual flujo, o isopletas, en  $W m^{-2}$ ). Para calcular la insolación diaria media, en  $kW/m^2$ , multiplicar el valor de la isopleta por  $(24/1000)$ .

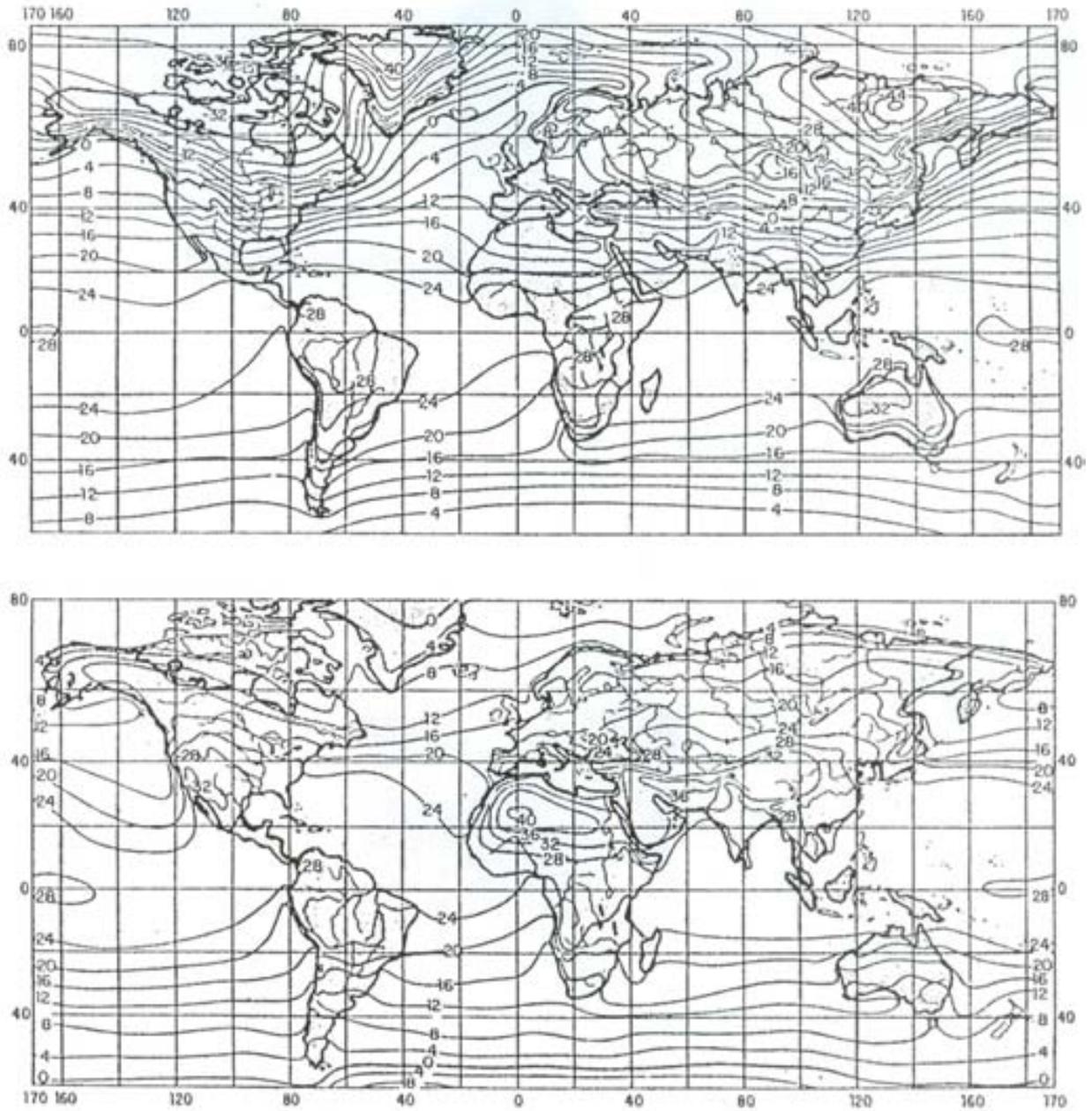


Figura II.18 Temperatura atmosférica mundial para los meses de enero (arriba) y julio (abajo) en °C.

## 2.5.2. Radiación solar sobre la República Mexicana.

Ecuación general.

Diversos autores, como Liu y Jordan, Munroe, y varios de la UNAM, han estudiado la variación de la radiación solar a lo largo del día para determinar cuanta energía en promedio mensual recibe en cada instante una superficie horizontal. Al ingeniero le conviene conocer esa variación como  $G(t)$ , o sea la función de la radiación solar, global o total, en el tiempo;  $G_b(t)$ , para la parte directa de la irradiancia, y  $G_d(t)$ , para el componente difuso. Las tres se relacionan como

$$G(t) = G_b(t) + G_d(t) \quad (4.1)$$

La forma de estas funciones se asemeja a una curva de Gauss (fig.II.19 a II.22). El valor de  $G(t)$  se puede aproximar por:

$$G(t) = G_M \cos^{1.2} \left( \frac{180 \theta}{N} \right) \quad (4.2)$$

Donde  $\theta$  es el tiempo, expresado en horas, a partir del mediodía solar (0 a las 12 meridiano, 2 a las 10:00 am, -3.5 a las 15:30 h, etc), y  $N$  la longitud, en horas también, del día solar en cuestión. El valor de  $N$  puede calcularse u obtenerse en tablas de almanaques.

Por su parte, el componente directo de  $G$  se expresa por

$$G_b(t) = G_{bM} \cos^{1.2} \left( \frac{180 \theta}{N} \right) \quad (4.3)$$

TABLA 4.1 DÍA PROMEDIO PARA CADA MES Y VALORES CORRESPONDIENTES DE LA DURACIÓN DEL DÍA SOLAR, N

Mes	Día promedio del mes	Día del año correspondiente (n)	Valores medios de N para el día n				
			$\phi = 8^\circ$	$\phi = 16^\circ$	$\phi = 24^\circ$	$\phi = 32^\circ$	$\phi = 40^\circ$
ENE	17	17	11.60	11.16	10.69	10.16	9.51
FEB	16	47	11.75	11.50	11.22	10.90	10.52
MAR	16	75	11.95	11.91	11.86	11.80	11.73
ABR	15	105	12.18	12.36	12.56	12.79	13.07
MAY	15	135	12.37	12.75	13.16	13.64	14.21
JUN	11	162	12.46	12.94	13.46	14.06	14.79
JUL	17	198	12.42	12.85	13.32	13.87	14.53
AGO	16	228	12.26	12.52	12.82	13.15	13.54
SEP	15	258	12.04	12.08	12.13	12.18	12.25
OCT	15	288	11.81	11.63	11.42	11.19	10.91
NOV	14	318	11.63	11.25	11.83	10.35	9.77
DIC	10	344	11.54	11.07	10.54	9.94	9.21

**Ejemplo.**

Se desea conocer  $\bar{G}$ ,  $\bar{G}_b$ , y  $\bar{G}_d$  a las 10:15 h (hora solar  $\theta = 1.75$  h) en la ciudad de Guanajuato el día 3 de mayo.

Resultado.

Del mapa de la figura 4.20, se obtiene  $\bar{G}_M$ , correspondiente al mes de mayo para la ciudad de Guanajuato:

$$\bar{G}_M = 865 \text{ W/m}^2$$

De manera similar, para  $\bar{G}_{bM}$ , se recurre a la figura 4.32:

$$\bar{G}_{bM} = 676 \text{ W/m}^2$$

El valor de  $N = 12.816$  h (se calcula de acuerdo con el apartado de la radiación sobre un plano horizontal, que se describe más adelante), y de acuerdo con él las ecuaciones con  $\theta = 1.75$  para las 10:15 h,

$$\bar{G} = 865 \cos^{1.2} \left( 1.75 \frac{180}{12.816} \right) = 771.82 \frac{W}{m^2}$$

$$\bar{G}_b = 676 \cos^{1.5} \left( 1.75 \frac{180}{12.816} \right) = 586.24 \frac{W}{m^2}$$

$$\bar{G}_d = G - G_b = 185.58 \frac{W}{m^2}$$

### 2.5.3 Radiación sobre un plano horizontal.

Adoptando el proceso descrito en la sección anterior correspondiente al cálculo de la magnitud de la radiación instantánea, la radiación global y sus dos componentes se aproximan con las expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Radiación total} \quad \bar{G} &= \bar{G}_M \cos^{1.2} \left( \frac{180 t}{N} \right) \\ \text{Radiación directa} \quad \bar{G}_b &= \bar{G}_{bM} \cos^{1.5} \left( \frac{180 t}{N} \right) \\ \text{Radiación difusa} \quad \bar{G}_d &= \bar{G} - \bar{G}_b \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde t denota el tiempo; los valores de irradiancia máxima,  $\bar{G}_M$  y  $\bar{G}_{bM}$  se obtienen de los mapas antes mencionados.

La longitud del día solar (N) se expresa como:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi)(h) \quad (4.5)$$

En la que  $\phi$  denota la latitud del lugar (positiva al norte; en México, DF,  $\phi = 19.45^\circ$ ) y la  $\delta$  la declinación solar ( $- 23.27^\circ \leq \delta \leq 23.27^\circ$ ), que puede calcularse como:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (4.6)$$

Donde n significa el número del día en el año ( $n = 1, 2, \dots, 365$ ).

### 2.5.4 Radiación sobre planos no horizontales.

Se define a un plano no horizontal como el que se inclina un ángulo  $\beta$  y se orienta un ángulo  $\gamma$  que es positivo del sur al oriente, negativo del sur al poniente y nulo si la orientación es sur. Un captador solar plano fijo tiene unos cuantos grados arriba de la latitud en su inclinación ( $(\phi < \beta < \phi + 10^\circ)$ ) y suele orientarse al sur ( $\gamma = 0^\circ$ )

Definiendo un ángulo horario como  $\omega = 15t$ , o sea positivo en la mañana y negativo en la tarde, se calcula  $\theta$ , el ángulo que forman en el instante  $t$  la dirección de la radiación solar directa y la normal al plano de interés, como:

$$\theta = \cos^{-1}(\sin \gamma \sin \phi \cos \delta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \quad (4.7)$$

Un caso particular es  $\theta_z$ , el ángulo que forman la dirección de la radiación directa y la vertical del lugar:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (4.8)$$

Nótese que la ecuación 4.8 se obtiene al hacer  $\gamma = 0$ ,  $\beta = 0$  en la ecuación 4.7.

Puede definirse así un factor de proyección,  $R_b$ , tal que permita conocer la radiación sobre un plano cualquiera, conocida la radiación sobre un plano horizontal. Esto es:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.9)$$

De modo que la radiación sobre el plano de interés, con la suposición de que  $\bar{G}_d(t)$  es isotrópica, se reduce a:

$$\bar{G}_T(t) = \bar{G}_b(t)R_b + \bar{G}_d(t) \quad (5.0)$$

Donde  $\bar{G}_T$  es la radiación total instantánea que recibe el plano no horizontal.

En la ecuación 5, la fracción difusa de la radiación solar no se modifica por efecto de la inclinación. Sin embargo al inclinarse el captador, recibe cierta cantidad de radiación reflejada por el suelo, que incluye tanto radiación directa como difusa, ambas reflejadas. Con esto, además de que al inclinarse el captador se gana en cuanto a la fracción difusa. De cualquier forma, el cálculo preciso de la fracción reflejada por los alrededores del captador es prácticamente imposible de efectuar, de modo que suele adoptarse la expresión anotada, la que cuando la inclinación es pequeña, resulta suficientemente precisa.

## 2.6 Trasmisión de la radiación solar.

Supóngase que desea conocer cuanta radiación solar pasa a través de una ventana de uno o de más vidrios, o de otro material semitransparente. Las cubiertas semitransparentes se caracterizan por un índice de refracción, que aquí se especifica como  $n_2$ , referido al índice de refracción del aire,  $n_1 (=1)$ , y por un espesor  $d$ . El ángulo de refracción se calcula con la ley de Snell:

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 \right) \quad (5.1)$$

Donde, para el caso que aquí interesa,  $\theta_1 = \theta$  de la ecuación 4.7 y  $n_1/n_2 = 1/1.5$  cuando la ventana es de vidrio. El valor de  $\theta_2$  permite calcular la reflectancia instantánea  $\rho$  mediante la relación de Fresnel:

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (5.2)$$

La capacidad de transmitir radiación se limita cuando la reflectancia crece. Así, la trasmittancia limitada por la reflexión,  $\tau_r$ , para un número  $n$  de cubiertas iguales se expresa como:

$$\tau_{r,n} = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho} \quad (5.3)$$

La fracción de la radiación que se absorbe en la cubierta transparente reduce la radiación transmitida por un factor  $\tau_a$  definido por:

$$\tau_a = \exp(-Kd/\cos \theta_2) \quad (5.4)$$

Donde  $d$  es el espesor de la cubierta, de modo que  $d/\cos \theta_2$  es la longitud recorrida por el haz de radiación, y  $K$  es el coeficiente de extinción del material semitransparente. Las unidades de  $K$  deben ser las mismas de  $d$ , elevada a la potencia -1, para el vidrio es común utilizar  $K = 0.32 \text{ cm}^{-1}$ .

La transmitancia total, por tanto, será el producto de las transmitancias parciales dadas por las ecuaciones 5.3 y 5.4:

$$\tau = \tau_r \tau_a \quad (5.5)$$

De este modo, la radiación transmitida por el sistema de cubiertas queda definida por el producto de las ecuaciones 5.0 y 5.5. Si la superficie absorbente detrás de las cubiertas transparentes tiene una absorptancia media hemisférica  $\alpha$ , la energía absorbida se calcula tomando en cuenta tanto las reflexiones múltiples que ocurren entre la superficie absorbedora y la última cubierta transparente con la reflectancia a la radiación difusa,  $\rho_d$ , en la relación  $(\tau \alpha)$  dada por:

$$(\tau \alpha) = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (5.6)$$

La reflectancia  $\rho_d$  suele evaluarse como constante en el tiempo, y es muy similar al resultado de sustituir  $\theta_1 = 60^\circ$  en las ecuaciones 5.1 y 5.2 para obtener  $\tau$  de la ecuación 5.5. Nótese que en la ecuación  $(\tau \alpha) \neq \tau \alpha$ .

**Ejemplo.**

Calcular la radiación absorbida por un captador de  $\alpha = 0.93$  si su posición se define por  $\beta = 30^\circ$  y  $\gamma = 0^\circ$ , en la Ciudad de México ( $\Phi = 19.45^\circ$ ) el 12 de julio a las 16:00 h. El captador tiene un vidrio de 3.2 mm.

**Solución.**

A la hora indicada ( $t = -4$  h, el ángulo horario es:  $\omega = -4 \times 15 = -60^\circ$ )

Cuando  $\gamma = 0^\circ$ , la ecuación 4.7 se reduce a:

$$\theta = \cos^{-1}(\cos(\phi - \beta)\cos\delta \cos \omega + \text{sen}(\phi - \beta)\text{sen}\delta) \quad (4.7')$$

Con los datos del ejercicio anterior,

$$\delta = 21.97^\circ, \bar{G}_b = 0.173 \text{ kW/m}^2, \bar{G}_d(t) = 0.145 \text{ kW/m}^2,$$

en la ecuación 4.7' se tiene:

$$\theta = 67.21^\circ$$

De la ecuación 4.8,

$$\theta_z = 55.82^\circ$$

En la ecuación 4.9, el factor  $R_b$  resulta.

$$R_b = \cos 67.21 / \cos 55.82 = 0.69$$

Por lo que, en la ecuación 5.0

$$H(-4) = 0.173 \times 0.69 + 0.145 = 0.264 \text{ kW/m}^2$$

Por otro lado, el ángulo de refracción resulta en la ecuación 5.1:

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{1}{15} \text{sen } 67.21 \right) = 37.94^\circ$$

Con los valores anteriores de  $\theta$  y  $\theta_2$ ,  $\theta_1 + \theta_2 = 105.15^\circ$  y  $\theta_1 - \theta_2 = 29.27^\circ$

En la ecuación 5.2:

$$\rho = \frac{1}{2}(0.257 + 0.023) = 0.14$$

De la ecuación 5.3, con  $n = 1$  para una sola cubierta:

$$\tau_{r,n} = \frac{1 - 0.14}{1 + 0.14} = 0.755$$

Es decir, que solo un 75.5 % de la radiación es trasmisible por la limitante de la reflexión.

Con el valor de  $\theta_2$  en la ecuación 5.4:

$$\tau_a = \exp(-0.32 \times 0.32 / \cos 37.94) = 0.878$$

La ecuación 5.5 resulta entonces en  $\tau = \tau_a \tau_r = 0.663$ , entonces en este caso, si se resuelve la ecuación 5.2 para  $\theta_1 = 60^\circ$ , se obtiene  $\rho_d = 0.16$ . En la ecuación 5.6:

$$(\tau\alpha) = \frac{0.663}{1 - (1 - 0.93)0.16} = 0.671$$

Este resultado enuncia que únicamente el 67.1 % de la radiación que incide sobre el plano del captador se absorbe por la placa absorbente.

La inspección del cálculo revela que la mayor parte de la energía se pierde por reflexión, a consecuencia de un gran ángulo de incidencia  $\theta$ . El resultado final puede obtenerse mediante, para el calor absorbido  $q_u$ , la expresión:

$$q_u = \bar{G}_T(t) (\tau\alpha) = 0.264 \times 0.671 = 0.177 \frac{kW}{m^2} \quad (5.7')$$

Este resultado señala que, a la hora en estudio, el captador en cuestión absorbe 0.177 kW por cada metro cuadrado de superficie expuesta al sol.

### **CAPITULO 3 EL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA Y EL COLECTOR DE TUBOS DE VACÍO.**

El sistema más conocido de aprovechamiento de la energía solar es el captador solar, que absorbe la radiación solar y transmite esta energía a un fluido portador – agua, aire o una mezcla de agua con otros líquidos -.

El colector, además de absorber la radiación solar, emite radiación térmica y pierde energía por conducción y por convección, si bien, los colectores solares que se comercializan actualmente, tienen cada vez un mayor grado de absorción y un bajo nivel de pérdidas caloríficas. Si el colector está unido a un depósito de almacenamiento, entonces el fluido irá transportando el calor hacia el depósito, donde la temperatura del fluido irá aumentando.

Una primera clasificación podría establecerse en función del tipo de cubierta que incorpore el colector solar, distinguiendo entre colectores vidriados y no vidriados.

*Los colectores no vidriados* son aquellos que no presentan cubierta que aisle al colector plano del exterior. Por tanto, las pérdidas de calor de estos colectores serán elevadas, siendo indicado su uso en aplicaciones de muy baja temperatura, como el calentamiento de piscinas al aire libre. Usualmente están disponibles en el mercado en forma de mantas de polipropileno.

*Los colectores vidriados* están limitados por una cubierta, generalmente de cristal, que propicia que se produzca en su interior el efecto invernadero, presentando un coeficiente de pérdida menor, y, por tanto siendo susceptibles de ser empleados en aplicaciones que requieren de un nivel energético superior, como pueden ser la preparación de agua caliente sanitaria, el apoyo a calefacción o el aporte de calor en procesos industriales y refrigeración. En esta clasificación

se encuentran los colectores solares planos y los colectores de tubos de vacío (o tubos evacuados).

Se han diseñado distintas y avanzadas versiones de colectores solares térmicos con el objetivo de incrementar la cantidad de energía absorbida y disminuir las pérdidas. Los calentadores más comunes son:

- Colectores Solares Planos
- Colectores Solares de tubos de vacío

### **3.1 El colector solar plano**

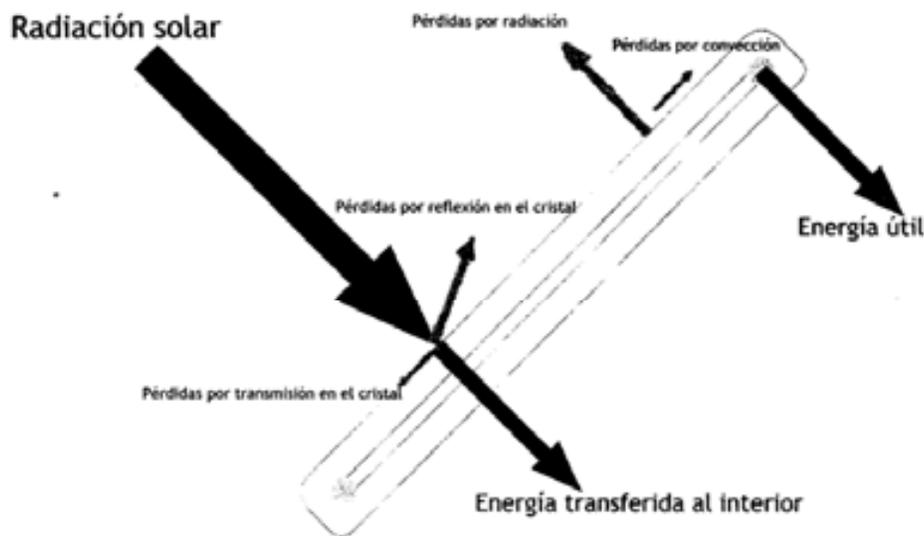
Los colectores solares son los encargados de convertir la energía del sol en calor, que se transporta al fluido de trabajo del circuito primario solar (también llamado fluido caloportador). En los colectores solares planos el fluido de trabajo circula por el interior de los mismos, a través de un circuito interno formado, usualmente, por tuberías o por huecos que dejan entre sí un par de placas electro soldadas.

El principio básico que rige la transparencia de calor en el interior de los captadores solares vidriados es el efecto invernadero, que tiene lugar cuando la radiación solar incidente atraviesa la cubierta transparente del colector y queda atrapada en el interior del mismo. El efecto invernadero tiene lugar en el interior de los colectores solares vidriados al incidir sobre ellos la radiación solar, haciéndose transparentes a la radiación de onda corta, correspondiente a la radiación solar, y opacos a la radiación de onda larga, que se corresponde con emisiones de energía en forma de calor (infrarrojo). De este modo, cuando la mayor parte de la radiación solar atraviesa el vidrio, una parte es reflejada por la placa absorbedora, volviendo a incidir sobre el vidrio, pero por su cara inferior, y siendo conducida, de nuevo, hacia la placa absorbedora. El efecto es similar al que se produce en el

interior de un vehículo cuando se encuentra con sus ventanas cerradas y expuesto a la radiación solar.

Además de propiciar el efecto invernadero, la cubierta de los colectores solares planos protege al absorbedor de la intemperie y minimiza las pérdidas por convección debidas a la acción del viento.

Los mecanismos de transferencia de calor tienen lugar en un colector solar plano pueden apreciarse en la siguiente figura.



*Figura III.1 Balance de energía en el captador solar plano.*

### **3.1.1 Principales componentes de un colector solar plano.**

El principio básico de funcionamiento de un colector solar plano vidriado es el efecto invernadero, pero el mecanismo de transferencia de energía al interior del captador solar debe ser lo más eficiente posible, minimizando las pérdidas, por lo que habrá que disponer del aislamiento suficiente. Pero la radiación solar debe incidir sobre un elemento que capte, de forma eficiente, la energía radiante que incide sobre ella, a través de la placa absorbidora. El fluido de trabajo debe estar confinado en unas tuberías interiores y conectarse al exterior por medio de los distribuidores.

Lógicamente, todos estos elementos deberán estar confinados en una caja.

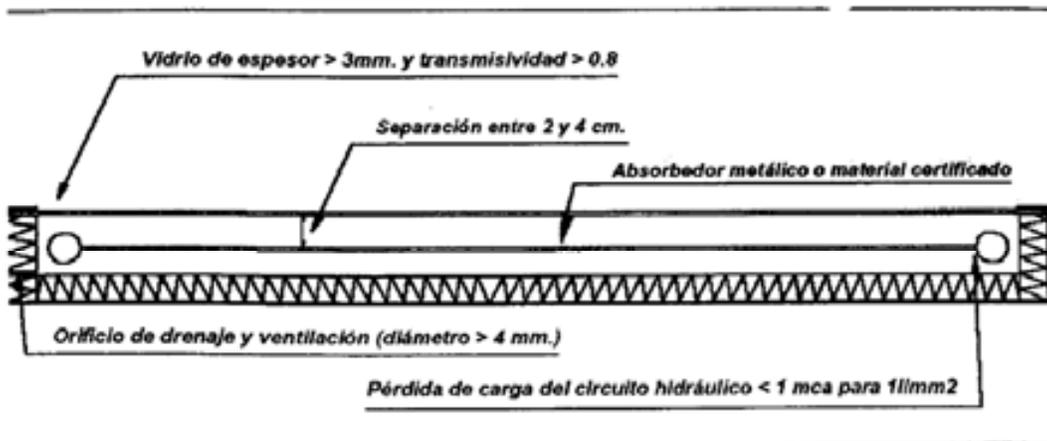


Figura III.2 Principales componentes de un captador solar plano.

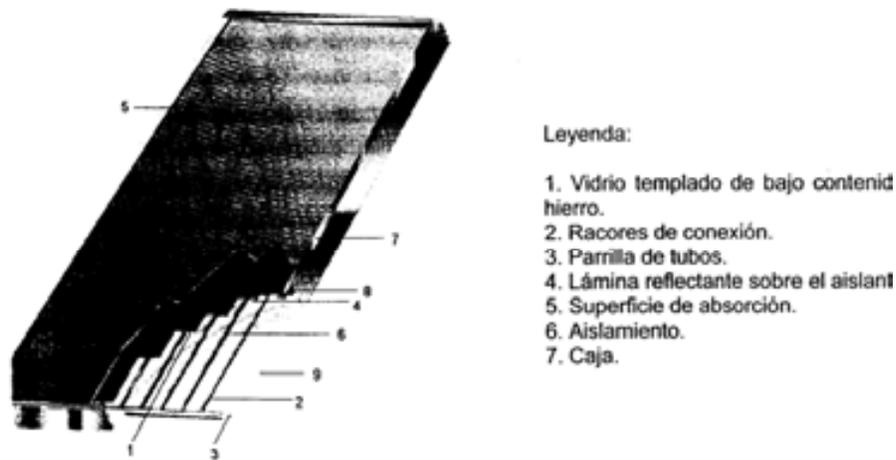


Figura III.3 Despiece de un captador solar plano

Se describen a continuación los principales componentes de un colector solar plano.

a) la cubierta transparente.

Debe tratarse de un material que sea transparente a la radiación solar incidente y opaco a la radiación de onda larga emitida por el absorbedor, de modo que se pueda producir el efecto invernadero en el

interior del colector solar. Al mismo tiempo, reduce las pérdidas del colector hacia el ambiente provocada por los mecanismos de radiación y convección.

Las principales características de la cubierta de los captadores planos deben ser las siguientes:

- *Durabilidad*, que proporcione una larga vida del producto y resista los agentes atmosféricos y las variaciones de temperatura en el colector.
- *Buena capacidad de aislamiento*, de modo que se minimice la emisión de energía desde el colector hacia el exterior.
- *Protección*, para que se proteja a los elementos que se encuentran en el interior del colector.
- *Alta absorptividad y baja reflectividad*, de modo que la mayor parte de la radiación incidente pueda ser transferida en forma de calor al fluido de trabajo.

En los primeros años de la tecnología solar térmica las cubiertas de los colectores planos se fabricaban en plástico o en cristal delgado con alto contenido en hierro. En cuanto a los materiales plásticos, solía emplearse el polimetilmetacrilato. Los principales inconvenientes de este tipo de cubiertas son:

- Baja absorptividad, en los cristales que no poseen unos índices adecuados de bajo contenido de hierro.
- Fracturas y daños en la superficie, debido a esfuerzos mecánicos y térmicos por dilataciones, producidos principalmente en las cubiertas de plástico.

Actualmente, la mayor parte de los fabricantes emplean cristales templados de bajo contenido en hierro, de modo que a las propiedades de resistencia mecánica de los materiales templados añaden unas magníficas fracciones de absorción de los materiales con un bajo contenido de hierro.

La cubierta transparente requiere, para que no se disminuya su rendimiento, de una limpieza periódica de su superficie exterior, que permita eliminar la suciedad exterior que pueda depositarse sobre la cubierta del colector.

En ocasiones, pueden producirse degradaciones en la superficie interior de los colectores, producidas principalmente por condensación del vapor de agua o por el desprendimiento de gases desde el aislamiento. El desprendimiento de gases debe evitarse totalmente, empleando aislamientos que no desprendan gases por efecto de la temperatura en el interior del colector. En cuanto a la condensación, su efecto debe disminuirse mediante el empleo de taladros u otros dispositivos de aireación en el marco del colector.

b) El aislamiento.

La función principal del aislamiento en un colector térmico es reducir las pérdidas de calor al exterior. En consecuencia, hay que proveer aislamiento en todas aquellas zonas del colector que no necesiten ser transparentes a la radiación solar, es decir, los laterales y el fondo.

Los principales materiales que se emplean actualmente son la lana de roca, las espumas de poliuretano y las resinas de melanina.

Para seleccionar adecuadamente el aislamiento a emplear en un colector plano debe tenerse en cuenta dos características principales: *coeficiente de aislamiento y temperatura de trabajo máxima.*

La elección de un material con un alto coeficiente de aislamiento (baja conductividad) supone una mayor reducción de pérdidas para un espesor predeterminado.

Obtener un aislamiento que sea capaz de soportar la máxima temperatura que se pueda generar en un colector, cuando se encuentre en condiciones de estancamiento, es de vital importancia para la durabilidad del aislamiento del colector y para la permanencia del rendimiento energético del colector con el tiempo. El efecto de la sobre temperatura es de particular importancia en el aislamiento en la parte posterior del colector, que suele encontrarse muy próxima al absorbedor, y en algunos casos, como ocurre en los aislamientos a base de poliuretano, se degrada rápidamente con temperaturas superiores a los 140°C.

Al mismo tiempo, es muy importante que el aislamiento no emita gases por efecto de la temperatura, que pueda ensuciar la parte interior del vidrio del captador.

Otra cualidad que debe preverse al elegir el aislamiento es que sea hidrófobo, de modo que no pueda provocar una disminución en sus propiedades de aislamiento por absorción de la humedad del ambiente.

De especial interés es el sellado entre las diferentes capas de aislamiento, de modo que se eviten puentes térmicos en el interior del colector. Para ello, habrá que utilizar adhesivos que no sufran con la elevada temperatura y no degraden el aislamiento.

### c) El absorbedor.

El absorbedor es el elemento encargado de recoger la radiación solar y transferir el calor, de forma eficiente, al fluido de trabajo que circula por el interior del colector solar. Al mismo tiempo, el fluido caloportador debe estar

confinado en el interior del colector, y conducido de forma que recorra la mayor parte de la superficie absorbadora.

Los primeros desarrollos de colectores solares planos solían utilizar chapas de acero inoxidable electro soldadas, que dejaban en su interior una serie de canales por los que circulaba el fluido caloportador. Con este tipo de configuración se aumenta considerablemente el rendimiento del equipo, pues se favorece el régimen turbulento de circulación en el interior del colector. Presenta el inconveniente de una elevada pérdida de carga y de no poder soportar presiones medias en el interior de la parrilla del colector.

Con el paso del tiempo se avanzo hacia la construcción de circuitos de tuberías interiores en cobre, siendo esta configuración la más empleada actualmente por la mayoría de fabricantes. Es posible disponer cobre en los circuitos de las tuberías que discurren por el interior del colector cuando el fluido caloportador tenga un PH comprendido entre 7.2 y 7.6, no debe emplearse hierro y, en caso de que se utilice aluminio, será necesario emplear un inhibidor de los iones cobre y hierro.

En esta tecnología se distinguen, principalmente, dos tipos de configuraciones: parrilla de tubos o serpentines (colectores en meandro).

La configuración mas empleada es la parrilla de tubos verticales, dispuestos paralelamente entre sí, que comienzan y terminan en dos tubos de mayor diámetro, llamados distribuidores. Al penetrar el fluido caloportador por el distribuidor inferior, se va repartiendo por cada uno de los tubos verticales, recorriendo en sentido vertical el absorbador y calentándose, terminando en el distribuidor superior, que dará salida al fluido que ha sido calentado hacia el exterior o hacia el siguiente captador en la batería. Una de las ventajas principales de esta configuración es la facilidad para ser dispuesta en colectores que trabajen según un principio de circulación natural o termosifón.

Los absorbedores en serpentín o meandro presentan la particularidad de lograr un mayor calentamiento de cada partícula fluida, que recorre en su totalidad la superficie absorbedora, a costa de una mayor pérdida de carga en el interior del colector, que limitara el número de equipos que puedan conectarse en paralelo.

En cuanto a la forma en que la placa absorbedora se une a la parrilla de tubos, se encuentran, principalmente, tres configuraciones:

1.- Una única placa absorbedora dispuesta sobre los tubos de la parrilla.

Esta configuración es muy empleada en la actualidad por los fabricantes de colectores solares térmicos, puesto que permite, de forma sencilla, la soldadura por ultrasonido. El contacto entre la placa absorbedora y el tubo produce sobre una franja muy estrecha del tubo vertical del colector. Se correspondería con el caso a) de la figura III.4.

2.- Una única placa absorbedora situada sobre los tubos del colector, rodeando en parte el perímetro de estos tubos.

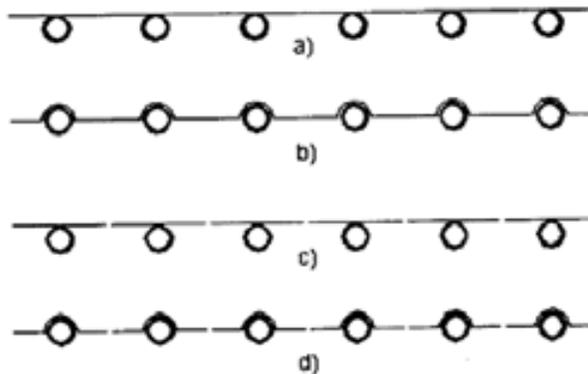
Esta configuración permite un contacto entre el tubo y la banda absorbedora en una superficie mayor que en el caso anterior, si bien plantea la complejidad de tener que disponer de una laminadora muy ancha y no ser una disposición favorable para la soldadura por ultrasonido. Se trata del caso b) de la figura III.4.

3.- Por cada tubo se dispone de una aleta que puede abrazar, o no, al perímetro de tubos verticales.

Esta configuración, junto a la primera, es la más empleada actualmente. Con una pequeña laminadora se pueden obtener fácilmente las aletas, que se dispondrán individualmente sobre cada uno de los tubos para ser soldada. Hay que evitar que quede hueco libre entre las aletas

contiguas, para eliminar los flujos convectivos en el interior del colector. Puede apreciarse esta configuración en los casos c) y d) de la figura III.4.

En la siguiente figura puede apreciarse un esquema que muestra las distintas configuraciones de banda absorbedora y tubos.



*Figura III.4 Distintas configuraciones de absorbedor en captadores formados por parrilas de tubos.*

La superficie absorbente (banda absorbedora) debe recibir un tratamiento que facilite la absorción de la radiación incidente sobre ella. Es un elemento fundamental a la hora de definir las características de un colector plano.

Para facilitar la absorción de la radiación solar se trata a la superficie absorbente, que suele ser metálica, realizada en cobre o aluminio, con sustancias que la recubren y favorecen la absorción de la radiación en el rango de longitudes de onda en que se presenta la mayor parte de la radiación solar.

#### d) La carcasa.

La misión de la caja o carcasa es la de contener todos los elementos que forman el colector solar, y dar rigidez al mismo, permitiendo que el colector sea fijado a una estructura de soporte para su correcta fijación.

Debe estar realizado en un material que soporte la acción de los agentes atmosféricos y de la radiación solar, impidiendo su rápido deterioro con el paso del tiempo.

En los primeros tiempos de la energía Solar térmica se emplearon como materiales el aluminio, el acero galvanizado y la fibra de vidrio reforzada. En algunos casos se empleo madera, si bien esta debía estar tratada para evitar su rápida degradación por la humedad y la radiación solar.

En la actualidad, la mayor parte de fabricantes de equipos solares térmicos emplean aluminio anodizado para formar la caja del colector.

La conexión de la caja con el cristal debe realizarse mediante el empleo de materiales que posean propiedades elásticas, no degradables por los agentes atmosféricos, y que permiten absorber las dilataciones del material metálico y de la cubierta transparente, garantizando la estanqueidad del colector solar.

Suelen emplearse, principalmente, dos tipos de configuraciones: una única caja, obtenida a base de chapa prensada, o varios perfiles metálicos que se unen entre sí con una chapa, que suele ser de PVC o material metálico y que se coloca en la parte posterior del colector.

### **3.2 Colectores solares de tubos al vacío.**

Los colectores de tubo de vacío tienen como componente básico un doble tubo cilíndrico de vidrio. Uno de los tubos de vidrio actúa como superficie captadora y el otro como cubierta. El aire entre los tubos es parcialmente evacuado. Los colectores de tubo de vacío habitualmente incorporan un absorbedor selectivo de alto nivel, como por ejemplo los cermets Mo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Los colectores de vacío encuentran su principal aplicación en los sistemas de temperaturas medias (sistemas de acondicionamiento de aire, procesos industriales, etc.) y en lugares fríos con diferencias elevadas entre la temperatura del colector y la del ambiente, donde la mejora sustancial del rendimiento del sistema puede compensar el aumento del costo debido a su utilización. Su reducido coeficiente de pérdidas los hace especialmente aptos para el aprovechamiento de la radiación solar difusa, manteniendo un rendimiento aceptable, no solo a mediodía o en días soleados, sino también cuando el sol está bajo o el tiempo es frío y parcialmente nuboso.

El vacío no solo contribuye a la reducción de pérdidas, sino también minimizar la influencia de las condiciones climáticas (condensación, humedad, etc.) sobre los materiales empleados, evitando su rápido deterioro y mejorando así su durabilidad y el rendimiento global del sistema. Mediante la aplicación de un vacío ligero, en torno a 0.001 atmósferas, se puede conseguir, esencialmente, la eliminación de las pérdidas por convección; mientras que es necesario un vacío fuerte, inferior a  $10^{-6}$  atmósferas ( $<0.1$  Pa), si se desean eliminar también las pérdidas por conducción.

Debido a la presión atmosférica, que produciría fuerzas muy grandes al aplicarse a toda la superficie de la cubierta, y a los problemas técnicos relacionados con el sellado de la carcasa del colector, la construcción de un colector de vacío con la forma de uno convencional de placa plana entraña gran dificultad. Sin embargo, la técnica de vacío utilizada por los fabricantes de tubos fluorescentes, entre otros, se ha desarrollado hasta el punto de hacer rentable la producción en masa y la comercialización de sus equipos. Mediante la aplicación de esta tecnología ha sido posible la construcción de los colectores solares de vacío que se comercializan en la actualidad y el mantenimiento de su elevado vacío (similar al de las lámparas o los tubos de TV). En el montaje de un colector los tubos de vacío se alinean paralelamente.

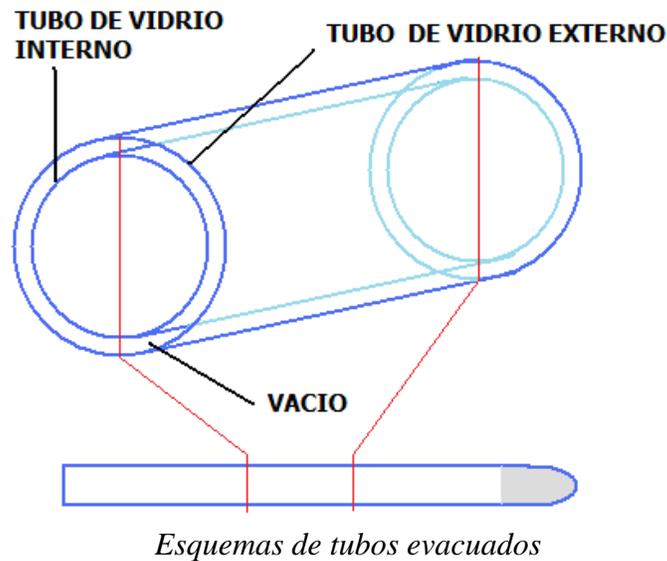
Los tubos de vacío se han adaptado perfectamente al funcionamiento con algunos de los diseños de baja concentración, la forma cilíndrica de los tubos ofrece ciertas ventajas de estos colectores respecto a los de placa plana:

- Permitir una incidencia siempre en ángulos rectos de los rayos del sol respecto a la superficie cilíndrica, minimizando las pérdidas por reflexión.
- Facilita una homogeneidad en la radiación incidente sobre el absorbente que permanece para los tubos prácticamente constantes desde media mañana hasta media noche.

Para mantener el vacío entre los dos tubos de vidrio se utiliza un dispositivo de bario. Así durante la fabricación las altas temperaturas provocan que la parte inferior del tubo aparezca con un recubrimiento de bario puro. Esta superficie se encarga de absorber el CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub> generados durante el almacenamiento y operación ayudando a mantener el vacío. La capa de bario también permite un control óptico fácil del estado del vacío pues el color plateado característico en condiciones óptimas se transforma en blanco cuando se rompe el vacío en el tubo.

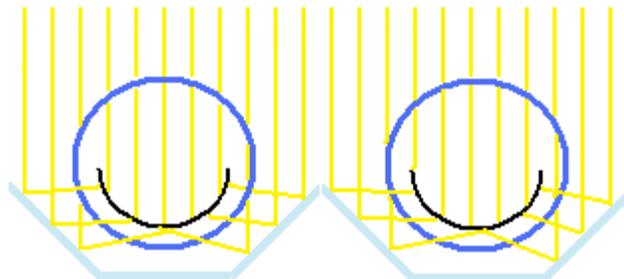
### **3.3 Tipo de colectores de tubo de vacío**

Los distintos sistemas de colectores de tubo de vacío se basan en los tubos evacuados. Estos están conformados por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha aspirado el aire produciéndose un vacío. En uno de los extremos ambos tubos se unen sellándose el vacío. Dentro de ambos tubos (de ahora en adelante nos referiremos a estos tubos concéntricos con el vacío en medio como tubos evacuados) se sitúan los distintos tipos de absorbedores que determinan los distintos sistemas.



Algunos colectores emplean un sistema denominado CPC (Colector Parabólico Concéntrico) para aprovechar la radiación solar que incide entre dos tubos. Este sistema consiste en una serie de reflectores que dirigen la luz que cae entre tubo y tubo hacia la parte trasera de los mismos donde es también aprovechada. Con ello los colectores reciben luz tanto de la parte delantera como de la trasera. Con el sistema CPC se amplía la superficie efectiva de captación por metro cuadrado para la tecnología de tubo de vacío factor que sin embargo siempre estará por debajo de los colectores de placa plana (por metro cuadrado se capta menos pero se hace un uso más eficiente de lo captado)

### ESQUEMA DE CAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE CPC



### 3.3.1 Tubos evacuado simples

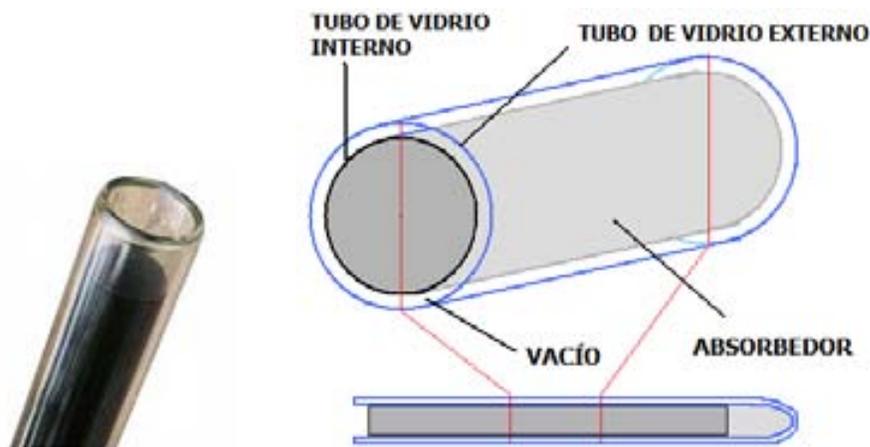
Este sistema es únicamente utilizado en calentadores solares termosifónicos. Son tubos evacuados ensamblados directamente con el depósito acumulador y que por lo tanto contienen agua.

En la pared interior del tubo evacuado se sitúa una capa de color oscuro de material absorbente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de material absorbente se transforma en calor y eleva la temperatura del agua que está en contacto con él.

El agua calentada se eleva por convección y comienza a ascender siendo reemplazada por agua fría que a su vez se calienta y reinicia el proceso.

Este tipo de tubo de vacío ofrece la ventaja de tener las ya comentadas escasas pérdidas de calor y los inconvenientes de ser muy sensible a la presión y de no ofrecer ninguna protección contra las bajas temperaturas no siendo posible su utilización en zonas con inviernos fríos sin la inclusión de un calentador eléctrico que caliente el agua del depósito cuando esta alcanza temperaturas muy bajas.

En caso de baja temperatura la dilatación del agua al congelarse puede reventar los tubos y arruinar el equipo.



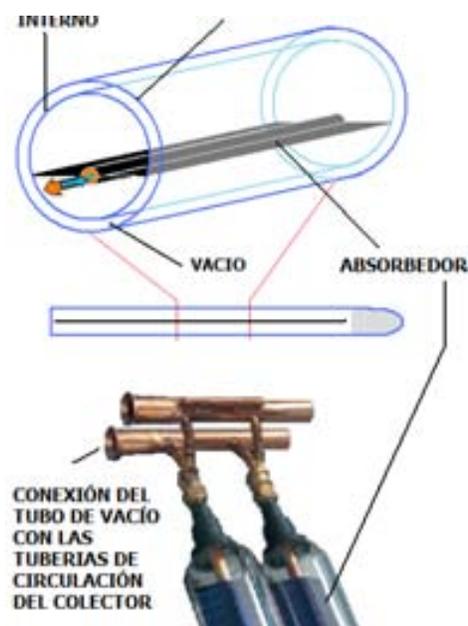
### 3.3.2 Tubo de vacío de flujo directo

Esta tecnología se emplea tanto para colectores excentos como para calentadores solares compactos con depósito integrado. Los colectores de tubo de vacío de flujo directo colocan en el interior del tubo evacuado una plancha de material absorbente adecuado que hace las veces de absorbedor transformando la radiación solar en calor. El absorbedor es recorrido en su superficie por un tubo con flujo directo en el que circula un fluido que eleva su temperatura en contacto con él.

Algunos colectores con esta tecnología aplican el sistema CPC alterando la forma del absorbedor que adopta una forma semicilíndrica para poder captar la energía solar de la forma más eficiente posible por la parte trasera.

Los colectores de tubo de vacío de flujo directo tienen la ventaja de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical sin mermar su rendimiento ya que el tubo puede rotar sobre su eje inclinándose el absorbedor de la manera más adecuada.

Tiene la ventaja además de ser utilizable en áreas frías ya que permite usar las estrategias contra la congelación de uso general en la energía solar térmica.

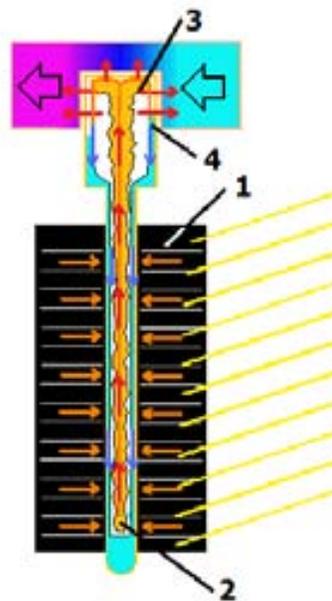


### 3.3.3 El tubo de vacío Heat pipe o tubo de calor.

**El tubo de calor** consiste en un tubo hueco cerrado por los dos extremos, sometidos a vacío y con una pequeña cantidad de fluido vaporizante (mezcla de alcohol) en su interior. Cuando se calienta la parte del tubo donde se encuentra el fluido, éste se evapora absorbiendo el calor latente de vaporización. Este vapor se desplaza hasta alcanzar la parte del tubo que se encuentra a menor temperatura, produciéndose allí su condensación y la consiguiente liberación del calor latente asociado a este cambio de estado. El líquido retorna por capilaridad o debido a la acción de la gravedad, en el caso de los colectores solares, y el ciclo evaporación-condensación se repite. Los tubos de calor son considerados como los “superconductores” del calor, debido a su baja capacidad calorífica y a su excepcional conductividad (miles de veces superior a la del mejor conductor sólido del mismo tamaño).

Las aplicaciones de los tubos de calor son extensas en la industria y basándose en esta tecnología bien establecida se fabrican los actuales colectores de vacío con tubos de calor. En este tipo de colectores la placa absorbente lleva adosado un tubo de calor. La radiación solar incidente calienta la placa y provoca la evaporación del fluido, absorbiendo calor y transfiriéndolo a la parte superior. Allí el vapor se enfría, en un condensador especialmente diseñado, al paso del agua fría de la red, cediéndole su calor latente de condensación. El fluido condensado retorna a su posición original en la parte interior del tubo de calor, debido a la acción de la gravedad, y el ciclo se repite.

**Esquema de funcionamiento de tubo de vacío**

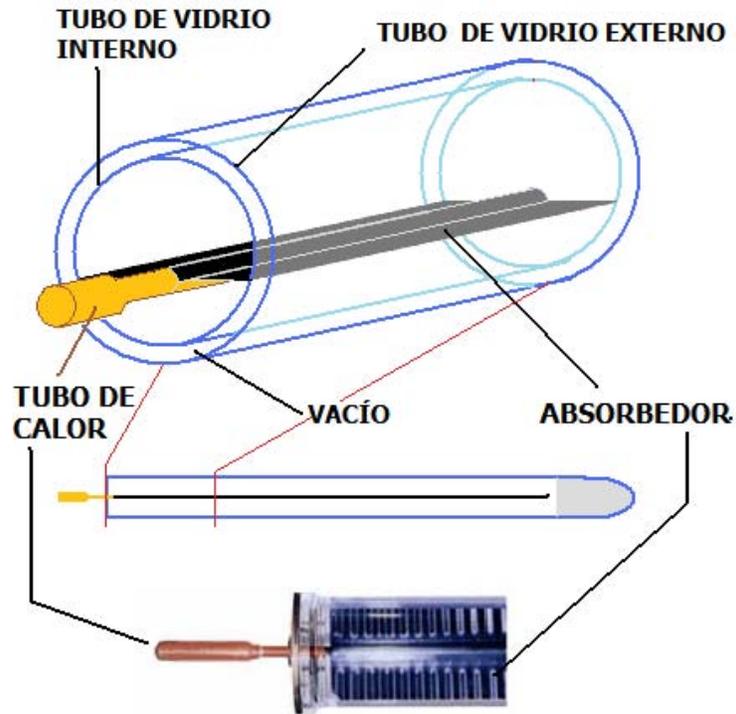


*1) La radiación solar incide en el absorbedor que se calienta y transmite ese calor al tubo. 2) el calor recibido provoca que el fluido en el interior del tubo se evapore y ascienda por tanta energía (calor latente) 3) El fluido evaporado cede su calor latente al fluido más frío que circula por el exterior de la cabeza del tubo y al hacerlo se licua 4) El fluido de nuevo en estado líquido cae por gravedad al fondo del tubo para reiniciar el proceso.*

Los colectores de tubo de vacío con tecnología heat pipe tienen la ventaja de no sufrir pérdidas por la noche ya que el proceso de transferencia de calor no es reversible (es decir el fluido caliente o el calor no puede pasar del acumulador al tubo y por lo tanto perderse). Además cada tubo es independiente pudiéndose cambiar en pleno funcionamiento del sistema. Es altamente resistente a las heladas.

Dado que también pueden girar sobre su eje los tubos, existe la posibilidad de que adopten posiciones verticales y horizontales al igual que ocurre en los sistemas de flujo directo aunque en este caso habrá que respetar una inclinación mínima del largo del tubo para permitir que el fluido una vez licuado pueda descender por gravedad.

En esta tecnología también se aplica el sistema CPC



Entre las características principales de los colectores de vacío con tubo de calor se destacan las siguientes:

- Unión seca: el intercambio de calor se realiza en seco, es decir, sin contacto directo de los líquidos, lo que los hace particularmente adecuados en áreas con cualidades desfavorables del agua.
- Función diodo: la transferencia de calor se realiza siempre en un solo sentido desde el absorbedor hacia el agua, y nunca al revés.
- Limitación de temperatura: el ciclo de evaporación-condensación tiene lugar mientras no se alcance la temperatura crítica del fluido evaporizante, evitando así los riesgos de un aumento incontrolado de la temperatura en el interior de los tubos.

### 3.4 Dimensionamiento y beneficios del uso de calentadores solares.

El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) realizó para Petróleos Mexicanos (Pemex) un estudio sobre los consumos de gas por usos finales en el sector doméstico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El estudio abarcó diversos conceptos: el consumo del gas en el calentador, en la estufa y en los pilotos; tiempos de utilización del agua caliente y temperaturas típicas para el baño y el lavado de manos y trastos. Los resultados se muestran a continuación:

- Número promedio de miembros por familia
  - 4.5 personas
  
- Estufa (incluye cuatro pilotos)
  - 7 horas 31 minutos de uso diarias
  - 2.05 lt. GLP/día o 62.35 lt. GLP/mes o 748.25 lt. GLP/año
  
- Pílogo de estufa (usualmente la estufa tiene más de uno)
  - 0.18 litros de gas LP/día o 5.47 lt. GLP/mes o 65.7 lt. GLP/año
  
- Gasto de gas en un calentador de GLP
  - Almacenamiento = 0.015 lt. GLP/min o 2.46 lt. GLP/día ó 74.97 lt. GLP/mes o 899.74 lt. GLP/año
  - Paso = 0.048 lt. GLP/min o 2.12lt. GLP/día o 64.56 lt. GLP/mes o 774.78 lt. GLP/año
  
- Mezcla de agua
  - Baño: 65% de caliente y 35% de fría
  - Lavado de manos, de trastos y lavadora de ropa: 50 y 50%
  
- Tiempos de uso, por día
  - Lavado de trastos: 23 minutos (34%)

- Lavado de manos: 5 minutos (6%)
- Lavado de ropa: 4 minutos (6%)

– **TOTAL: 68 minutos**

Tomando como base la información anterior y considerando que el gasto de agua caliente de acuerdo con los fabricantes del calentador de agua de almacenamiento es de 2.5 litros por minuto, se obtiene:

Consumo de agua caliente = 398 litros/día  
(68 min. x 9 lts. x 0.65% de agua caliente)

Tiempo que el calentador está encendido = 159 minutos/día (398 litros/día / 2.5 lts./min)

Consumo de gas = 1.33 kilos de gas LP/día  
(0.0083 kilos/min. x 159 minutos)

Lo anterior permite calcular el consumo de gas para calentamiento de agua, en una casa promedio, en los diferentes usos finales:

- El consumo de agua caliente por día, en una casa promedio, es de 398 litros:
  - Baño = 208 litros (46 litros/persona)
  - Lavado de trastos = 135 litros
  - Lavado de manos = 30 litros
  - Lavado de ropa = 25 litros

### ¿Cuál es el ahorro de gas al utilizar un calentador solar de agua?

El cálculo del ahorro en gas al utilizar un calentador solar, se realiza mediante tres pasos:

- 1° Se determina la cantidad de energía requerida, en volumen de agua caliente.
- 2° Se define el tamaño del colector solar y.
- 3° Se calcula el ahorro de gas.

Entonces, el usuario define, en litros, el volumen de agua que requiere calentar, a partir de la siguiente expresión:

$$L = (M) (C_p) (T_c - T_f)$$

Donde:

L = Cantidad de energía requerida en el agua caliente (kJ/día)

M= Cantidad de agua caliente requerida (lt/día)

C<sub>p</sub> = Calor específico del agua (4.2 kJ/kg °C)

T<sub>c</sub> = Temperatura del agua caliente requerida en el colector (50 °C)

T<sub>f</sub> = Temperatura del agua de la red pública (20 °C) –en el sitio–

Una vez calculada la energía requerida en el agua caliente, se determina el tamaño del colector solar plano de cobre, utilizando la siguiente fórmula:

$$A = \frac{L}{(\eta_{solar})(I_{m\acute{a}x})}$$

Donde:

A = Área del colector solar requerido (m<sup>2</sup>)

L = Cantidad de energía que debe contener el agua caliente (kJ/día)

η<sub>solar</sub> = Eficiencia del colector solar (%)

I<sub>máx</sub> = Radiación solar máxima diaria (kWh/m<sup>2</sup>/día) – en el sitio-

Una vez calculada el área del colector solar, se procede a determinar el ahorro anual de energía, utilizando la expresión:

$$A_e = \frac{(A)(I_{prom})(\eta_{solar})}{\eta_{boiler}}$$

Donde:

$A_e$  = Ahorro anual de energía (kJ/año)

$A$  = Área del colector solar plano ( $m^2$ )

$I_{prom}$  = Radiación solar promedio diaria ( $kWh/m^2/día$ )

$\eta_{solar}$  = Eficiencia del colector solar (%)

$\eta_{boiler}$  = Eficiencia del calentador de agua –boiler– (%)

Si suponemos un requerimiento de 150 litros de agua caliente por día (de 50°C iniciando a 20°C), una eficiencia del colector solar de 52% y del boiler de gas de 74% (típica-usado), una radiación solar promedio de 4.4 kWh/m<sup>2</sup>/día y máxima de 6.1 kWh/ m<sup>2</sup>/día (en el sitio donde se instala), se requerirán 6.8 millones de kJ/año, los cuales se logran con un colector solar de 1.65 m<sup>2</sup>.

Ahora, si consideramos que el poder calorífico del GLP es 26,727 kJ/lit.GLP, al utilizar un CSA se dejarán de consumir 254 lit.GLP/año.

Es de mencionarse que el tamaño del CSA se calculó con la irradiancia máxima –lo que asegura que en el mejor día se alcance a calentar el volumen máximo requerido de 150–, mientras que los ahorros se calcularon tomando la irradiancia promedio, lo que significa que no todos los días se llegue a calentar el volumen requerido. Esto implica que la diferencia resultante sea calentada con el sistema tradicional de calentamiento de agua mediante GLP o GN.

Para calcular el consumo total de gas, necesario para calentar 150 litros de agua al día, utilizamos la expresión:

$$Q_s = \frac{L}{\eta_{boiler}}$$

Donde:

$Q_s$  = Cantidad de calor que se consume en forma de combustible (GLP)

$L$  = Cantidad de energía para calentar el agua (kJ/día)

$\eta_{\text{boiler}}$  = Eficiencia del calentador de agua -boiler- (%)

Así, observamos que utilizando un calentador de gas a lo largo del año, el consumo será de 349 lt.GLP. Sin embargo, ya instalando el calentador solar de agua, el sistema de respaldo (boiler de gas) sólo consumirá la diferencia, es decir, 95 lt.GLP.

### **¿En cuánto tiempo recupero mi inversión?**

La pregunta que normalmente se hacen las personas cuando piensan adquirir un CSA, es en cuánto tiempo recuperarán su inversión. En este caso, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$T = \frac{C}{(A_e)}$$

Donde:

T = Tiempo de retorno de la inversión (en años)

C = Costo del sistema (pesos)

$A_e$  = Ahorro de energía (en pesos por año)

Si consideramos que el CSA cuesta \$5,000.00 ya instalado, es decir, \$2,500.00 por metro cuadrado y que el costo del litro de GLP es de \$4.86, el tiempo de recuperación de la inversión será de poco más de tres años. En este punto no olvidemos que la vida útil de estos equipos es de 20 a 25 años y, a la vez, tomemos en cuenta el incremento del precio del gas en el tiempo.

### **¿Cómo varía mi consumo de gas utilizando un calentador solar?**

El estudio del IMP indica que el consumo promedio de GLP en un hogar de la Ciudad de México es de 135 lt.GLP/mes, del cual el 46% se utiliza para cocción de alimentos y 54% para el aseo personal.

Con base en los datos anteriores, la reducción en el consumo por utilizar un calentador solar será de 21 lt.GLP/mes, que corresponden al aseo personal (baño) de tres personas, considerando 50 litros de agua diarios para cada una.

Cabe mencionar que, según el informe de Prospectiva de la SENER (Secretaría de Energía), en 2004 el GLP representó 90% de las ventas internas del sector residencial, mientras que al GN correspondió el restante 10%. Asimismo, las ventas del primero alcanzaron 11,880 millones de litros de GLP, los cuales fueron consumidos por 18 millones de hogares.

Lo anterior significa un consumo promedio por hogar de 660 lt.GLP/año, es decir, 55 lt.GLP/mes.

Un factor clave a considerar en las cifras antes mencionadas, es el hecho de que en la actualidad las estufas ya no cuentan con «pilotos», y si se considera que las antiguas tenían un promedio de tres «pilotos», el ahorro por este concepto es de 5.4 lt.GLP/mes.

La CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía) está promoviendo un estudio particularmente enfocado a los calentadores instantáneos sin piloto, por la reducción considerable que alcanzan en el consumo de gas ( $\pm 50$  a 70%).

Estudios de campo muestran que los ahorros en gas varían en función del tamaño de la familia, las actividades que realizan, etcétera.

A título de ejemplo, en la tabla 1 se muestran dos casos con usuarios con CSA: el usuario 1 corresponde a una familia de 2 personas, que salen a trabajar y no se encuentran en casa durante el día; mientras que el usuario 2 es una familia de 4 miembros, donde el ama de casa permanece todo el día y los niños en la tarde.

Mes	Usuario 1				Usuario 2			
	Consumo (litros)		Ahorro		Consumo (litros)		Ahorros	
	Sin colector	Con colector	Litros	Por ciento	Sin colector	Con colector	Litros	Por ciento
1	31	18	13	41	157	94	63	40
2	31	16	15	48	142	95	47	33
3	21	11	11	50	138	90	48	35
4	20	8	13	62	133	86	47	35
5	24	16	9	36	134	87	47	35
6	25	17	8	31	135	94	40	30
7	22	15	8	35	119	83	36	30
8	23	13	10	42	128	83	45	35
9	22	14	8	36	140	91	49	35
10	22	12	9	43	134	87	47	35
11	22	10	12	54	135	88	47	35
12	21	8	13	62	134	74	60	45
<b>Promedio</b>	<b>24</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>45</b>	<b>136</b>	<b>88</b>	<b>48</b>	<b>35</b>

## **CAPITULO 4 CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS.**

### **4.1 Definición de instalación solar térmica.**

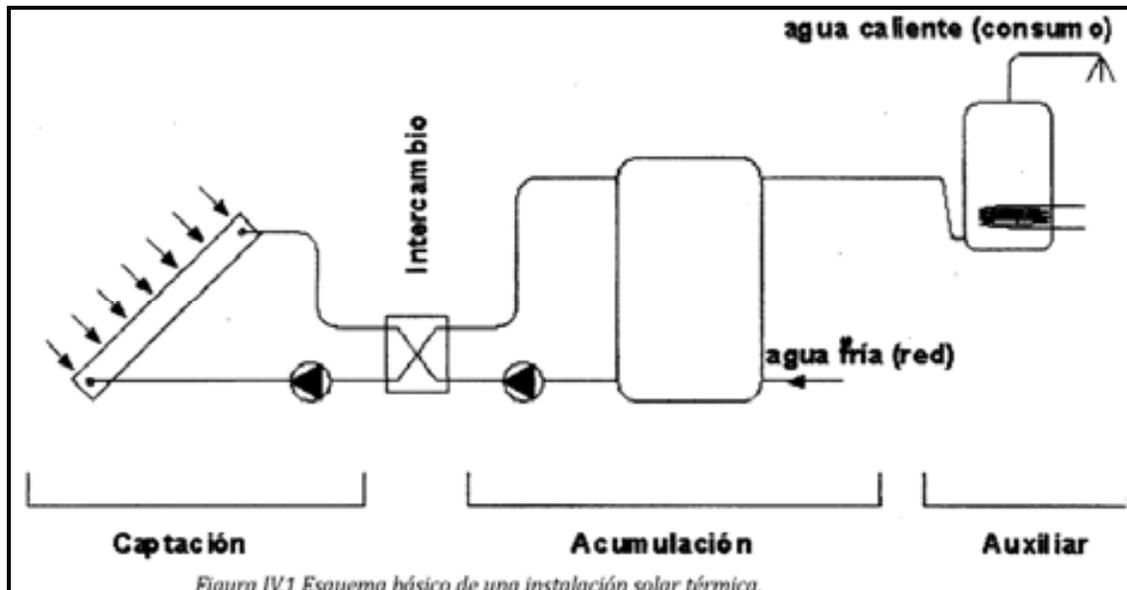
Una instalación solar térmica es un sistema de aprovechamiento de energía solar para la producción de agua caliente. Básicamente el funcionamiento de una instalación solar térmica es el siguiente:

- Captación de la energía radiante para transformarla directamente en energía térmica, con el aumento de la temperatura de un fluido de trabajo.
- Almacenamiento de dicha energía térmica, bien en el mismo fluido de trabajo de los colectores o bien transferida al agua de consumo para su posterior utilización.

En cualquier instalación solar térmica se denomina al circuito primario al circuito hidráulico formado por los colectores y las tuberías que se unen al acumulador; y es el encargado de recoger la energía térmica del colector y transferirla al acumulador solar directamente o a través de un intercambiador de calor.

Por el circuito secundario siempre circula agua de consumo. La transferencia de energía solar al agua del acumulador se realiza por la circulación del fluido contenido en el circuito primario. Este se calienta a su paso por los colectores y se enfría cuando pasa a través del sistema de intercambio, al transmitir el calor del agua de consumo. El agua caliente del sistema de acumulación queda almacenada y dispuesta para ser consumida.

Cuando la temperatura del agua caliente solar es inferior a la de consumo, sobre unos 45°C, el sistema de energía auxiliar se encarga de realizar el calentamiento adicional hasta alcanzar la temperatura deseada.



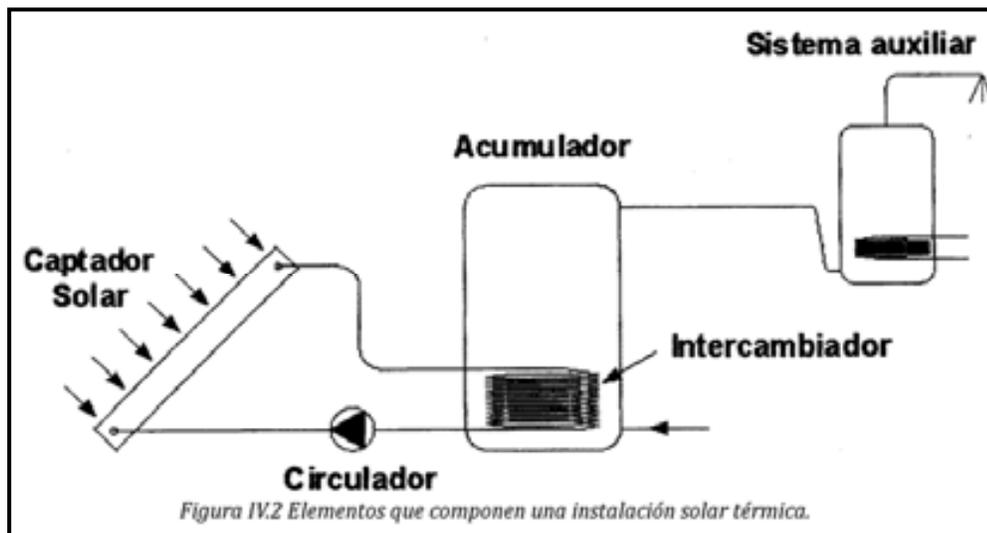
## 4.2 Componentes de una instalación solar térmica.

Una instalación solar térmica puede estar constituida por:

- Un sistema de captación formado por uno o varios colectores solares que transforman la radiación solar incidente en energía térmica de forma que se calienta el fluido de trabajo que aquellos contienen.
- Un sistema de acumulación constituido por un depósito que almacena el agua caliente hasta que se precise su uso.
- Un sistema de intercambio que realiza la transferencia de energía térmica captada desde el circuito de colectores o circuito primario, al agua caliente que se consume.
- Un circuito hidráulico constituido por tuberías, bombas, válvulas, etc., que se encargan de conducir el movimiento del fluido caliente desde el sistema

de captación hasta el sistema de acumulación y desde este a la red de consumo.

- Un sistema de regulación y control que fundamentalmente se encarga de asegurar el correcto funcionamiento del equipo, para proporcionar un adecuado servicio de agua caliente y aprovechar la máxima energía solar térmica posible. Por otro lado, puede incorporar distintos elementos de protección de la instalación.
- Adicionalmente los equipos suelen disponer de un sistema de energía auxiliar que se utiliza para completar el aporte solar suministrando la energía necesaria para cubrir la demanda prevista, garantizando la continuidad del suministro de agua caliente en los casos de escasa radiación solar o un consumo superior al previsto.



### 4.3 Clasificación de las instalaciones solares térmicas.

Existe un amplio número de alternativas de diseño dentro de todas las posibilidades de configuración que pueden darse en una instalación de energía solar térmica de producción de agua caliente, bien sea para usos sanitarios, o para apoyo en el calentamiento de elementos externos como piscinas o sistemas

de calefacción. De un modo general, las instalaciones solares térmicas pueden clasificarse atendiendo a los siguientes criterios:

- a) Principios de circulación
- b) Sistemas de intercambio
- c) Según la solución de integración con el sistema de energía auxiliar
- d) Según la aplicación

A continuación se desglosan las siguientes clasificaciones, que lleva a que cada sistema solar térmico se pueda englobar dentro de una de las categorías que se citan para cada sub-clasificación:

- a) Principio de circulación
  - Instalaciones por termosifón.- Fundamentalmente por convección natural.
  - Instalaciones por circulación forzada.- Fundamentalmente por accionamiento eléctrico de las bombas.
  
- b) Sistema de intercambio
  - Sistemas directos.- Fluido del circuito primario igual al agua de consumo.
  - Sistemas indirectos.- Intercambiador de calor entre circuito primario y de consumo.
  
- c) Según la solución de integración con el sistema de energía auxiliar
  - Sistemas centralizados en circuito solar y sistema de apoyo
  - Sistemas con circuito y acumulación solar centralizada y apoyo individual con sistema instantáneo.

- Sistemas de circuito solar centralizado y acumulación distribuida directa, con apoyo individual con sistema instantáneo.
- Sistema con circuito solar centralizado y acumulación distribuida indirecta, con apoyo individual con sistema instantáneo.

d) Según la aplicación

- Sistemas solares térmicos para la producción de agua caliente sanitaria.
- Sistemas solares térmicos para calentamiento de piscinas.
- Sistemas solares térmicos para apoyo a la calefacción.
- Sistemas solares térmicos para aplicaciones de refrigeración.

#### **4.3.1 Clasificación según el principio de circulación**

Esta clasificación se refiere al mecanismo mediante el que se produce el movimiento del fluido caloportador que circula en el circuito primario solar, pudiendo diferenciarse entre dos tipos:

- a) La circulación natural
- b) La circulación forzada

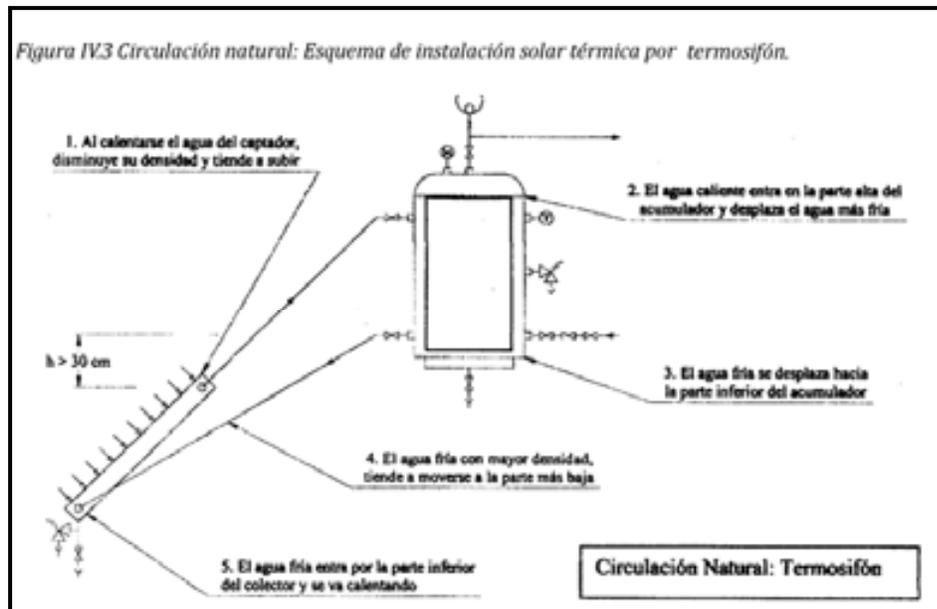
En las instalaciones de circulación natural, conocidas a nivel coloquial por termosifón, el fluido de trabajo circula por convección libre, mientras que en la circulación forzada se dota a la instalación con dispositivos auxiliares (bombas de circulación) que provoca la circulación forzada del fluido de trabajo.

- a) Instalaciones por termosifón.

En las instalaciones por termosifón, el movimiento del fluido de trabajo se produce por cambios de densidad del fluido, como consecuencia de variaciones en la temperatura. El fluido contenido en los colectores, al recibir la radiación solar, se calienta, aumentando su temperatura, y disminuyendo, por lo tanto, su densidad. Al pesar menos, dicho fluido se

desplaza hacia la parte alta del circuito, mientras que el fluido frío contenido en el depósito de acumulación, con mayor densidad, se desplaza hacia la parte baja de la instalación por la tubería de entrada al colector.

Así se genera una circulación del fluido que se mantiene siempre que exista un gradiente de temperaturas entre el fluido del colector y el del depósito de acumulación, y cesa cuando las temperaturas se igualan.



b) Instalaciones por circulación forzada.

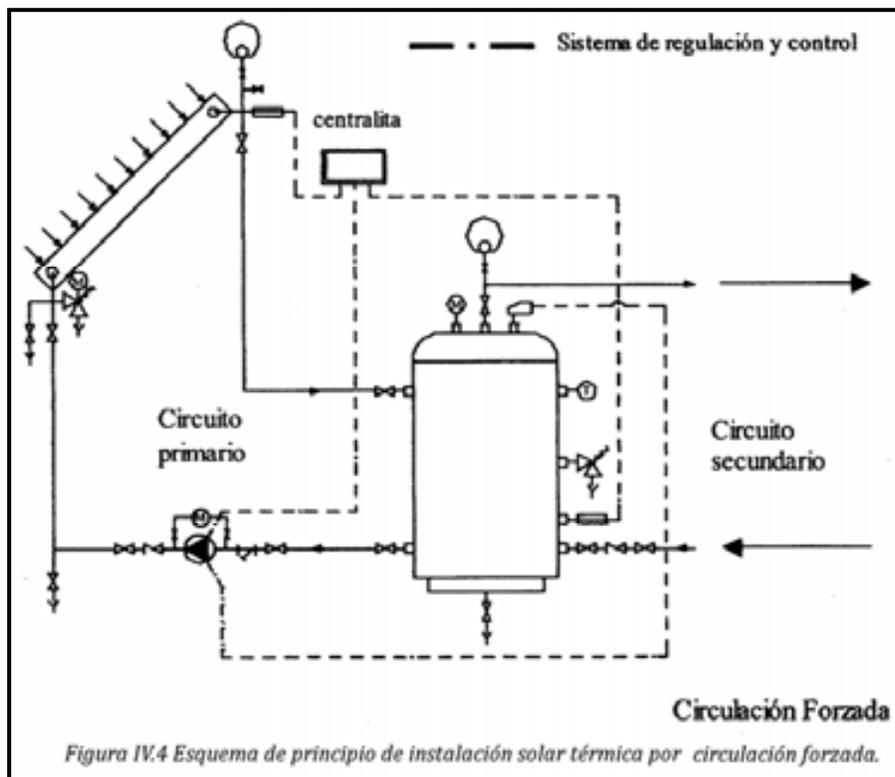
En las instalaciones por circulación forzada, el movimiento del fluido se realiza a través de una bomba de circulación, con un gasto que normalmente está en el rango del doble que los de termosifón y, por tanto, los saltos de temperatura en el fluido de los colectores suelen ser de unos 5°C.

En este caso, la regulación del sistema se debe efectuar por medio de un control diferencial de temperaturas, entre la parte inferior del depósito de acumulación y la salida del colector.

El control diferencial compara, mediante dos sondas, la temperatura existente en la salida de los colectores con la temperatura de la parte baja del depósito de acumulación.

Cuando la primera sea superior a la segunda en  $6^{\circ}\text{C}$ , se accionaran las bombas transfiriendo así la energía para almacenarla en el depósito de acumulación. Las bombas de circulación se paran cuando la diferencia de temperaturas entre ambas sondas sea de  $3^{\circ}\text{C}$ .

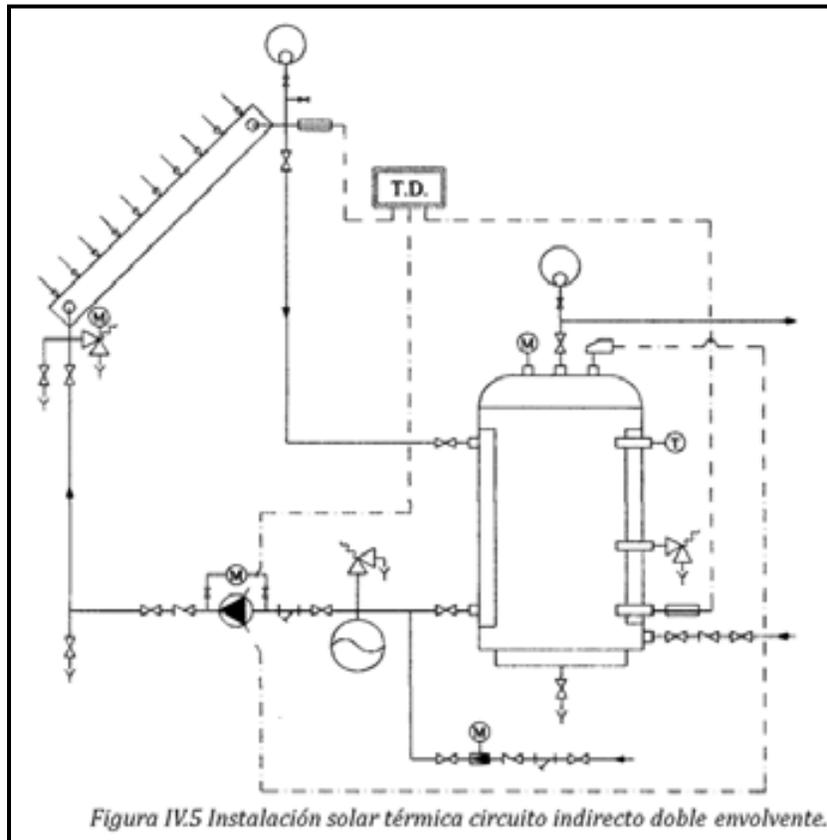
En este tipo de instalaciones podemos controlar la temperatura máxima que se alcanza en el interior del depósito de acumulación, ya que colocando un termostato de máxima temperatura, podemos parar las bombas de circulación antes de que alcance una temperatura excesivamente elevada.



### 4.3.2. Clasificación según el sistema de intercambio

Esta clasificación se refiere a la forma de transferir la energía del circuito primario de colectores al circuito secundario o de consumo.

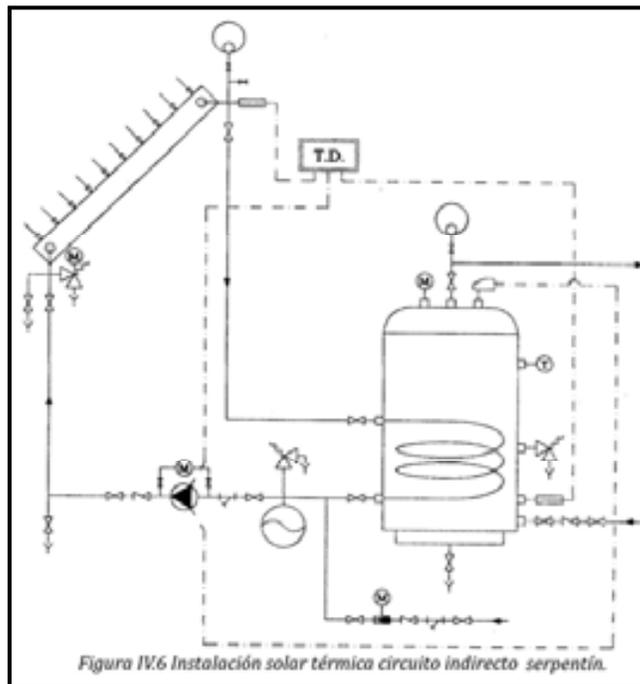
Dicha transferencia se puede realizar de forma directa, siendo el fluido de trabajo del colector la propia agua de consumo, dando lugar a los llamados sistemas directos o, manteniendo el fluido de trabajo de los colectores en un circuito independiente, sin posibilidad de ser distribuidos, dando lugar a los sistemas indirectos.



En los sistemas indirectos, la utilización de un intercambiador introduce una pérdida de rendimiento adicional en el proceso de transferencia de calor al depósito de acumulación que puede minimizarse con un dimensionamiento adecuado.

La utilización del intercambiador, está justificado porque puede eliminar los problemas que surgen en los sistemas directos por corrosiones, depósitos calcáreos, heladas y presiones elevadas en los colectores.

Cuando se utiliza un sistema directo, es fundamental asegurarse del uso de materiales compatibles entre sí y con el agua de consumo. El agua de red normalmente tiene un gran contenido de aire disuelto, y el oxígeno es el mayor responsable de la corrosión, tanto en los colectores como en el resto del circuito.



Los riesgos de corrosión en los colectores son mayores en los circuitos directos, pues la renovación de oxígeno es continuo. Este efecto se minimiza en un circuito indirecto, pues una vez que el oxígeno disuelto en el agua se haya consumido en el proceso de oxidación, la reacción de oxidación carecerá de combustible para seguir produciéndose.

De la misma forma, en los sistemas directos aumenta la presencia de suciedades, incrustaciones calcáreas, etc., que con el tiempo van empeorando el funcionamiento de los colectores, disminuyendo el rendimiento e incluso

anulándolos por completo, haciéndose necesario un control y conocimiento previo de la dureza y calidad del agua para la adecuada selección del sistema.

En el caso de los sistemas indirectos, estas incrustaciones quedan minimizadas, salvo en casos de frecuentes vaciados y renovaciones del fluido.

Para evitar el congelamiento del agua, es necesario prever un sistema de protección anti heladas. En los sistemas indirectos, esto se suele resolver fácilmente utilizando fluidos de trabajo con menor punto de congelación que la temperatura ambiente en la zona donde se vayan a utilizar, por ejemplo, añadiendo glicol al agua en un determinado porcentaje.

Finalmente, el último factor que justifica el uso de sistemas indirectos, es la presión a la que está sometida la instalación ya que en los colectores, o cualquier parte del circuito primario, no soporte la presión de red a la que estarían conectados sería necesario reducirla utilizando una válvula reductora de presión.

El circuito indirecto permite por el contrario definir presiones de trabajo independientes de la red en el circuito primario.

#### **4.3.3. Clasificación según la solución de integración con el sistema de energía solar.**

La creciente presencia de la energía solar térmica en el sector residencial ha provocado la adopción de esquemas de principio que, hasta el momento, no eran muy usuales en las instalaciones de energía solar térmica. Nos referimos a una serie de sistemas integrales de producción de agua caliente sanitaria en los que partiendo de una acumulación solar, centralizada o distribuida, alimentan con agua caliente o precalentada con un calentador de gas tipo modulante.

##### a) Acumulación solar y auxiliar centralizada.

El esquema tradicional de las instalaciones de preparación de agua caliente sanitaria, alimentada por energía solar, correspondiente a la disposición que se muestra en la figura IV.7.

Este sistema plantea, principalmente, dos problemas fundamentales cuando se trata de instalaciones ubicadas en edificios para uso residencial.

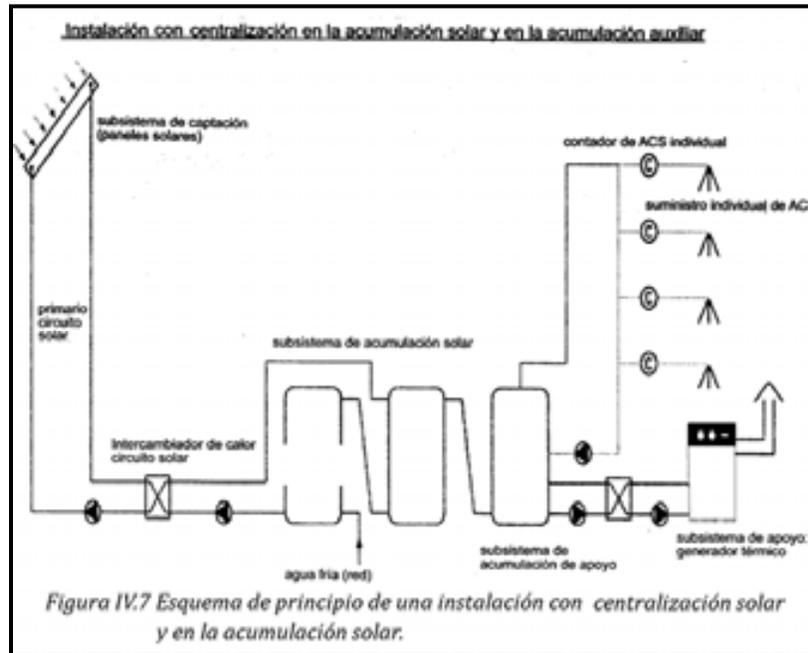
1.- Requiere de un mayor espacio común a utilizar, ya que debe disponer no solo del espacio necesario para utilizar la acumulación solar, sino que también debe disponer del espacio necesario para la acumulación del sistema auxiliar y para el calentador de gas.

2.- Presenta problemas a la hora de repartir el gasto entre los miembros de la comunidad, pues es muy difícil distinguir, del gasto de agua caliente sanitaria, cual ha sido generada con energía solar o con energía convencional.

3.- Los costos globales de la instalación son elevados, sobre todo incluyendo el del espacio necesario para ubicar la acumulación auxiliar y el calentador de gas.

4.- Además y aunque desde el punto de vista de rendimiento energético global la instalación completa se puede considerar la mas óptima (siempre que esté bien diseñada), hay que considerar que el impacto que produce, de cara al usuario individual, es negativo, puesto que se produce una pérdida de confort, basada fundamentalmente en el paso del servicio central al individual, lo que es visto como un retroceso en la comodidad para el cliente final.

5.- Otro inconveniente radica en que es necesario disponer de una acumulación auxiliar sobre la que trabaje el calentador de gas.



- b) Acumulación solar centralizada que alimenta a un calentador de gas natural individual de tipo mixto modulante.

Esta configuración podría considerarse la más adecuada para ser instalada en edificios, tanto por su simplicidad y bajo costo de instalación como por su rendimiento, desde el punto de vista del ahorro energético.

Se basa principalmente, en una centralización de la acumulación solar, que dota agua caliente sanitaria a cada uno de los calentadores de gas individuales ubicados en cada vivienda.

Cuando el agua entra al calentador de gas con una temperatura igual o superior a la del sistema, el calentador de gas no debe encenderse. En otro caso, el calentador de gas suministrara el déficit de calor necesario para que el agua caliente salga hacia el consumo a la temperatura requerida. De esta forma, se consigue un ahorro importante en la proporción del agua caliente sanitaria, ya que, en el caso más desfavorable, el agua entrara, en el calentador de gas, precalentada por efecto de los colectores solares.

Esta solución presenta las siguientes ventajas:

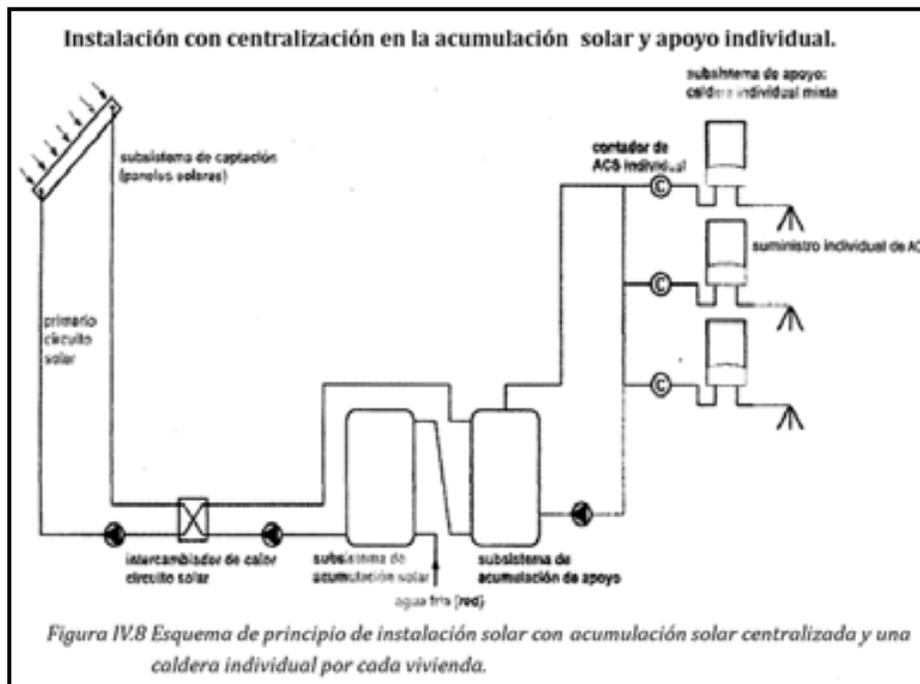
1.- No requiere de espacio común para la acumulación auxiliar ni para la caldera. La acumulación auxiliar no existe, ya que el agua es alimentada directamente, desde la acumulación solar hasta el calentador de gas individual.

2.- Si se emplea un calentador de gas modulante, preparado para el servicio con colectores solares térmicos, se consigue aprovechar, de manera óptima, el agua precalentada proveniente de los colectores solares, incluso en situaciones de baja radiación, estos calentadores, especialmente preparados para trabajar con colectores solares, deben cumplir con las siguientes características de diseño:

- Deben ser capaces de transportar el agua procedente del circuito secundario del sistema solar (o primario del auxiliar) a las temperaturas que corresponde, sin mezcla previa con agua fría de la red, y sin que se produzca arranque de quemador o bomba del equipo.
- Deben contar con sistemas de mezcla de aguas abajo, que produzca tanto una estabilidad de temperatura como la posibilidad de un mayor gasto de suministro, siempre que la energía disponible en la parte solar lo permita.
- Deben ser modulantes, para que cuando sea necesario que el sistema auxiliar apoye energéticamente al solar térmico, lo haga con un rendimiento adecuado y evitando costos de combustible innecesarios.

3.- El reparto de gastos por cada cliente es más sencilla y puede contabilizarse exactamente, la disponibilidad de agua caliente que proviene de la energía solar térmica, lo que resulta fundamental a la hora de repartir los gastos de mantenimiento y de operación de la instalación solar.

En la figura IV.8 se han incluido calentadores de gas modulantes, preparadas para servir de apoyo al sistema solar térmico. Puede verse que no es necesario realizar ningún enfriamiento previo del fluido de suministro y que el aporte de agua de red, después del paso por el calentador de gas, consigue, siempre que los equipos de mezcla dispongan de la calidad adecuada, una estabilización en la temperatura de servicio y, en el caso de que exista suficiente potencia en la parte solar, un incremento del gasto suministrado, si se compara con el máximo que por diseño puede aportar el calentador de gas mixto.



c) Acumulación solar distribuida que alimenta a un calentador de gas individual natural de tipo mixto modulante.

En este caso, existen dos opciones:

- Acumulación distribuida directa: Cuando el sistema primario solar llega hasta el intercambiador de cada uno de los acumuladores individuales. (figura IV.9)
- Acumulación distribuida indirecta: Cuando existe un sistema secundario solar que cuenta con una acumulación, que puede considerarse como un tampón, y es desde este secundario desde el que se realiza la cesión de calor a los acumuladores de cada vivienda. (figura IV.10)

Esta alternativa de acumulación distribuida es óptima, pero especialmente el caso directo, cuando es el sistema primario solar el que alimenta los interacumuladores individuales, evitando un segundo intercambio de calor, con la consiguiente pérdida de eficiencia de la instalación.

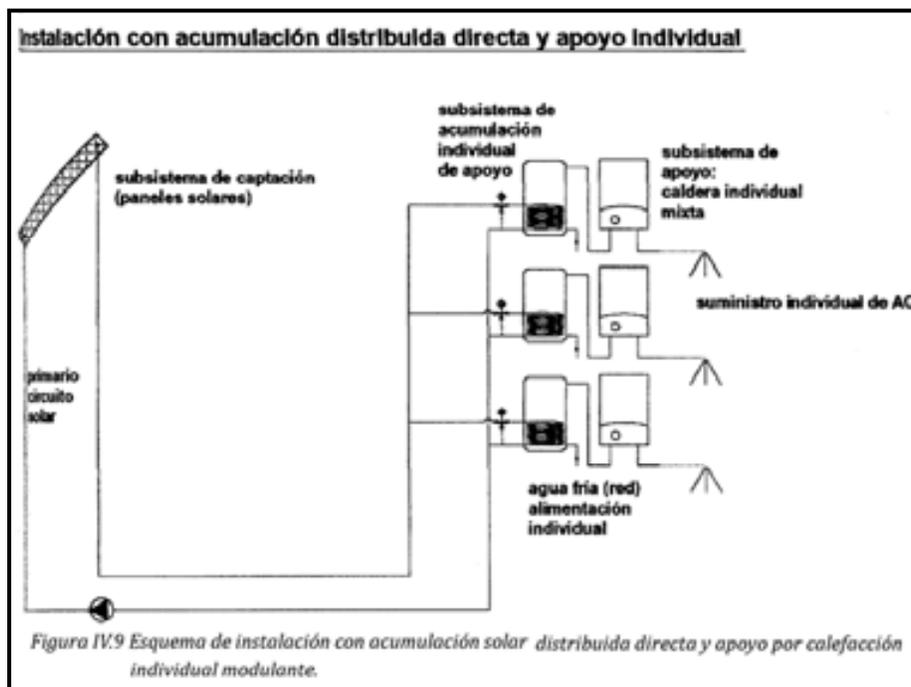
Es fundamental que cuando el agua entre al calentador de gas con una temperatura igual no debe encenderse. En otro caso, el calentador suministrara el déficit de calor necesario para que el agua caliente salga hacia el consumo a la temperatura de consigna.

Esta configuración presenta las siguientes ventajas:

1. No se requiere espacio colectivo, ni para la acumulación solar ni para la acumulación auxiliar (sería necesario en el caso de que se instalara un depósito tampón, en el caso de la acumulación distribuida indirecta).
2. En el caso de no contar con acumulación central, y con ello no haber producción central de agua caliente sanitaria, no sería necesaria la instalación de un contador de agua caliente sanitaria por vivienda, sería posible repartir los gastos de manera proporcional.

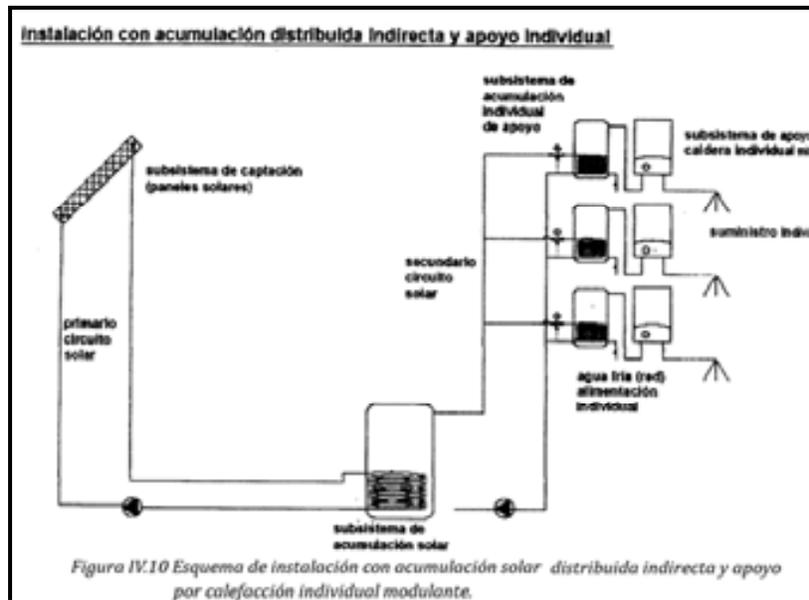
Entre sus inconvenientes principales destacan:

1. Dificultad para un control preciso de la instalación, en función del número de viviendas que se alimentan de la instalación solar.
2. Hay que disponer de un espacio adicional para la instalación de estos depósitos en el interior de la vivienda, si bien es cierto que podrían ubicarse estos acumuladores en alguna zona común de cada planta que usualmente resulta desaprovechada.



Al igual que en la figura IV.10, correspondiente al caso anterior, en este esquema se han incluido calderas especialmente preparadas para el apoyo solar térmico.

Siempre que no existiese el equipo de mezcla situado aguas debajo de la caldera, se incurriría en una pérdida de la mejora del confort que produce el incremento de gasto y la estabilización de temperatura de servicios.



#### 4.3.4. Clasificación según la aplicación.

La mayoría de las aplicaciones de la energía solar, particularmente las que proporcionan un servicio que se requiere de forma continua, es decir, no sólo cuando hay insolación, requieren al menos dos elementos que ya se han descrito anteriormente: un colector donde se transforme la energía solar en el efecto deseado y un sistema de almacenamiento, en donde se pueda tener una reserva del efecto deseado, para cuando no hay insolación.

##### a) Producción de agua caliente sanitaria.

En el caso de los sistemas de producción de agua caliente sanitaria, las temperaturas requeridas son del orden de 40 a 50°C. Esto implica que los colectores más adecuados, independientemente de otras ventajas que puedan tener, son los de placa plana. Como se ha mencionado anteriormente que una de las virtudes de los colectores planos es que no sólo capta la radiación directa, sino también la difusa. Esto significa que un calentador solar bien dimensionado puede trabajar satisfactoriamente no solo en los días soleados, sino en días medio nublados, siempre que la

irradiación total no caiga por debajo de ciertos límites y los usuarios no desperdicien el agua caliente.

Debido a que muchos usuarios prefieren el baño diario matutino, después de unas horas en las que no ha habido insolación, es necesario y práctico tener una reserva de agua caliente, considerando además, que en días muy nublados puede haber una baja significativa de la irradiación solar.

La energía solar térmica proporciona la mejor solución en preparación de agua caliente sanitaria para grandes consumos, como pueden ser hoteles, campings, balnearios, hospitales, y en definitiva, en aquellas instalaciones que requieren grandes consumos de agua caliente sanitaria. Con el uso de una reserva de agua caliente adecuada se logra satisfacer la demanda de agua caliente en más del 60% de los días del año.

Las instalaciones solares para la preparación de agua caliente sanitaria proporcionan un considerable ahorro en combustible. La gran viabilidad y versatilidad de la energía solar térmica la convierte en la solución más competitiva para este tipo de aplicaciones, ya sea mediante equipos compactos de termosifón o mediante pequeñas instalaciones por circulación forzada.

En climas benignos y, preferentemente, para instalaciones de tipo individual, los equipos compactos termosifón, en serie con un calentador de gas modulante, ofrecen la mejor solución para la preparación de agua caliente sanitaria en instalaciones con pequeños consumos.

Su principio de funcionamiento se basa en la circulación natural que provoca la diferencia de temperaturas en el fluido caloportador, al incidir sobre el colector térmico la radiación solar. Su simplicidad de funcionamiento, su escaso mantenimiento y bajo costo de instalación hacen

del compacto termosifón uno de las soluciones más competitivas del mercado solar.

Para lugares donde los inconvenientes que presenta el calentador solar por convección natural son importantes, existe otra alternativa; utilizar convección forzada, con esto se evita completamente la necesidad de que el termosifón esté a mayor altura que el colector. Podría incluso estar el colector en la azotea y el acumulador en el sótano

La otra desventaja, la congelación del agua en las tuberías, también puede eliminarse mediante un sistema de convección forzada, pero en este caso requiere de algún otro fluido de trabajo, o al menos agua con anticongelante. Debido a esto, no es posible utilizar la misma agua que se utiliza en el colector, y se requiere un intercambiador de calor, para transferir el calor del fluido de trabajo al agua.

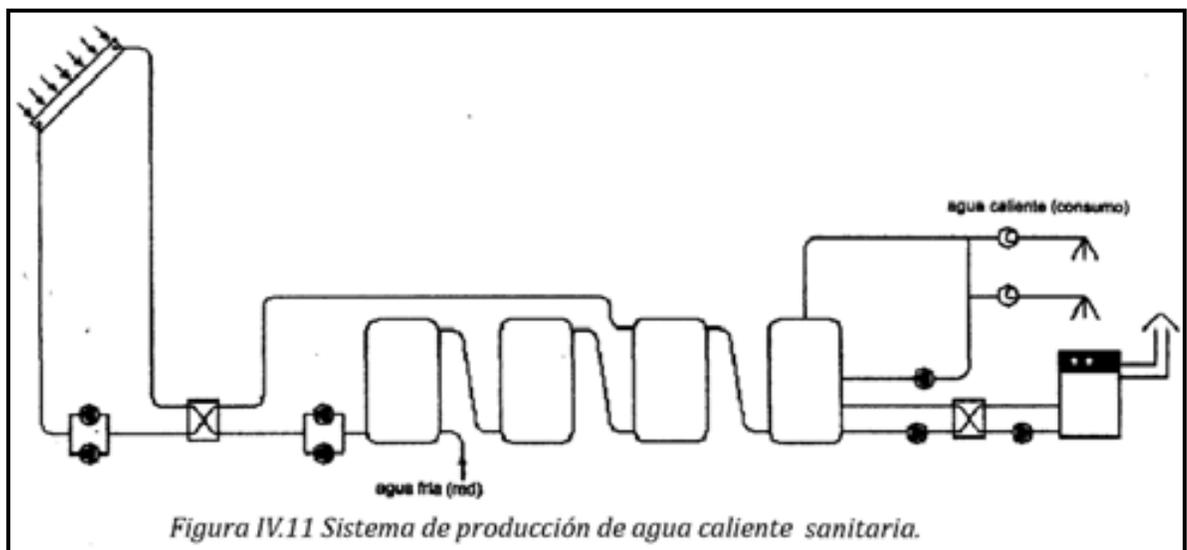
Otro elemento importante en un calentador por convección forzada es un termostato diferencial o control diferencial de temperatura para controlar la puesta en marcha y apagado de la bomba, según se requiera. Este termostato debe tener como mínimo un sensor a la salida del colector y otro en el acumulador, para que mande la señal de encendido a la bomba sólo cuando el colector se encuentre a una temperatura suficientemente mayor que la de acumulación. De otro modo, el colector podría funcionar enfriando y no calentando.

La instalación con circulación forzada está formada por los siguientes sub-sistemas:

1. Sub-sistema de captación.- Constituido por los colectores térmicos, que van a ser los encargados de recibir la radiación solar.

2. Sub-sistemas de intercambio.- Encargado de transferir calor desde el circuito de colectores hasta el circuito secundario de acumulación solar.
3. Sub-sistema de almacenamiento.- Formado por un número de depósitos conectados en serie con una acumulación cercana al consumo diario de la instalación.
4. Sub-sistema de control.- Realiza las labores de encendido y apagado de la instalación solar, en función de la diferencia de temperaturas entre el campo de colectores y la sonda situada en la parte más baja del primer acumulador solar y de la temperatura en la zona más alta del último de depósitos solar.

En este caso, la unión del último depósito solar con el sistema auxiliar se realizara, preferiblemente, en serie y, de ser posible, sobre los depósitos de acumulación sobre los que trabaje el calentador de gas.



b) Calentamiento de piscinas.

Normalmente las instalaciones serán mixtas, es decir, dedicadas a la producción de agua caliente sanitaria y el calentamiento del agua de la piscina.

Las instalaciones solares para la preparación de agua caliente sanitaria y calentamiento del agua de piscinas proporcionan un considerable ahorro de combustible. Los requerimientos de temperatura de una piscina van, dependiendo de su uso, desde los 22°C en una piscina deportiva hasta los 30°C en una piscina para niños.

Para las piscinas cubiertas, la temperatura seca del aire del local será entre 2°C y 3°C mayor que la del agua, con un mínimo de 26°C y un máximo de 28°C y la humedad relativa del ambiente se mantendrá entre el 55°C y el 70°C, siendo recomendable escoger el valor de diseño de 60%.

Dado el importante volumen con el que nos encontramos, mantener el agua dentro de estos límites requiere de grandes cantidades de energía.

Debido a esta y al constante incremento de precios de la principal fuente de energía empleada, los hidrocarburos, muchos de los usuarios de sistemas tradicionales (calderas y/o calentadores de gas) para el calentamiento de sus piscinas han dejado de utilizarlos.

Para las piscinas cubiertas siempre será necesario realizar un calentamiento del agua contenida en la fosa. Cuando se trate de piscinas descubiertas, si no cuentan con algún tipo de calentamiento auxiliar solo tienen una temperatura confortable en algunos meses del año, y rara vez se encuentran lo suficientemente tibia durante la tarde o muy temprano, por la mañana.

Esto ha traído como consecuencia que se tenga que buscar nuevas alternativas de uso de energía y se ha encontrado que el uso de la energía solar encuentra aquí un campo de aplicación muy interesante, ya que la utilización de la energía solar en forma adecuada y eficiente puede suministrar toda la energía que se necesita para mantener la temperatura de la piscina dentro de un rango aceptable.

Esta es una de las pocas aplicaciones en donde el costo del equipo es equiparable con el de los sistemas tradicionales. Si también se toma en cuenta que la energía solar es gratuita y que no contamina, la opción por el uso de energía solar para el calentamiento de piscinas se hace mucho más atractiva e interesante.

Debido a las bajas temperaturas de operación de estos sistemas (20-30°C), se pueden utilizar colectores de energía solar muy sencillos, con tratamiento de pintura negra cuando se trate de una zona con buenas condiciones de irradiación.

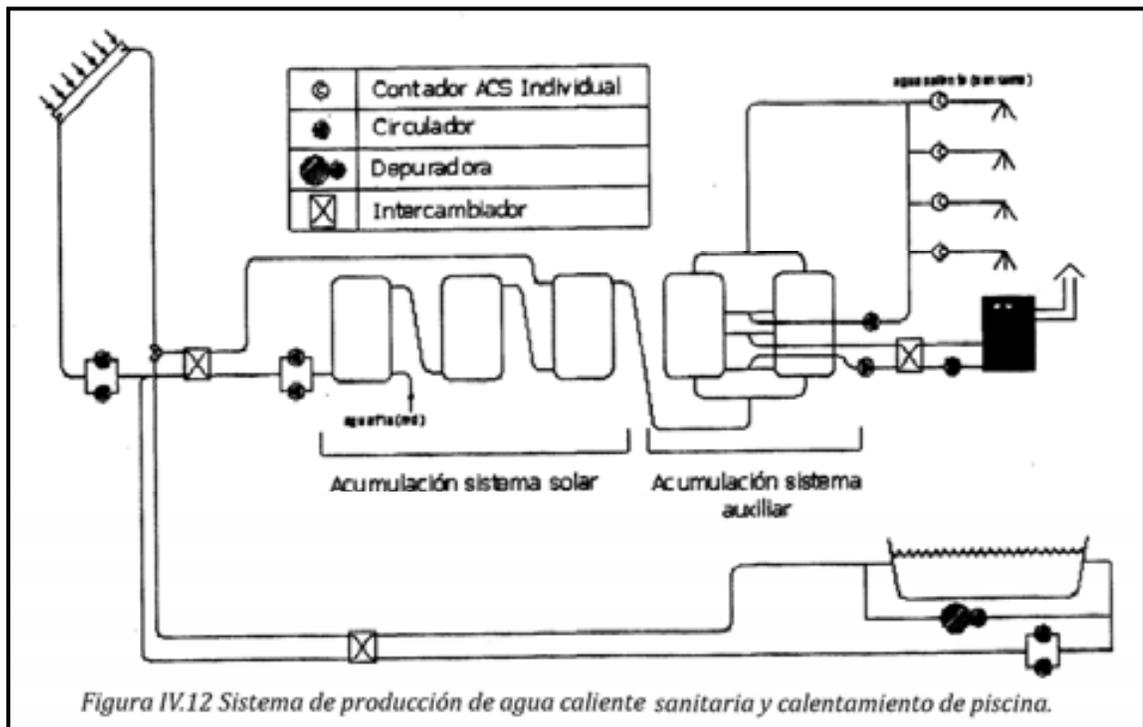
La forma más recomendable de afrontar estas instalaciones es mediante la utilización conjunta del campo de colectores para cada una de las aplicaciones, estableciendo prioridad entre la preparación de agua caliente sanitaria y el calentamiento de la piscina.

El sistema solar para calentamiento de piscinas cuenta con los siguientes sub-sistemas:

1. Sub-sistema de captación.- Constituido por los colectores térmicos, que van a ser los encargados de recibir la radiación solar.

2. Sub-sistemas de intercambio.- Encargado de transferir calor desde el circuito de colectores hasta el circuito secundario de acumulación solar.
3. Sub-sistema de almacenamiento.- En este caso, constituido por la fosa de la piscina.
4. Sub-sistema de control.- Realiza las labores de encendido y apagado de la instalación solar, en función de la diferencia de temperaturas entre el campo de colectores y la sonda situada en la parte más baja del primer acumulador solar y de la temperatura en la zona más alta del último de depósito solar o en retorno de la piscina.

La conexión del sistema auxiliar con el sistema solar, en el caso del calentamiento del agua de la piscina, se hará preferiblemente en paralelo. (Figura IV.12).



El elemento fundamental de la instalación solar es el colector solar que en la mayoría de los casos, cuando se encuentra protegido por una cubierta transparente, basa su principio de funcionamiento en el efecto invernadero. En consecuencia, es fundamental conocer las partes de qué consta, qué criterios hay que seguir para su elección y qué alternativas presenta.

## **CAPITULO 5 TENDENCIAS DE LOS COLECTORES SOLARES.**

### **5.1 Aspectos generales del análisis de mercado.**

En México existe un gran potencial para el desarrollo de la energía solar como una fuente alternativa, ya que cuenta con una radiación promedio de alrededor de 5 kW/m<sup>2</sup>/día. Sin embargo, hasta ahora no se han dado las condiciones para facilitar su uso, principalmente debido a dos razones: la falta de mecanismos de financiamiento adecuados para los costos de inversión relativamente altos y el precio del gas que se ha mantenido relativamente bajo, lo que ocasiona que la inversión en los equipos no se recuperaba en el corto plazo. En este sentido, la tendencia al alza de los precios del gas en últimas fechas permite suponer que esta situación se está revirtiendo.

En el sector doméstico mexicano, la tecnología predominante para el calentamiento de agua es el calentador a base de gas, y sólo unos cuantos utilizan electricidad. Se estima que de las 25.5 millones de casas que hay en el país, 20 millones cuentan con suministro de gas.

Sin embargo, sólo 13 millones de ellas tienen un calentador de agua. Por otro lado, según informes de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), tan sólo 75,000 viviendas cuentan con un calentador solar de agua. La instalación de calentadores solares hasta el año 2004, incluyendo no sólo el sector residencial sino también los sectores industrial y comercial, había alcanzado los 643,000 m<sup>2</sup> lo que equivale a 321,000 unidades, aproximadamente, si se toma en cuenta que cada equipo cuenta con 2 m<sup>2</sup> de superficie.

El sector con mayor éxito de penetración de los calentadores solares de agua ha sido el de calentamiento de albercas.

Los recientes incrementos en el precio del gas natural y el gas L.P. han abierto una ventana de oportunidad para incrementar las aplicaciones que permitan la sustitución de combustibles fósiles por alternativas más económicas y ambientalmente más favorables, con beneficios tanto en la economía familiar como a nivel macroeconómico. La adquisición de un calentador solar de agua (CSA) permitiría en cada casa un ahorro importante, a largo plazo, en el consumo de gas natural o L.P. y, a nivel nacional, disminuiría el consumo de recursos fósiles en el sector residencial.

Los beneficios ambientales del uso de calentadores solares de agua incluyen dos vertientes: las de carácter local, que generan reducciones en emisiones de productos de la combustión, como los óxidos nitrosos (NOx) y monóxido de carbono (CO), y los beneficios ambientales globales derivados de menores reducciones de emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Además, a menor consumo de combustibles, disminuyen también las potenciales fugas y, las emisiones de estos compuestos hidrocarburos que pueden contribuir a la formación de ozono troposférico mediante procesos fotoquímicos.

Equipos importados representan un número muy importante de las ventas nacionales de calentadores solares de agua, debido a la producción a pequeña escala de dichos equipos por fabricantes nacionales. La mayoría de las ventas son de contado y las que son con facilidades las ofrecen directamente los fabricantes o distribuidores. Sin embargo, tendencias actuales en el sector bancario sugieren que otras fuentes de financiamiento existentes podrían resultar más atractivos para la compra de calentadores solares de agua.

En años recientes se ha observado un rápido incremento en la emisión de créditos hipotecarios, de tal manera que el crecimiento en la actividad de este segmento del mercado financiero, ha alcanzado el crecimiento del crédito para el consumo. En cuanto al crédito para el consumo, aún y cuando las compras de

equipos a crédito es una práctica común que se ha consolidado en los últimos años, las tasas de interés se mantienen relativamente altas.

El análisis financiero practicado por Eenergy indica que la mejor opción es incluir el costo del calentador solar de agua como parte del crédito hipotecario al adquirir una vivienda. En efecto, si se toma el pago mensual del crédito hipotecario junto con la factura del combustible utilizado, el pago total con calentador solar de agua está ligeramente por debajo del pago de la hipoteca y el combustible juntos sin calentador solar de agua.

Comparación del gasto mensual ligado a la hipoteca utilizando diferentes tipos de calentadores

Bien adquirido con hipoteca INFONAVIT	Valor de la vivienda tipo (pesos)	Monto de la hipoteca (pesos)	Plazo de pago	Pago mensual de la hipoteca (pesos)	Ahorro mensual en consumo de combustible (pesos)	Costo real de la hipoteca al mes (pesos)
Casa con calentador de agua LPG y CSA	400.000	409.200*	20 años	4.212	- 102	4.110
Casa con calentador de agua LPG	400.000	400.000*	20 años	4.129	0	4.129

Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 2.

Sin embargo, esta situación puede variar en el corto plazo, y depende principalmente de las siguientes variables: del precio del gas, de las tasas de interés comercial, y de los precios de los equipos. La alternativa con calentador solar de agua resulta más atractiva, si se presenta cualquiera de los siguientes escenarios: el precio del gas sube; las tasas de interés comercial bajan; o los precios de los equipos se reducen al crecer el mercado. Es de mencionarse que, buscando un análisis extremo, el precio del equipo mostrado en la siguiente tabla es relativamente alto.

Sin embargo, el tiempo de recuperación de la inversión en un calentador solar de agua, la cual resulta rentable en todas las alternativas que fueron analizadas, varía entre 2.5 y 8 años. Más adelante se presenta un análisis de sensibilidad bajo diferentes costos de equipo.

El estudio también incluyó la evaluación de diferentes alternativas tecnológicas de ahorro, además de la solar, para el calentamiento de agua residencial. Las alternativas que se evaluaron fueron el calentador de paso térmico y el calentador de paso eléctrico. En cada caso, se compara la alternativa tecnológica con un calentador convencional, tanto él de gas LP y gas natural, y para simplificar, se consideró el caso de compra al contado solamente. Al igual que en la sección anterior, los resultados de la evaluación tecnológica son muy dependientes del precio del gas y de la energía eléctrica. Se observa que lo atractivo del calentador de paso eléctrico estriba en parte por el precio subsidiado de la electricidad para algunos consumidores. En las condiciones actuales y tomando en cuenta únicamente los resultados económicos, parecería que los calentadores de paso sí generan ahorros y representan una opción más atractiva comparado con la compra al contado de un calentador solar de agua, sin embargo los ahorros generados por los calentadores de paso son relativamente limitados en comparación con los ahorros provocados por el uso de un calentador solar de agua financiado por una hipoteca.

Resultados del análisis financiero de alternativas tecnológicas a un calentador a gas convencional

Alternativa tecnológica	Ahorros en combustible por año		VPN de 10 años (pesos)		Recuperación de la inversión* (años)	
	LPG (kg)	Gas (m <sup>3</sup> )	LPG	Gas	LPG	Gas
Calentador de paso térmico (83-84% de eficiencia práctica)	23.23	26.27	-\$650.00	-\$795.00	7.99	8.83
Calentador de paso eléctrico	195.15	242.25	Tarifa actual baja (\$1.50/kWh)		4.59	7.48
			\$1,800.00	-\$1,479.00		
			Tarifa actual alta (\$2.00/kWh)		5.43	9.54
			\$571	-\$2,707		
		Tarifa sin subsidio (\$2.50/kWh)		6.56	12.33	
		-\$657	-\$3,935			
CSA (compra de contado)	LPG (kg)	Gas (m <sup>3</sup> )	LPG	Gas	LPG	Gas
	140.77	174.74	-\$518.00	-\$2,560.00	5.98	7.55
CSA (Hipoteca Infonavit)	LPG (kg)	Gas (m <sup>3</sup> )	LPG	Gas	LPG	Gas
	140.77	174.74	\$2,594	\$229	2.55	6.43

\* Se utilizó fórmula de Recuperación de la Inversión simple es decir sin usar tasa de descuento.

Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 4.

Además, existen importantes desventajas técnicas (como eficiencia decreciente y mayor necesidad de mantenimiento) y ambientales (fuente de la energía eléctrica) así como riesgos económicos (volatilidad de precios de los combustibles) asociados con las alternativas de paso que no se tienen con los calentadores solares de agua. La evaluación de los diferentes escenarios indica que en ciertas condiciones los calentadores solares pueden representar una muy buena alternativa si se toman en cuenta también los demás factores.

Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas tecnológicas

	Calentador de paso térmico	Calentador de paso eléctrico	CSA
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor costo del equipo de todos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor ahorro económico que CSA</li> <li>Eficiencia es relativamente constante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costo de operación es fijo y no está vinculado a fluctuaciones en precios de combustible o electricidad</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencia puede disminuir considerablemente con el tiempo</li> <li>Impactos ambientales</li> <li>Requiere mayor mantenimiento que CSA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costo de operación dependiente de precio de energía eléctrica</li> <li>Impactos ambientales asociados a la fuente de energía eléctrica</li> <li>Requiere mayor mantenimiento que CSA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costo del equipo más alto de todos</li> <li>Se requiere de alguna forma de financiamiento para que su adquisición sea atractiva al consumidor común</li> </ul>

Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 4.

La información recolectada para este estudio junto con los resultados obtenidos de los análisis, sirvieron de base para desarrollar cuatro propuestas de modelos para la promoción de venta de calentadores solares de agua en el sector residencial. Los modelos propuestos fueron categorizados por su tiempo de implementación en opciones de corto (A), mediano (B) y largo (C) plazo y son:

- **Modelo A.1 “Vinculación con desarrolladores de vivienda”:** consiste en hacer participar a los promotores / constructores de viviendas nuevas como agentes de venta de los calentadores solares de agua. De esta forma se podría tratar de incluir el costo del calentador solar de agua en la hipoteca de la vivienda adquirida.

- **Modelo B.1 “Vinculación con distribuidores de gas LP”:** contempla la promoción de ventas de calentadores solares de agua en el segmento de la vivienda existente mediante el equipo de venta de los distribuidores de gas LP
- **Modelo B.2 “Financiamiento a través de distribuidoras de gas natural”:** asume el interés de las empresas en el sector energético de diversificar sus productos de venta. Por tal motivo se pueden utilizar a las distribuidoras de gas natural como agentes de venta de calentadores solares de agua y cobrar el costo del equipo a plazos por medio de la factura de gas natural para otros usos en la vivienda.
- **Modelo B.3 “Financiamiento por tiendas departamentales”:** consiste en que así como las tiendas departamentales ofrecen equipos de línea blanca, también podrían de manera similar ofrecer equipos de calentadores solares de agua.
- **Modelo C.1 “Garantías financieras para fabricantes/distribuidores de calentadores solares de agua para venta directa al público”:** propone un mecanismo por el cual los fabricantes/distribuidores obtengan financiamiento comercial el cuál puedan pasar al cliente posteriormente. Este financiamiento comercial podría obtenerse por medio de garantías emitidas por alguna institución especializada.

Como parte del estudio se llevó a cabo una evaluación de los diferentes modelos. Para poder realizar la comparación, el equipo de Econergy, junto con representantes de CONAE, SENER y GTZ definieron un conjunto de criterios de evaluación. Asimismo, se desarrolló un sistema de puntuación para indicar el grado de alineamiento de los modelos con los criterios.

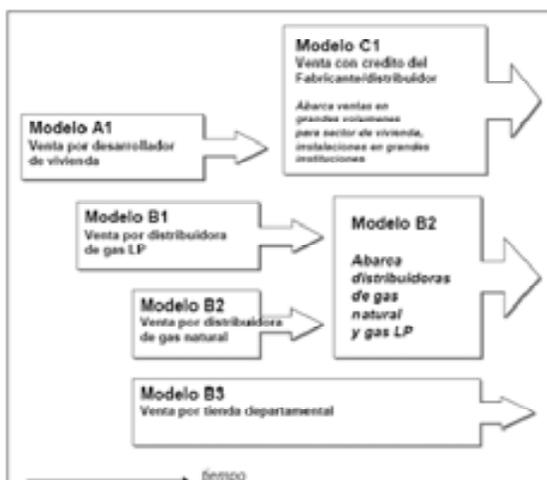
Los valores de puntuación se asignaron de la siguiente manera: 0 puntos si no se cumple con el criterio, 1 punto si se cumple de manera moderada y 2 puntos si se cumple de manera satisfactoria. Debe mencionarse que, aún y cuando este

modelo permite evaluar las alternativas de promoción de los calentadores solares de agua, sus valores pueden verse influenciados en forma significativa ante el cambio de cualquiera de las variables; Sin embargo, su importancia radica en que el modelo relaciona y sugiere estar alerta, a las variables que tienen un mayor impacto. Los resultados obtenidos indican que las alternativas A1 y C1 serían las más factibles para superar la barrera financiera y las que podrían originar mejores resultados, aunque en horizontes de implementación distintos: el modelo A1 para vivienda nueva a corto plazo, el modelo C1 para vivienda existente a largo plazo.

Evaluación de modelos para promoción de CSAs

	A1 Vinculación con desarrolladores de vivienda	B1 Vinculación con distribuidoras de gas LP	B2 Financiamiento por distribuidoras de gas natural	B3 Financiamiento por tiendas departamentales	C1 Garantías financieras para fabricantes/distribuidores
Eficacia	2	1	1	1	2
Sencillez	1	2	1	1	2
Costo de ejecución	1	1	1	1	0
Escalabilidad	2	2	2	2	2
Potencial de éxito	1	N/D	N/D	N/D	1
Sostenibilidad	2	1	1	1	2
Apoyo de fabricantes	2	N/D	N/D	N/D	1
Costo (Subsidio)	2	2	1	1	1
Aplicabilidad	2	2	2	2	2
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>13</b>

Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 6.



Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 6.

Tras analizar los resultados de la evaluación de los diferentes modelos y de acuerdo a la disponibilidad de información, se decidió realizar una estimación de los posibles impactos en ventas de calentadores solares de agua y reducciones de gases de efecto invernadero que podría tener la implementación del modelo A.1 y del modelo B.1. Para los modelos A.1 y B.1 se contempló un horizonte de implementación de 5 años, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

**Estimado de impacto en ventas y ambiental del programa a cinco años**

	Modelo A1	Modelo B1	Total
Ventas de CSAs (unidades)	38,995	17,768	56,763
Reducciones promedio de GEI (tCO <sub>2</sub> e)	14,764	7,336	22,100
Colectores instalados (m <sup>2</sup> )	77,990	35,536	113,526

*Fuente:* Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 7.

Desde el punto de vista ambiental, el uso de calentadores solares de agua en lugar de calentadores tradicionales de gas, tiene como beneficio la disminución de gases de efecto invernadero. Como tal, existiría la posibilidad de que un programa que promueve la adquisición de calentadores solares pueda ser considerado como un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) bajo el esquema del Protocolo de Kyoto. Lo anterior es posible solo si se cumplan con los requisitos establecidos para el desarrollo de proyectos MDL y que se alcancen unas ventas anuales considerablemente superiores a las estimadas en este estudio. Algunos cálculos preliminares indican que posiblemente se necesitarían como mínimo ventas anuales de 50,000 unidades de calentadores solares de agua para que se pueda contemplar seriamente como un potencial proyecto MDL.

Por otro lado, a pesar de que el modelo C.1, consistente en la venta de calentadores solares de agua con crédito del fabricante podría tener un impacto importante, las condiciones actuales del mercado no permiten su implementación en el corto ni mediano plazo. Por lo tanto, es difícil determinar los valores de los parámetros que permitan la estimación de su impacto.

Finalmente, a continuación se presenta la propuesta de los pasos a seguir para incrementar el uso de calentadores solares de agua mediante el modelo que se identificó con mayor posibilidad de éxito. Para el Modelo A.1, Venta por el desarrollador de la vivienda, el plan propone involucrar a diferentes participantes: promotores de vivienda y fabricantes/distribuidores de calentadores solares de agua, con las siguientes etapas:

1. Organización de seminario sobre calentadores solares de agua (uso, ventajas, costos, etc.) para el sector de la vivienda
2. Formalizar acuerdo con al menos un promotor de vivienda para iniciar la implementación del programa
3. Facilitar el acuerdo comercial entre promotores de vivienda y fabricantes/distribuidores de calentadores solares de agua
4. Diseñar cursos de capacitación y preparar material de promoción para agentes de ventas de viviendas
5. Diseñar canal de comunicación entre agentes de ventas de vivienda y demás participantes en el programa
6. Organizar seminario para evaluación del programa en un lapso de un año o un año y medio para conocer resultados

## **5.2 Sector de construcción de la vivienda**

Un análisis de las posibilidades de crear un mecanismo financiero para promover el uso de calentadores solares de agua en el sector residencial, forzosamente tiene que considerar ciertas características del sector de la vivienda en el país y los mecanismos de financiamiento disponibles. Por ende, Econergy

México ha establecido contacto con varios promotores y desarrolladores de proyectos de la vivienda, además, ha analizado información sobre el sector de vivienda y los mecanismos de financiamiento para la adquisición de casas residenciales.

Para fines prácticos y como primer paso, se acotó el universo del mercado de la vivienda a los segmentos de interés que conciernen a este trabajo. En 2005 se construyeron entre 700,000 y 800,000 viviendas en México. De éstas, un poco menos de la mitad fueron construidas por las mismas personas que las habitarían. Este mercado, denominado de la autoconstrucción, es financiado generalmente con recursos provenientes de las remesas de trabajadores en el extranjero, lo que implica un mínimo de financiamiento con deuda. La parte restante (alrededor de 400,000) del universo total de viviendas construidas ese año, es el que pertenece al segmento de los desarrolladores o promotores, también conocido como sector formal. El mismo ha tenido un gran crecimiento en los últimos años y varios estudios recientes muestran que el mercado de los desarrolladores y promotores se ha incrementado en un 45% entre 2001-2004. En las Tablas 3 y 4 se presentan datos sobre la segmentación del mercado de vivienda en México, de acuerdo con el valor de la obra y las tendencias que ha mostrado la construcción por parte de promotores y desarrolladores durante los años recientes.

En lo que se refiere al financiamiento para la adquisición de vivienda, se encontró un volumen de hipotecas de alrededor de 300,000 créditos otorgados en 2005, lo que representa un incremento de más de 50% con relación al nivel reportado en 2001. Cuando se toman en cuenta las hipotecas originadas por la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF) y la banca comercial, el número de créditos otorgados probablemente rebasará los 400,000 en los próximos dos años, con un valor total de alrededor de USD 12 mil millones. En su mayoría, estos créditos se destinan a la compra de casas nuevas, lo que indica que el mercado secundario para la vivienda es relativamente pequeño. El valor de créditos para compra de

vivienda existente (o de segunda mano) en el 2005 se estimaba en un 25% a 30% del total.

**Tabla 3: Segmentación y tendencias en el mercado de construcción de vivienda en México, 1997-2004**

Categorías de construcción	Rango de precio (pesos)		Rango de precio (USD)		Área (m2)	Ingresos (USD)**	
	Mínimo*	Máximo	Mínimo*	Máximo		Mínimo*	Máximo
Mínimo*		82.000		8.000	30		3.000
Social (S)	82.000	220.000	8.000	20.000	45	3.000	8.000
Económico (E)	220.000	412.000	20.000	38.000	50	9.000	20.000
Media (M)	412.000	1.030.000	38.000	100.000	100	18.000	50.000
Residencial ( R)	1.030.000	2.300.000	100.000	210.000	200	42.000	100.000
Residencial Plus (RP)	2.300.000		210.000		350	100.000	

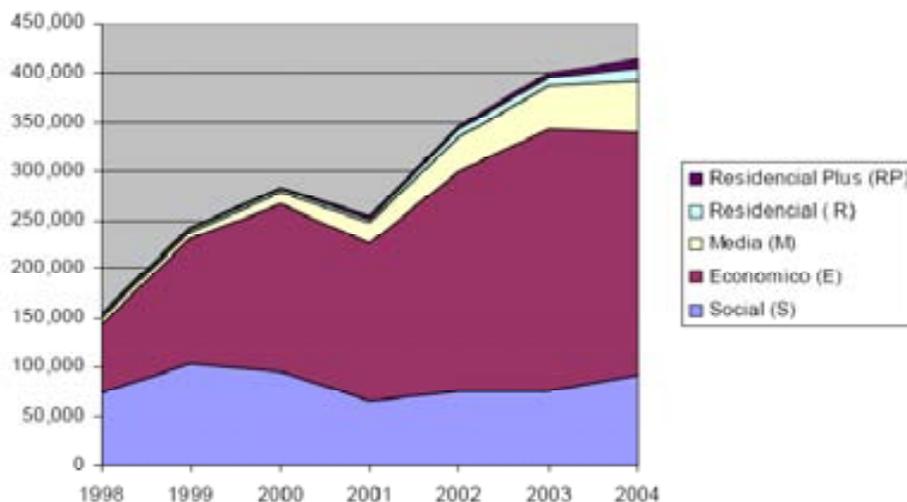
Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 14.

**Tabla 4: Segmentación y tendencias en el mercado de construcción de vivienda en México, 1997-2004**

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
<b>Viviendas construidas por promotores inmobiliarios (unidades)</b>							
Social (S)	74.440	103.576	94.548	65.530	75.972	75.061	91.403
Económico (E)	70.233	126.828	170.741	160.093	223.378	266.635	248.636
Media (M)	6.670	7.476	11.899	21.168	35.762	43.327	51.661
Residencial ( R)	2.456	2.403	3.176	4.759	8.407	9.412	13.363
Residencial Plus (RP)	1.554	1.813	2.033	2.508	3.570	4.997	8.699
<b>Total</b>	<b>155.353</b>	<b>242.096</b>	<b>282.397</b>	<b>254.058</b>	<b>347.089</b>	<b>400.432</b>	<b>413.762</b>
<b>Precios de vivienda en promedio (miles de pesos)</b>							
Social (S)	125	144	159	173	171	170	179
Económico (E)	174	205	236	245	265	278	296
Media (M)	483	545	531	572	591	627	649
Residencial ( R)	1.051	1.214	1.223	1.320	1.423	1.385	1.451
Residencial Plus (RP)	2.466	2.880	3.008	3.135	3.830	3.019	3.331

Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 15.

**Figura V.1 Tendencias en el mercado de construcción de viviendas de acuerdo al tipo.**



Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 15.

Por lo que se refiere a la **eficiencia energética y el interés en la sustentabilidad** en la edificación, se observan varias **tendencias importantes**:

- Los promotores han manifestado interés en la eficiencia energética y el uso de la energía renovable, aunque no hayan logrado grandes resultados en cuanto a proyectos concretos. Los principales motivos de este interés son: beneficios por reducción de costos de desarrollo como consecuencia de menores necesidades de inversión en infraestructura; mayor velocidad de venta de unidades donde no se requieren conexiones de gas natural o energía eléctrica; demanda del consumidor por energía limpia. De hecho, algunos de los grandes promotores están colaborando en asociaciones como la AEAAE.
- Se está impulsando un programa para demostrar los resultados de la incorporación de la eficiencia energética en la edificación. Éste incluye una serie de proyectos pilotos, en los cuales promotores de la vivienda incorporarán diferentes elementos de diseño y/o equipos en fraccionamientos y proyectos, sumando unas 2,200 viviendas en siete lugares que son representativos de las diferentes zonas climatológicas existentes en México. La construcción ya ha comenzado en algunos de los proyectos, en cinco de los cuales se contempla instalar calentadores solares de agua. El propósito del programa es crear casos reales para medir los resultados y, de esta manera, darles a los promotores más elementos para analizar la inclusión de diferentes medidas en futuros proyectos.
- Promoción de los conceptos de edificación sustentable en el ámbito de la academia y de las asociaciones profesionales, y acercamientos por parte de particulares a expertos en el tema para orientación.
- El sector de construcción de vivienda está volviéndose más competitivo, lo que incluye la búsqueda de nuevas formas de distinguirse respecto a los competidores. En esa lógica, se pueden percibir esfuerzos de los promotores por ganar ventajas competitivas mediante el ofrecimiento de nuevos elementos, como

la posibilidad de elegir la instalación de una cocina integral o bien equipos para la vivienda, lo que implica un cambio con relación a la práctica tradicional de entregar la casa sin los equipos básicos de cocina, calefacción, iluminación, etc.

Todo lo anterior se está dando en el contexto de algunas **tendencias importantes en materia financiera:**

- El mercado hipotecario está creciendo rápidamente, debido a la baja en las tasas de interés y los esfuerzos por parte algunos actores de lanzar los primeros títulos hipotecarios en México. Además de haberse inyectado nueva liquidez en el mercado, se ha importando la aplicación de una de las herramientas más poderosas del sector vivienda en EE.UU.: la “mortgage-backed security.”
- Existen ciertos límites y requisitos en cuanto a los costos para obtener la designación de casa de interés social o de interés medio, entre otros, que representan topes para los constructores. Habría que considerar si el costo de los calentadores solares de agua, sobre todo en los segmentos inferiores del mercado hipotecario, representan un obstáculo demasiado grande para poder ser financiados. Sin embargo, para segmentos mayores, no existen estas barreras.

De acuerdo con lo anterior, parecería que la oportunidad para incorporar calentadores solares de agua como componente de la vivienda recién construida tiene dos vertientes:

- 1.- En el corto plazo, debido al costo relativamente alto del calentador solar de agua, existe la posibilidad de ofrecerlo como opción y/o como componente estándar en los segmentos del mercado más elevados (Media, Residencial y Residencial Plus);
- 2.- En el más largo plazo, y en función del descenso en los precios de calentadores solares de agua ha provocado por un incremento en las ventas, tanto

como los esfuerzos de los promotores de vivienda y otras instituciones de incorporar calentadores solares de agua dentro de las especificaciones de las viviendas construidas por los promotores, los calentadores solares de agua podrían figurar como elemento básico en unidades construidas en el segmento Económico.

En cuanto a la vivienda previamente ya existente, se cuenta con la oportunidad de contemplar su financiamiento dentro de la hipoteca en función de la expansión de este segmento del mercado hipotecario. Es decir, conforme se vaya expandiendo este tipo de financiamiento, es probable que se abran mayores posibilidades de incorporar la instalación de calentadores solares de agua dentro de los costos financiados.

### **5.3 Lecciones relevantes de la experiencia internacional**

En las dos últimas décadas han surgido en todo el mundo diversas experiencias que brindan lecciones relevantes para la formulación de nuevos mecanismos de financiamiento para la promoción de calentadores solares de agua. El incremento en el precio de los combustibles fósiles ha provocado, especialmente en los últimos años, que diferentes gobiernos promuevan la utilización de este tipo de equipos como un medio de mitigar de modo importante las demandas energéticas de los sectores residencial y comercial. Los mecanismos financieros implementados y el grado de éxito de los mismos varían según el país. A continuación se presentan ocho experiencias internacionales, tanto de América Latina como de otras partes del mundo, que pueden servir de referencia para la formulación de un mecanismo de promoción del calentador solar de agua en México.

**Túnez:** A finales de la década de los 90, el GEF concedió un donativo para la comercialización a bajo costo de calentadores solares de agua, y se aplicó un programa de subsidios para su compra. Sin embargo el donativo no incluyó al

sector bancario y al terminarse los recursos la demanda de estos equipos comenzó a disminuir. Aprovechando el hecho de que éstos son ya bien conocidos y están disponibles comercialmente a raíz del programa del Fondo de Medio Ambiente mundial (GEF), y con el objeto de incrementar la demanda mediante el ofrecimiento de financiamiento, el Programa de la Naciones Unidas para el medio Ambiente (PNUMA) decidió destinar recursos del Programa Mediterráneo para Promover las Energías Renovables (MEDREP) en Túnez, mediante un mecanismo de subsidio a la tasa de interés en créditos para la adquisición de calentadores solares de agua.

El mecanismo de promoción de calentadores solares de agua está basado en dos incentivos ofrecidos a los consumidores: el primero es un subsidio de 18% aplicado al costo del equipo instalado que es, aproximadamente, de USD 800 para modelos de 200 y 300 litros con un colector de 2m<sup>2</sup>.

Este subsidio está siendo cubierto con recursos del gobierno de Túnez y, en parte, por el programa MEDREP. El segundo consiste en ofrecer a los consumidores un crédito de cinco años (también existe una opción de seis años con pagos bimensuales), con cero intereses para la compra e instalación de un calentador solar de agua. El crédito equivale a cerca del 65% del costo y se pide un enganche de alrededor de 17% del costo de la unidad. Para evitar el mismo desenlace del programa anterior, que dejó de dar el subsidio abruptamente, en este caso la tasa de interés inicialmente ofrecida irá incrementándose (es decir, el subsidio será retirado paulatinamente) durante un periodo de uno a dos años para lograr la transición a un mercado sin subsidios. El mecanismo aprovecha el hecho de que en Túnez, la misma empresa (Société Tunisienne d'Electricité et Gaz - STEG) suministra energía eléctrica y gas; la mayoría de los hogares utilizan gas para cocción y calentamiento.

El mecanismo funciona de la siguiente manera: (1) los bancos emiten créditos de 5 años a los fabricantes; (2) los calentadores solares de agua se

venden a los clientes y el crédito es transferido a éstos; (3) el interés es reembolsado a los bancos directamente, a través de un fondo financiado por el PNUMA/MEDREP; (4) el capital de los créditos se reembolsa mediante los pagos de los recibos de electricidad de los clientes; (5) STEG recupera los pagos de los usuarios del calentador solar de agua y los transfiere a una cuenta de la ANME administrada por un banco que remite el dinero al banco comercial correspondiente que haya emitido créditos a los fabricantes. Este programa tiene apenas menos de un año en operación, por lo que no se ha publicado un informe de resultados preliminares.

**Marruecos:** En Marruecos se ha desarrollado un mecanismo de crédito/préstamo para la instalación colectiva de calentadores solares de agua, con base en una alianza entre el PNUMA y la Oficina Nacional de Electricidad (ONE), para brindar a los consumidores créditos con 0% tasa de interés.

Este mecanismo toma como modelo el programa tunecino y tiene como objetivo la promoción de calentadores solares de agua en el sector comercial (hoteles). Dado que el principal obstáculo es el alto costo inicial de los equipos, éste se divide en un periodo de varios años para ser pagado, como un medio de hacer más atractiva su adquisición. Este mecanismo ha generado en el mercado marroquí el incremento de fabricantes locales, más demanda de equipos y una mayor confianza de las instituciones crediticias en la tecnología.

**Israel:** En Israel, desde 1980, es obligatoria la instalación de calentadores solares de agua en edificios con una altura menor a 27 metros. Cuenta con la mayor proporción de equipos instalados en el mundo por habitante (con 600 m<sup>2</sup> de colectores por cada 1,000 personas), y este sector representa alrededor del 3% del total de la energía primaria del país. La empresa israelita Heliocol tiene una importante presencia en México.

**Barbados:** En Barbados existen alrededor de 40,000 instalaciones de calentadores solares de agua para una población aproximada de 270,000 personas. Los fabricantes locales son competitivos debido a las importaciones y exenciones de impuestos para materias primas (placas de metal, tubería, tanques, etc.), así como otros incentivos del gobierno. Los primeros beneficios fiscales fueron promulgados en 1974 y han continuado de distintas maneras hasta la fecha. Históricamente, alrededor de dos terceras partes del monto de los incentivos se deben a deducciones a los clientes residenciales y una tercera parte a exenciones de impuestos a la materia prima de los fabricantes. De 1996 a la fecha, las deducciones para calentadores solares de agua han formado parte de exenciones para mejoras en casas de hasta B\$3,500 (aprox. US\$1,700) al año por intereses de hipoteca, reparaciones, renovaciones, equipos residenciales de eficiencia energética y ahorro de agua.

**Jamaica:** En el caso de Jamaica, existen actualmente 4,200 instalaciones y se prevé que se crearán otras 15,000 ó hasta 18,000 en los próximos seis años. El alto costo de los equipos hizo que inicialmente la industria progresara lentamente; sin embargo, en la actualidad el periodo de retorno de los calentadores solares de agua es de alrededor de cuatro años. La mayoría de éstos y sus piezas son importadas de países que no forman parte del CARICOM (principalmente Israel) y deben pagar un impuesto de importación. En cuanto al financiamiento de estos equipos, solamente lo brindan las sociedades constructoras que proveen de hipotecas a casas, como un elemento adicional a los términos de la hipoteca. Tal estrategia tiene poca mercadotecnia y es poco conocida entre los consumidores.

**Brasil:** En Brasil, la producción anual de colectores solares ha aumentado de menos de 50,000 m<sup>2</sup> en 1985 a casi 500,000 m<sup>2</sup> en el 2001, cuando se presentó una crisis en el suministro de electricidad. Existen actualmente en ese país unos 140 fabricantes de calentadores solares de agua, la mayoría son empresas pequeñas con menos de 70 trabajadores. La producción anual se

estima en 350,000 m<sup>2</sup>, y el total de calentadores solares de agua instalados en el territorio brasileño es de 3 millones m<sup>2</sup>.

En un nuevo esfuerzo por concientizar al público sobre las ventajas de los calentadores solares de agua y promover la instalación de más equipos, el Instituto Vitae Civilis ha emprendido una campaña masiva de publicidad, cuyos objetivos incluyen a los interesados (stakeholders) entre las instancias financieras (BNDES, Caixa Econômica), organizaciones de investigación, ONGs, representantes del sector eléctrico e instancias gubernamentales seleccionadas para tratar temas de normas e incentivos fiscales. Actualmente, los fabricantes solamente están vendiendo al sector residencial, pero Vitae Civilis espera lograr la participación del sector comercial e incorporar a empresas de servicios energéticos (ESCOs) en el financiamiento de calentadores solares de agua.

Existen otras iniciativas complementarias: por ejemplo, el Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social de Brasil (BNDES), que es el banco de desarrollo más importante del país, está desarrollando, con apoyo de REEEP, la creación de un fondo de garantía expresamente para ESCOs en este sector. Así también, el Instituto Vitae Civilis va a publicar los resultados de un estudio reciente que analiza el impacto de instalaciones de calentadores solares de agua en la vivienda de interés social.

En Brasil funciona un programa piloto innovador de financiamiento para acelerar el uso de calentadores solares de agua, el cual se encuentra cofinanciado por Green Markets International, la Asociación para la Energía Renovable y la Eficiencia Energética (REEEP), el Fondo Blue Moon y The Oak Foundation. Este proyecto se lleva a cabo en la ciudad de São Paulo -con la intención de aplicarlo después a nivel nacional- y pretende combatir los siguientes obstáculos:

- 1.- El alto costo inicial del sistema;
- 2.- Limitaciones en la adquisición de financiamiento;

- 3.- Ausencia de códigos de construcción que apoyen el uso de calentadores solares de agua;
- 4.- Escaso conocimiento de la tecnología; y
- 5.- Falta de evaluación de los costos sociales y ambientales de la generación eléctrica convencional.

La Ciudad de São Paulo está en espera de la autorización del alcalde para la instalación obligatoria de calentadores solares de agua en edificios nuevos y los que se sometán a renovación (norma similar a la instrumentada en Barcelona, España).

**Estados Unidos:** A pesar de que existen 50 empresas fabricantes en Estado Unidos, el mercado de calentadores solares de agua representa apenas el 0.2% del total de calentadores de agua. Esto se explica por:

- 1.- La falta de interés de los consumidores residenciales,
- 2.- El alto costo inicial de los equipos en comparación con otros sistemas, y
- 3.- La falta de conocimiento sobre la eficiencia de la tecnología.

Distintas empresas cuentan con diferentes esquemas de financiamiento, principalmente incentivos en efectivo, préstamos a baja o nula tasa de interés, exenciones de impuestos por parte de gobiernos estatales, así como programas que premian el uso de calentadores solares de agua.

**Alemania:** Cuenta con el 50% de la capacidad instalada de calentadores solares de agua en la Unión Europea (UE).

El programa nacional de incentivos prevé haber aumentado de 10 a 15% las ventas del 2004 al 2005. En 2003, el Ministerio de Medio Ambiente estableció la meta de instalar 10 millones de m<sup>2</sup> de colectores para el año 2006. A partir de

junio de 2004, todos los fabricantes deben contar con ciertos estándares de eficiencia energética (EE) como requisito para obtener subsidios públicos.

En Alemania la promoción de calentadores solares de agua ha funcionado a través de dos mecanismos:

1.- El Programa de Incentivos de Mercado para energías renovables (ER) (1995-1998), con 51 millones de € dedicados a un esquema de apoyo financiero marginal mediante subsidios (desde 1999, el programa cuenta con fondos ligados a la reforma de impuestos ecológicos); y

2.- Declaración Conjunta para una Directriz Europea de Promoción del Calentamiento y Enfriamiento Renovable (abril de 2005), apoyada por la *European Solar Thermal Industry Federation* (ESTIF) y publicada por el *European Renewable Energy Council* (EREC), para los Estados Miembros de la UE.

El programa de subsidios de 1995 ha hecho al mercado de calentadores solares de agua altamente dependiente de éstos. Una depresión en el mercado ocurrida en el año 2002, se debió a un decremento en la disponibilidad de subsidios, mientras que la posterior recuperación en 2003 se atribuye a un incremento de los mismos. Actualmente, existen garantías para financiamiento público hasta el año 2006 y la discusión de una iniciativa legislativa a nivel de la UE y federal para hacer imperativo el uso de calor solar en nuevos edificios.

**Austria:** Las instalaciones austriacas de colectores solares de agua son en su mayoría de gran escala, como por ejemplo el estadio de fútbol de Graz, una instalación desarrollada por una empresa de servicios energéticos (ESCOs). Las ESCOs en Austria forman un agente importante del mercado, ya que ofrecen contratos de garantías de eficiencia y desempeño. Bajo estos esquemas, actualmente las ESCOs cuentan con 7.7 MW instalados de colectores solares de agua. Uno de los mecanismos financieros consiste en que los clientes pagan por

la energía producida, mientras que las empresas garantizan el suministro de energía bajo pena de fallo, y cargan con el riesgo financiero de la inversión.

**China:** Este país es el mayor usuario y productor de unidades de calentadores solares de agua, con alrededor del 60% de los producidos en el mundo. En el año 2005 la capacidad instalada llegó a los 15 millones de m<sup>2</sup> y se predice que para el año 2010 alcanzará los 30 millones de m<sup>2</sup> instalados.

De lograrse este objetivo, se estaría generando el 1% de la energía total consumida anualmente en el país. Dos de las empresas más consolidadas son: Changzou Sunpower Solar Energy Industry Co., Ltd. y Donguan Five Star Solar Energy Co., Ltd. Además, existen 22 compañías subsidiarias en toda China. La Ley de Promoción para el Desarrollo y Utilización de ER emitida en el 2003 busca aumentar anualmente 11 millones de m<sup>2</sup>, para un total de 64 millones de m<sup>2</sup> al 2005. Adicionalmente, intenta desarrollar de 5 a 10 empresas de gran escala para competir a nivel internacional. Esto con base en préstamos a bajo costo y otros incentivos fiscales opcionales para gobiernos regionales.

#### 5.4 Barreras e impulsores para el desarrollo del mercado

A manera de resumir los resultados de la revisión de experiencias internacionales, pueden destacarse los siguientes puntos y los obstáculos que han impedido la difusión de calentadores solares de agua:

- Barreras**
- Alto costo inicial del CSA para el usuario residencial;
  - Precios subsidiados para los combustibles utilizados para cocción y calefacción en el hogar, o bien la energía eléctrica;
  - Falta de normas y estándares de construcción que obliguen el uso de CSAs;
  - Limitado acceso al financiamiento para la adquisición de CSAs a tasas suficientemente bajas y plazos razonables para permitir que el CSA genere ahorros para el usuario.

*Fuente:* Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 25.

En los casos donde se ha observado una alta penetración de calentadores solares de agua en el mercado residencial, como ha ocurrido en Israel, Barbados, Alemania y China, existe algún mecanismo para contrarrestar el efecto de una de estas barreras, como se indica a continuación:

- Impulsores**
- Fomento de producción para un mercado muy grande, que permita economías de escala y precios bajos (China);
  - Subsidios para la adquisición de CSAs (Alemania);
  - Instrumentación de normas de construcción que requieran el uso de CSAs (Israel, China);
  - Despliegue de mecanismos financieros que permitan que el usuario final perciba un ahorro inmediato por el uso de CSAs (Túnez, Barbados, China).

*Fuente:* Comisión Nacional para el ahorro de Energía, *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua en el Sector Doméstico Mexicano*, México, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) - Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) -Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Octubre de 2006, p. 25.

Una lección central rescatada de estas experiencias para México, es que existen diversas estrategias para promover el uso de calentadores solares de agua y, en ese sentido, lo recomendable es aplicar varias de ellas para asegurar, por un lado, una adopción rápida de la tecnología en el país y, por el otro, fortalecer el apoyo para su utilización en diferentes segmentos del mercado.

## **CONCLUSIONES.**

Las energías renovables son, de alguna manera, la opción energética del futuro y cuenta con un brillante pasado en el que hasta entrado el siglo XIX cubrían prácticamente la totalidad de las necesidades energéticas de la sociedad, sólo a partir de entonces fueron superadas por el carbón, el petróleo y el gas natural.

Ante la actual situación energética, la creciente demanda de combustible y el entorno socio-político, se ha tenido que revalorar a las energías renovables para satisfacer las necesidades de la sociedad. Las energías renovables se derivan directa o indirectamente del Sol.

El recurso a las fuentes de energía renovables es importante en países como México, porque contribuyen a reducir la dependencia energética del exterior y puede fomentar la aparición de una cierta base industrial que ofrezca los bienes necesarios para el funcionamiento de estas energías.

México dispone en principio de un elevado potencial de energías renovables, está situado en una zona inter tropical (porque está comprendido al norte por el Trópico de Cáncer y al sur por el Trópico de Capricornio), en donde la insolación es intensa, las precipitaciones abundantes y las temperaturas medias. En México el calentamiento de agua aprovechando la energía solar resulta una alternativa viable para reducir el consumo de combustibles fósiles.

Asimismo, es evidente que la tecnología utilizada para este tipo de equipos y sistemas en México ha probado sus beneficios y que ha estado presente en nuestro país por décadas, a través de un buen número de empresas fabricantes y distribuidores. De acuerdo con informes de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), en México se tiene tan sólo 75,000 viviendas que cuentan con un

calentador solar de agua. La instalación que se tiene hasta 2004 de calentadores solares de agua, incluyendo no sólo el sector residencial sino también los sectores industrial y comercial, había alcanzado los 643,000 m<sup>2</sup> lo que equivale a 321,000 unidades, aproximadamente, si se toma en cuenta que cada equipo cuenta con 2 m<sup>2</sup> de superficie. De igual manera, un amplio conjunto de universidades e institutos, nacionales y regionales a lo largo y ancho del país han continuado con su trabajo para innovar su desarrollo en México, a fin de mejorar la eficiencia y desempeño de estos equipos.

A través de esta investigación, pudimos darnos cuenta que el uso de la energía solar en México aún es limitada, una de las pocas aplicaciones en donde el costo del equipo es equiparable con el de los sistemas tradicionales y se ha encontrado que el uso de la energía solar tiene un campo de aplicación muy interesante es en el calentamiento del agua de las piscinas.

Sin embargo, el nivel actual de la utilización de las energías renovables es muy desigual y parece vincularse con la sociedad de más recursos económicos. Los principales obstáculos que han impedido que las energías renovables se hayan desarrollado extensamente en México son:

- No es confiable para los usuarios
- Muy poca o nula información sobre el calentador solar de agua
- Alto costo inicial del calentador solar de agua
- Los usuarios estamos acostumbrados al uso inmoderado de los combustibles

Lo anterior no impide que las perspectivas sean prometedoras, porque en primer lugar los costos tenderán inevitablemente a la baja a medida que se apliquen los progresos técnicos. Y en segundo lugar, las energías renovables serán cada vez más competitivas frente a los combustibles fósiles.

Los recientes incrementos en el precio del gas natural y el gas L.P 52% y 74% respectivamente, en el periodo de 2002 a 2006, le han dado una gran oportunidad para incrementar el uso de calentadores solares de agua que permitan la sustitución de combustibles fósiles por alternativas más económicas y ambientalmente más favorables.

De acuerdo con el Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (PROCALSOL 2007-2012), que realizó la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) en colaboración con la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ por sus siglas en inglés) y la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), se tiene dentro del programa una meta global de tener instalados 1, 800,000 m<sup>2</sup> de calentadores solares de agua para el año 2012.

Estas consideraciones explican el interés actual por este tipo de recursos y la intención de poner en explotación económica un considerable mercado potencial para reducir la dependencia energética.

El apoyo gubernamental es necesario en cualquier caso, para financiar las acciones, amortiguar la falta de rentabilidad inmediata y estimular las investigaciones. Sólo de esta forma, se podrá dar respuesta a la necesaria diversificación energética que garantice un futuro sin los problemas medioambientales del presente y en el que el acceso a los recursos energéticos sean más justos y equitativos. La promoción de las fuentes renovables supone el primer paso verdaderamente importante para la transformación profunda del actual sistema de producción y consumo de energía.

**ANEXO A**  
**MAPAS Y GRÁFICAS DE**  
**RADIACIÓN**  
**MÁXIMA DIRECTA Y**  
**RADIACIÓN MÁXIMA**  
**TOTAL EN LA**  
**REPUBLICA MEXICANA.**

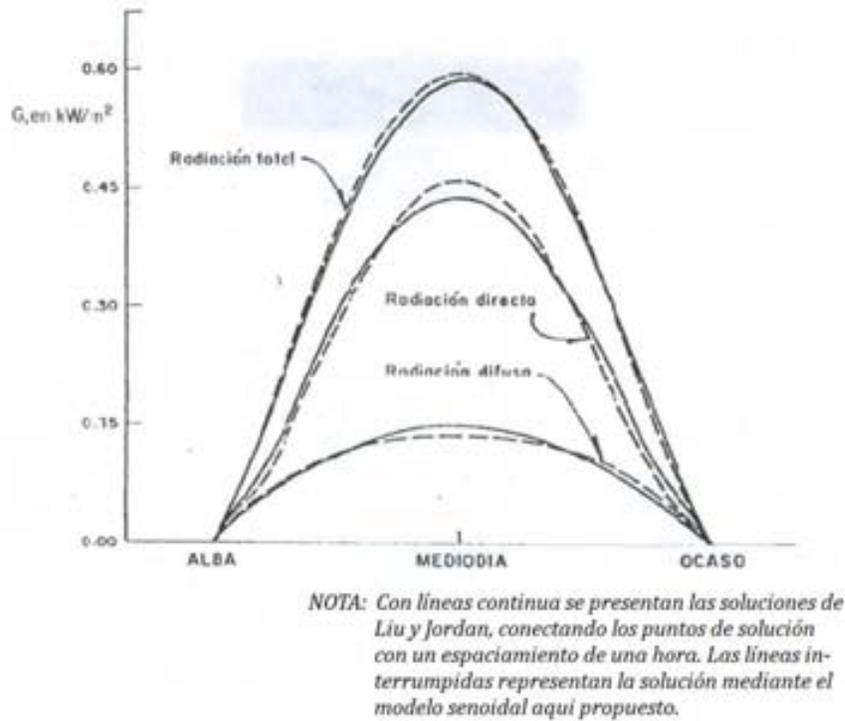


Figura II.19 Radiación media diaria, calculada para la ciudad de Chihuahua en el mes de enero.

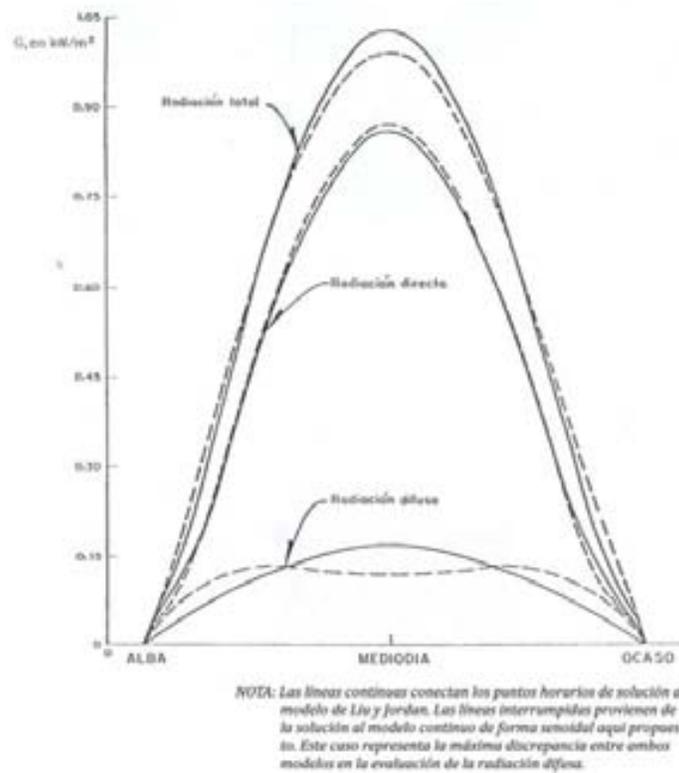


Figura II.20 Radiación media diaria para la Ciudad de Chihuahua en el mes de mayo.

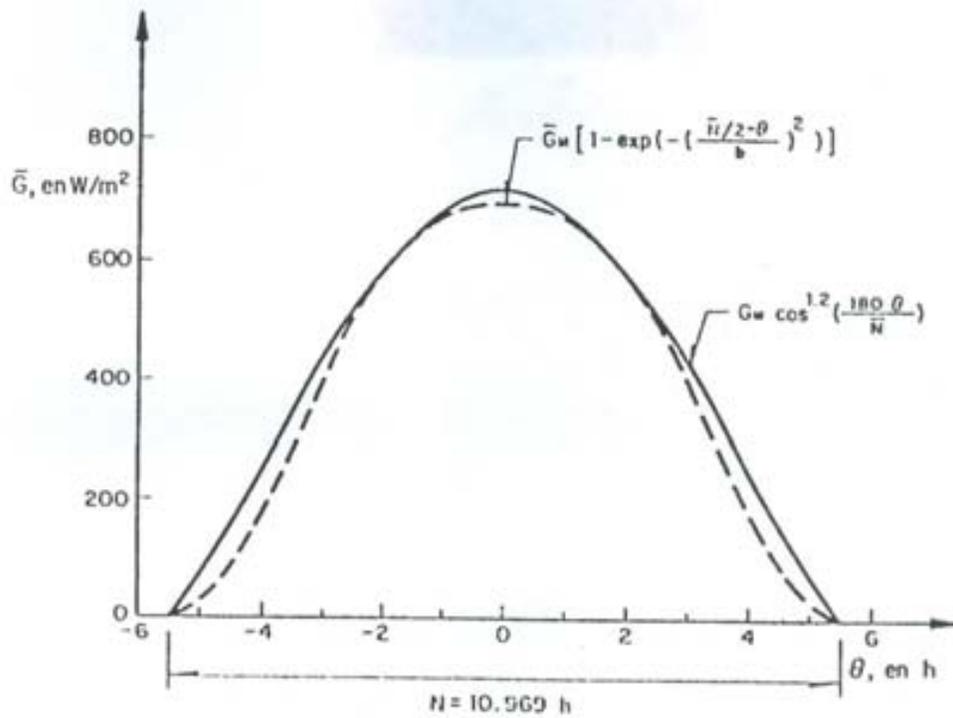


Figura II.21 Comparación del modelo propuesto con el sondeo de Munroe. Ambas curvas corresponden al 17 de enero, en México, DF; ( $\bar{G}_M$  de la figura 4.16 ver Anexo A).

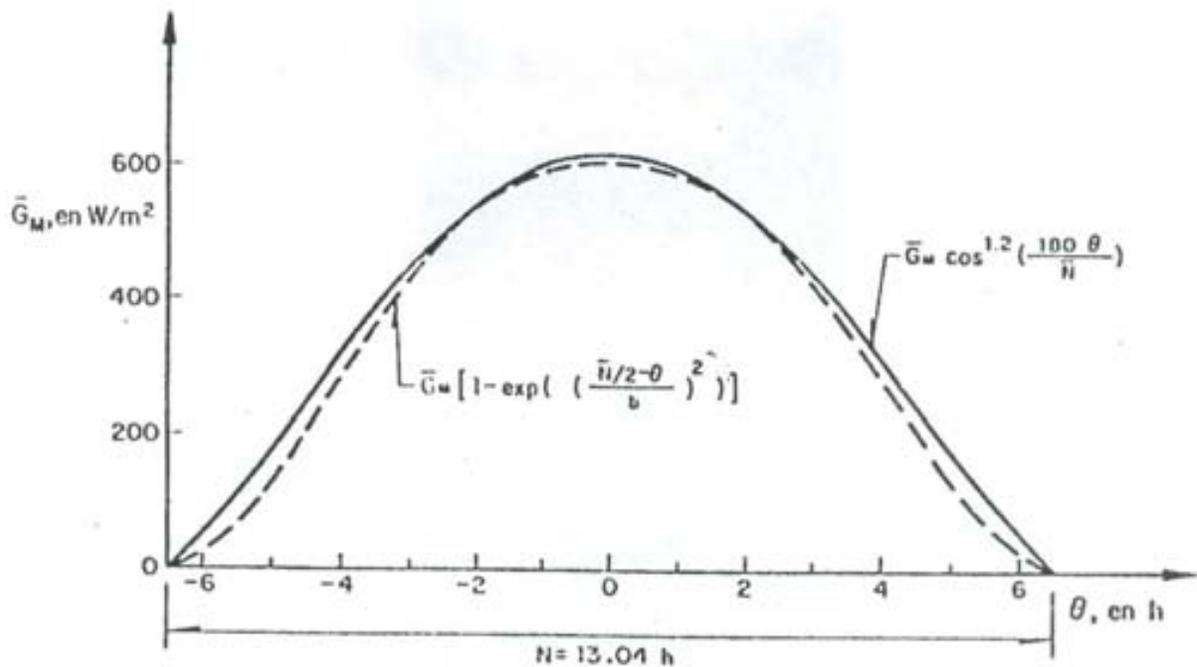


Figura II.22 Comparación del modelo propuesto con el modelo de Munroe para el 17 de julio en México, DF ( $\bar{G}_M$  de la figura 4.22 ver Anexo A).

En las ecuaciones 4.2 y 4.3, los valores de las constantes con subíndice M se refiere al valor máximo de la radiación global y directa, respectivamente, y es el valor de dicha radiación al mediodía. El componente difuso se deriva de 4.1 como

$$G_b(t) = G(t) - G_d(t)$$

En las figuras II.23 a II.33 se ilustran algunas aplicaciones de la aproximación y se propone la universalidad del modelo, y en las figuras 4.16 a 4.39 mapas de México, uno para cada mes del año, en los que se incluyen valores para las constantes  $G_M$  y  $G_{bM}$ . Con ello puede conocerse  $G(t)$ ,  $G_b(t)$  y  $G_d(t)$  para cualquier instante del día. La tabla 4.1 contiene algunos valores típicos de N.

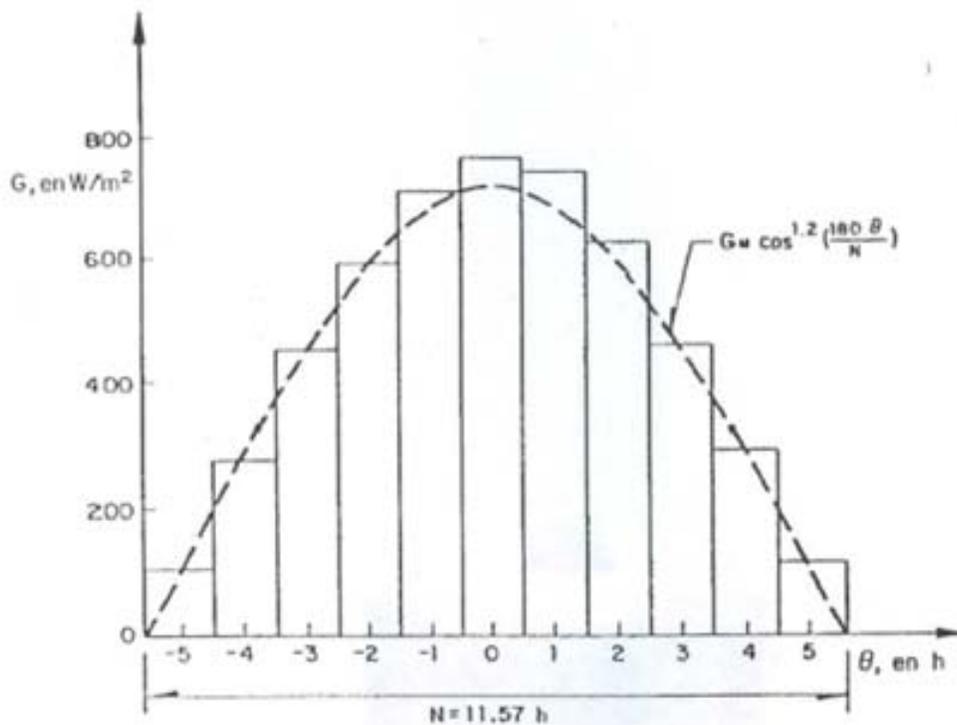


Figura II.23 Comparación del método propuesto con los datos presentados para Chiang Mai, Tailandia. Las gráficas corresponden al día 27 de febrero.

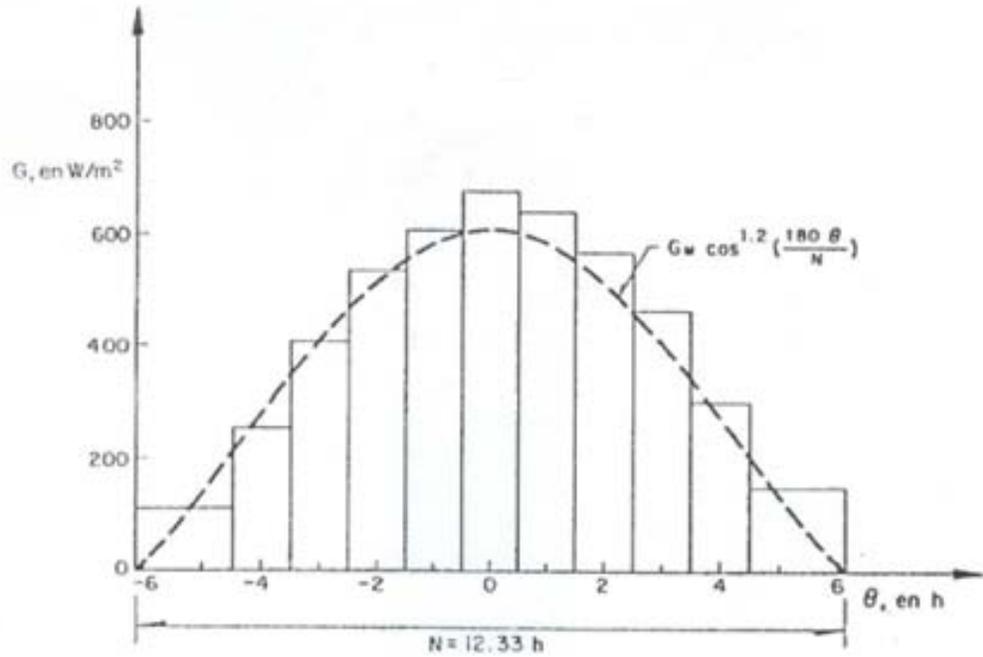


Figura 11.24 Comparación del método propuesto con los datos presentados para Chiang Mai, Tailandia. Las gráficas corresponden al día 1 de septiembre.

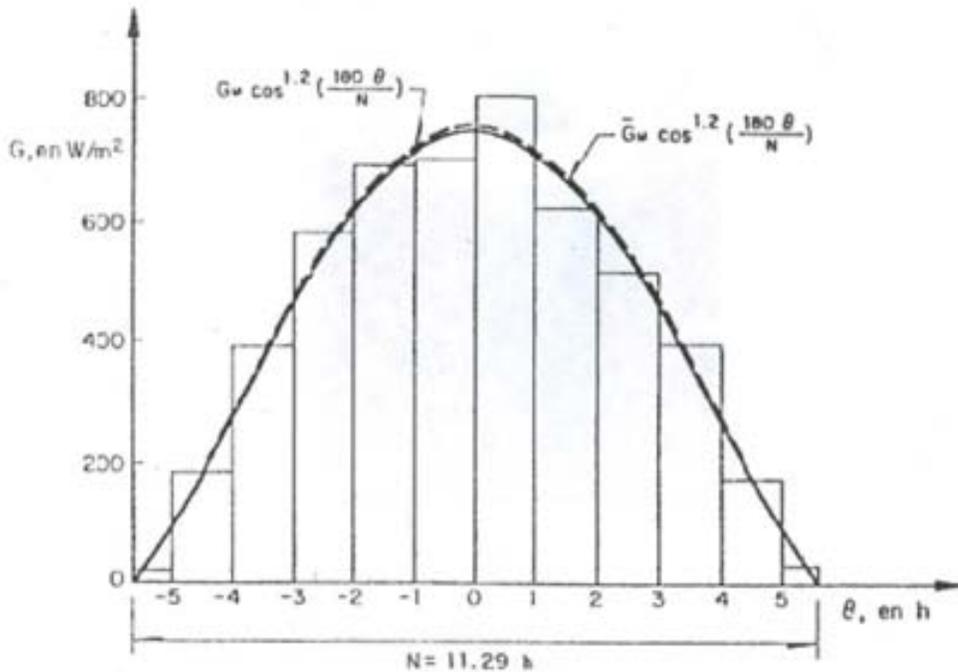


Figura 11.25 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 11 de Febrero de 1981 en Ciudad Universitaria, México, DF (GM calculado a partir de la irradiancia recibida ese día y GM de la figura 4.17)

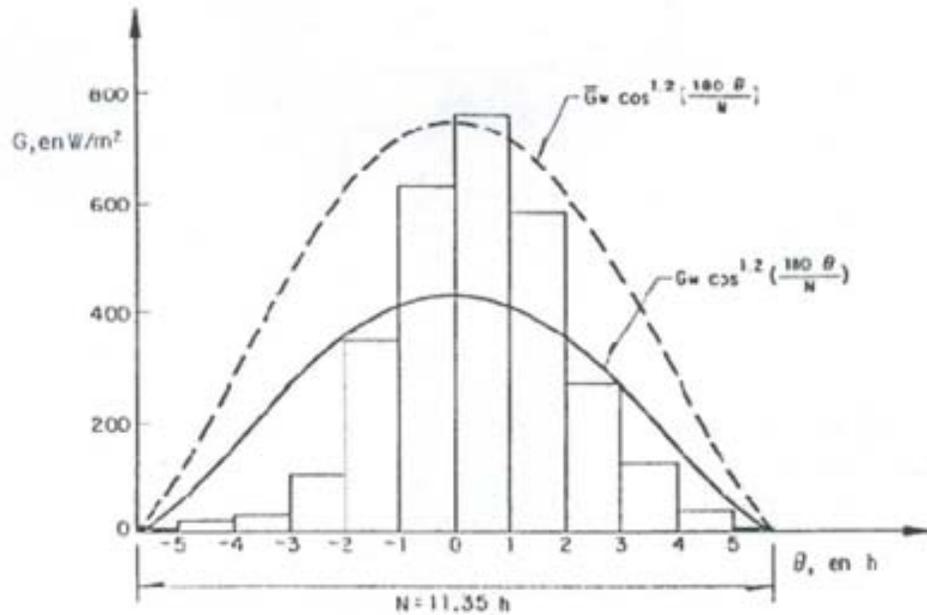


Figura II.26 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 14 de Febrero de 1981, siendo este el día de menor irradiancia en el mes, en Ciudad Universitaria México, DF ( $G_y$  calculado a partir de la irradiancia recibida ese día y  $G_M$  de la fig. 4.17 ver anexo A).

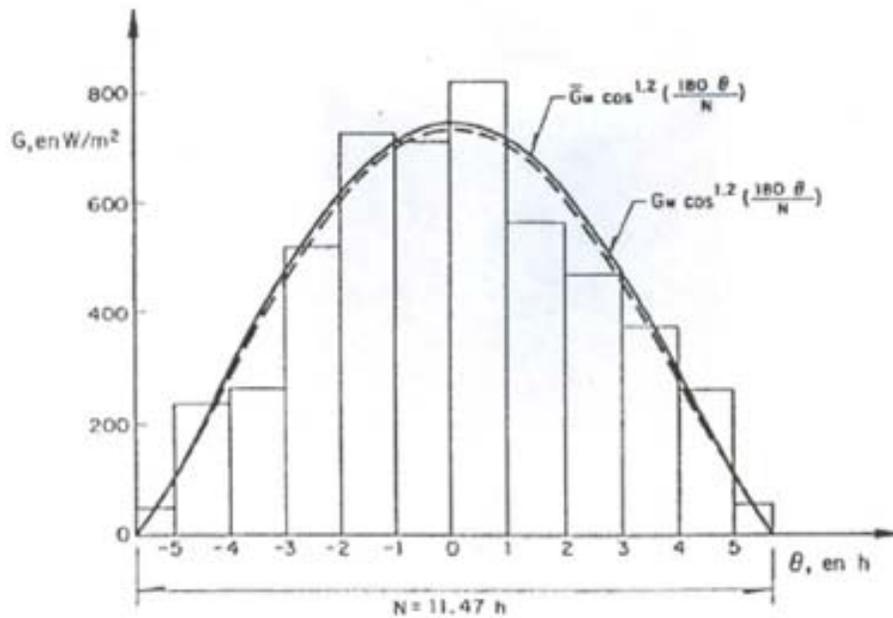


Figura II.27 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 21 de Febrero de 1981 en Ciudad Universitaria, México, DF ( $\bar{G}_M$  obtenido a partir de la irradiancia recibida ese día, y  $G_M$  de la figura 4.17, ver Anexo A).

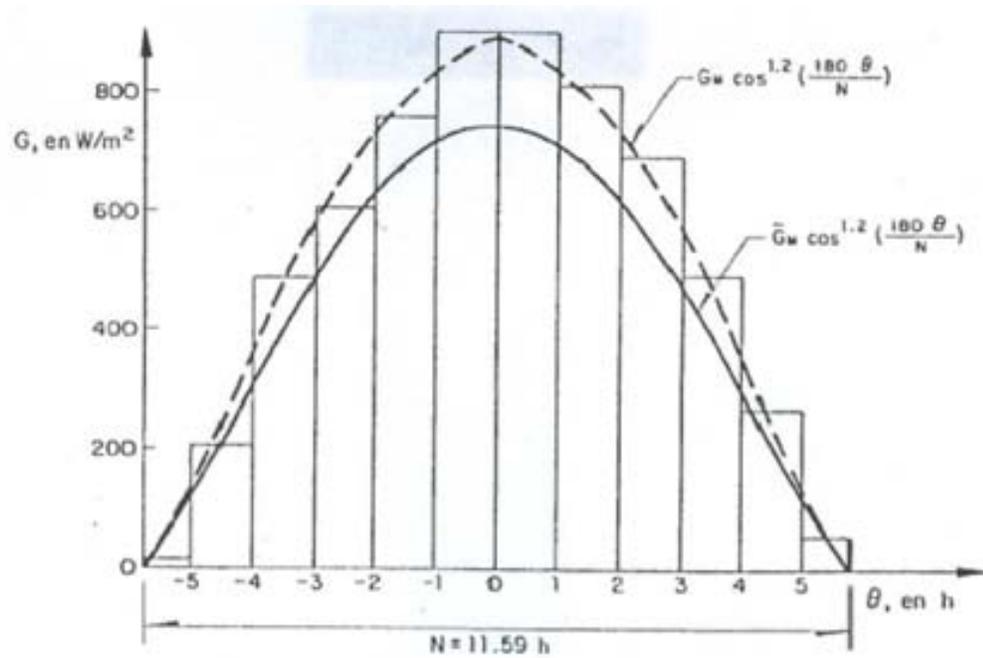


Figura II.28 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 28 de Febrero de 1981, siendo este el día de mayor irradiancia en el mes, en Ciudad Universitaria México, DF ( $G_M$  calculada a partir de la irradiancia recibida ese día y  $\bar{G}_M$  de la Fig. 4.17 ver Anexo A).

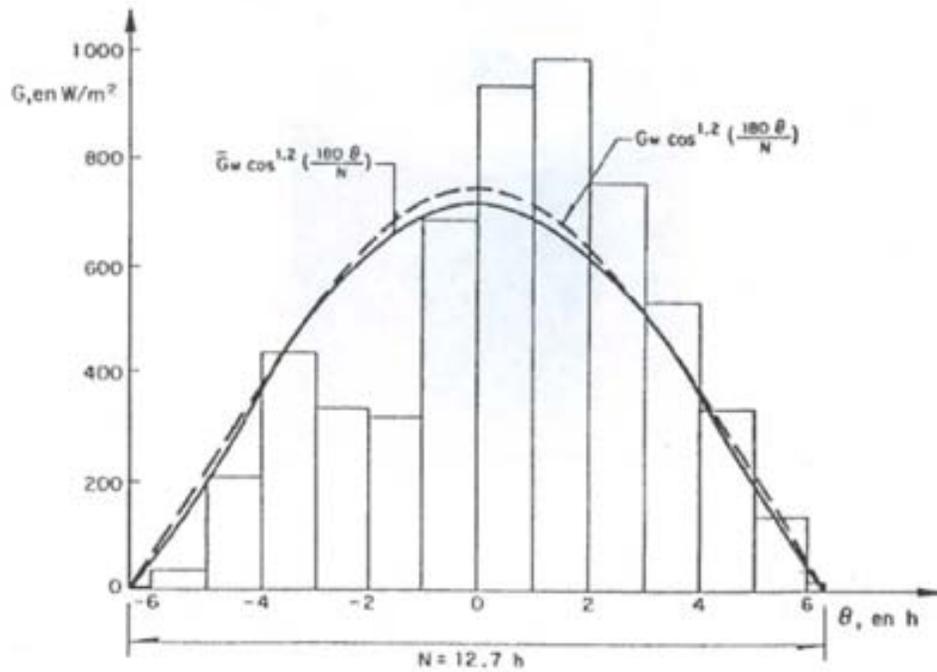


Figura II.29 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 3 de mayo de 1982 en Ciudad Universitaria, México, DF ( $G_M$  calculado a partir de la irradiancia recibida ese día y  $\bar{G}_M$  de la figura 4.20 ver Anexo A)

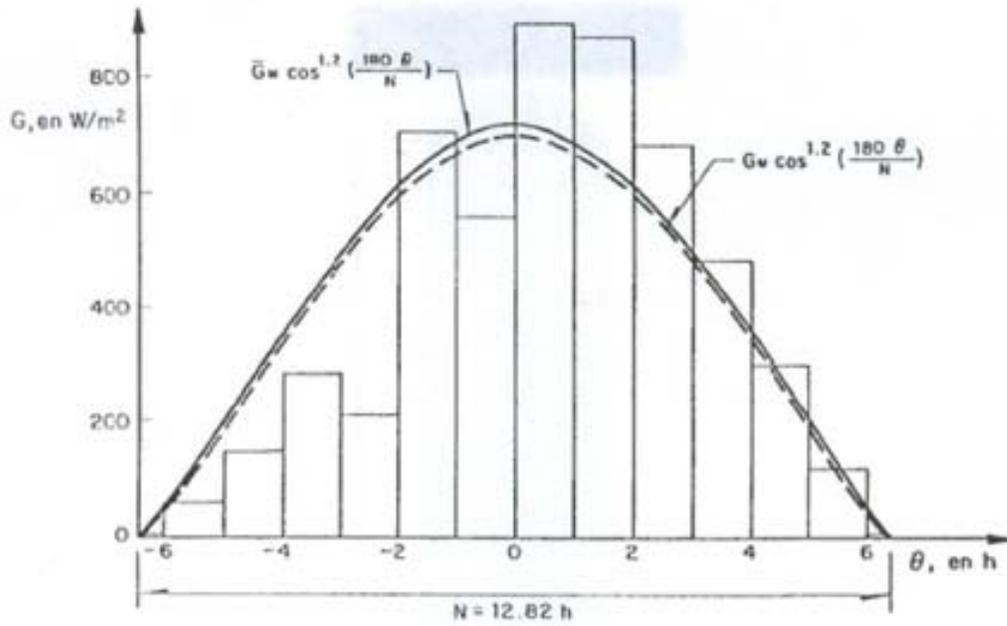


Figura 11.30 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 8 de mayo de 1982 en Ciudad Universitaria, México, DF ( $\bar{G}_M$  calculado a partir de la irradiancia recibida ese día y  $G_M$  de la figura 4.20 ver Anexo A)

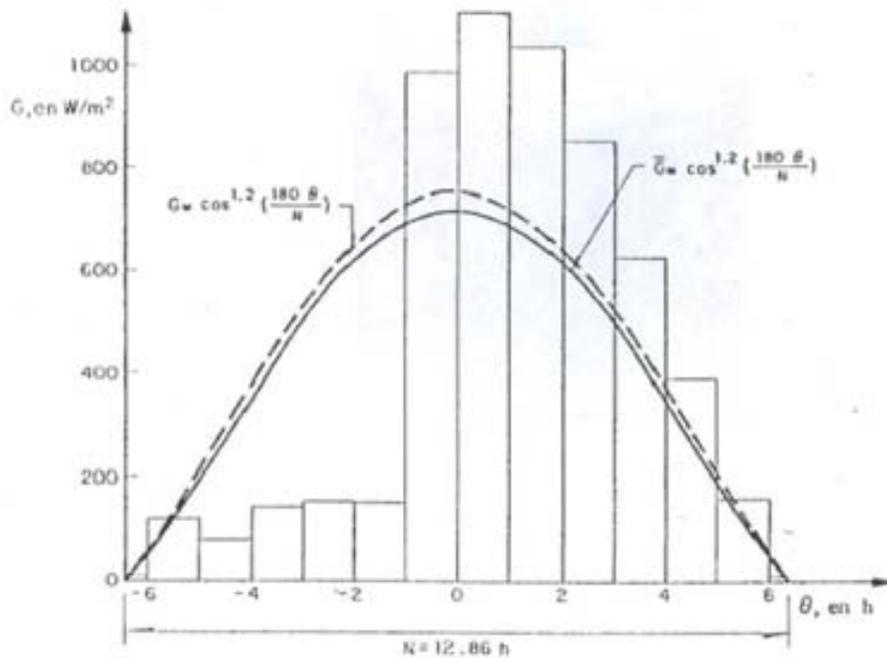


Figura 11.31 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 11 de mayo de 1982 en Ciudad Universitaria, México, DF ( $\bar{G}_M$  calculada a partir de la irradiancia recibida y  $G_M$  de la figura 4.20 ver Anexo A)

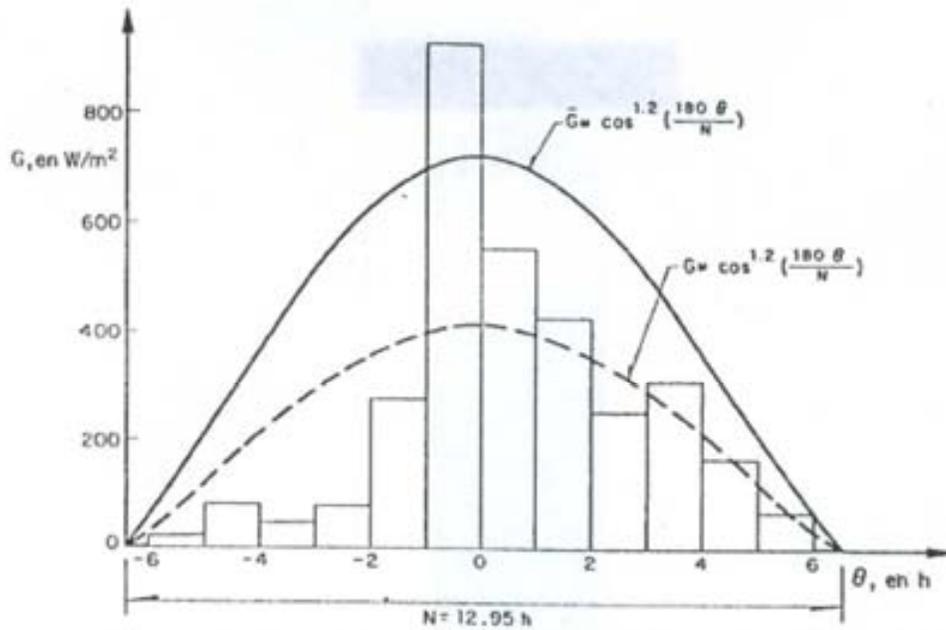


Figura 11.32 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 18 de mayo de 1982 en Ciudad Universitaria, México, DF ( $\bar{G}_M$  calculado a partir de la irradiancia recibida ese día, y  $G_M$  de la figura 4.20 ver Anexo A).

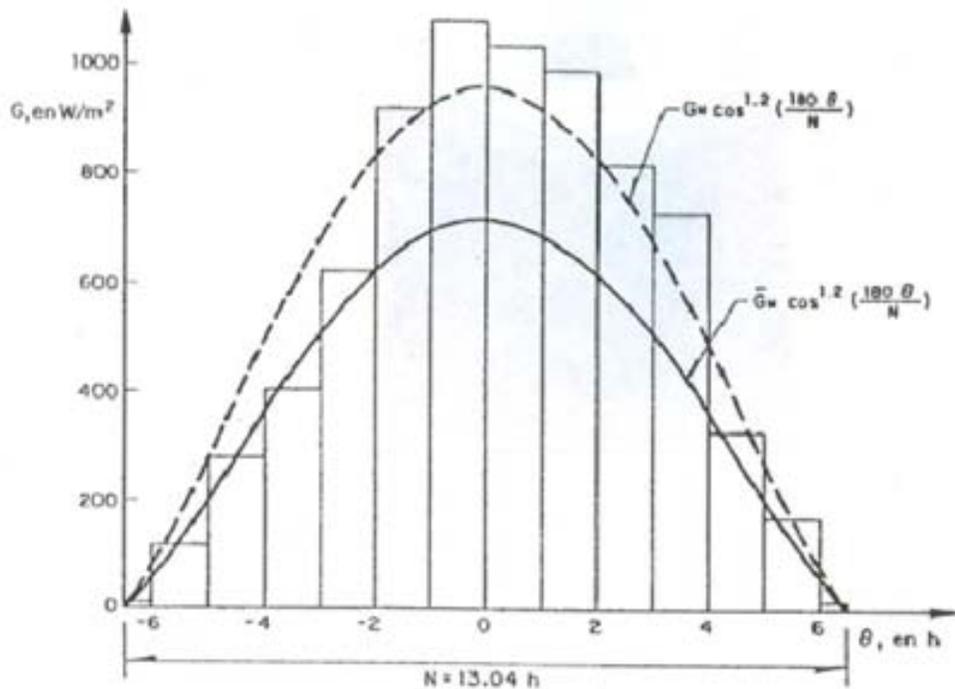


Figura 11.33 Comparación del modelo propuesto con datos obtenidos experimentalmente el 26 de mayo de 1982, siendo este el día de mayor irradiancia en el mes, en Ciudad Universitaria, México, DF ( $G_M$  calculado a partir de la irradiancia recibida ese día y  $\bar{G}_M$  de la figura 4.20 ver Anexo A)

PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN MÁXIMA TOTAL  
 $G_M$ , en  $W/m^2$

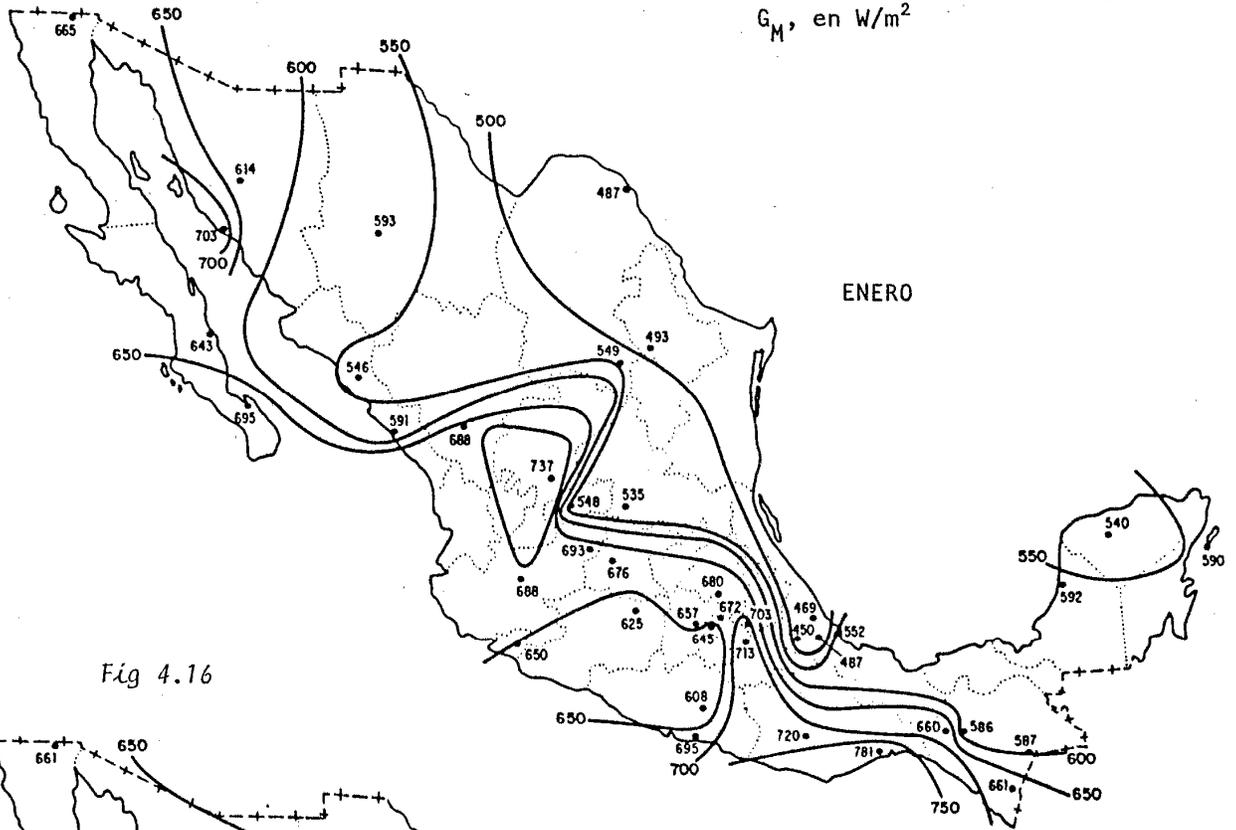


Fig 4.16

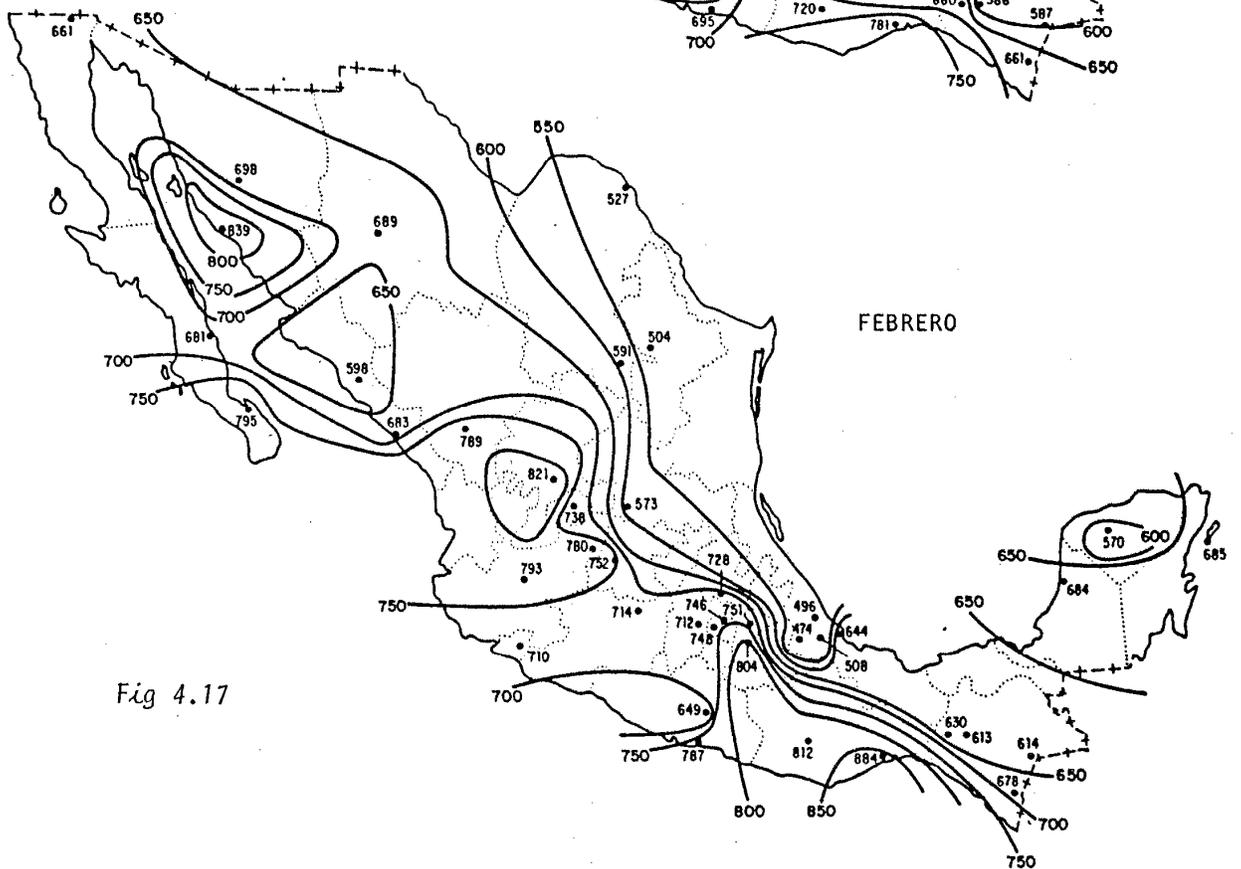


Fig 4.17





PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN MÁXIMA TOTAL  
 $G_M$ , en  $W/m^2$

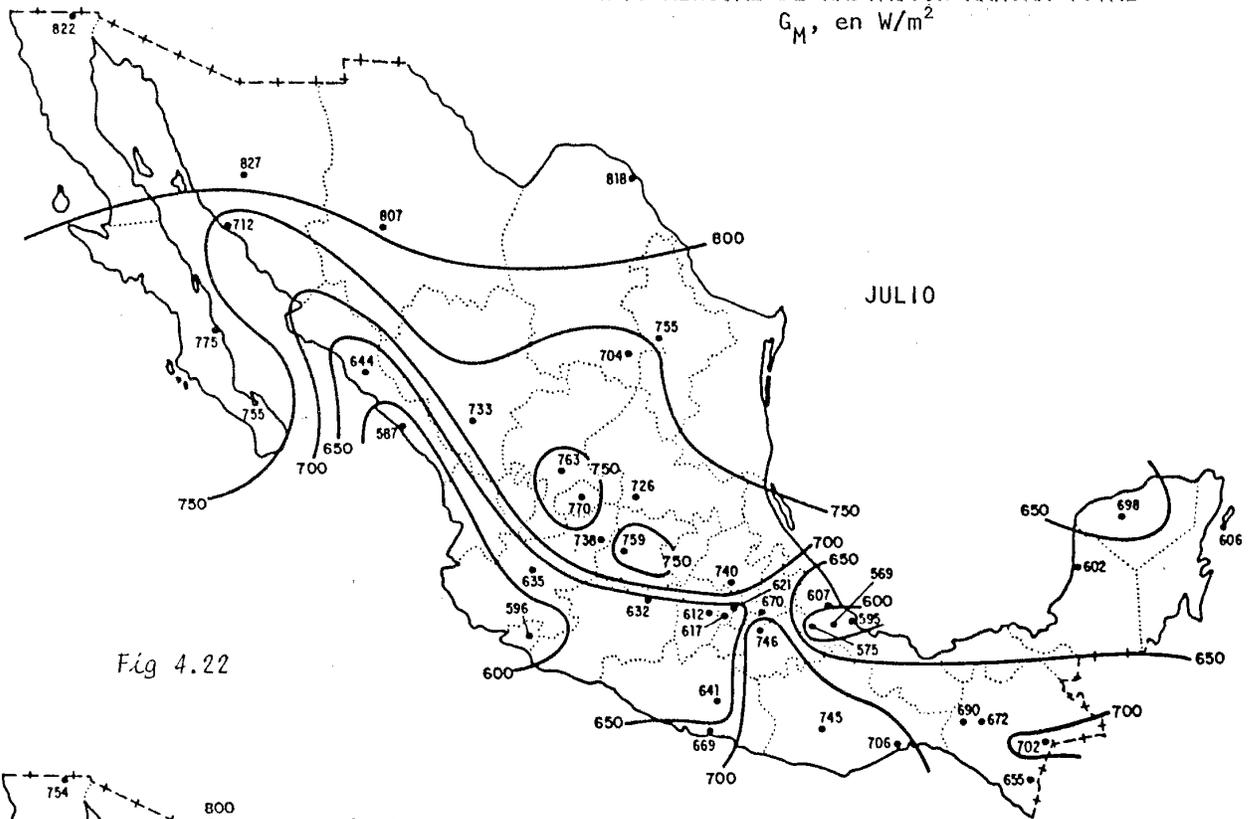


Fig 4.22

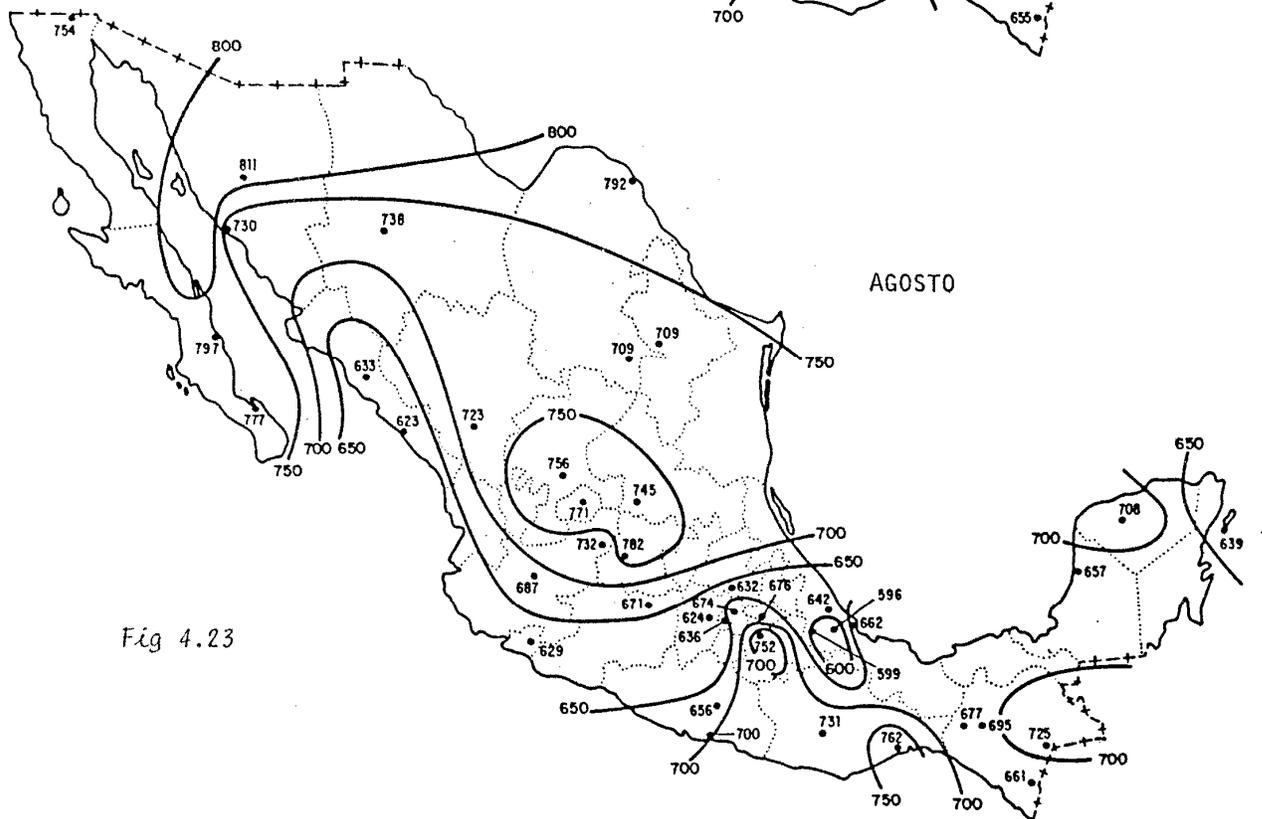


Fig 4.23

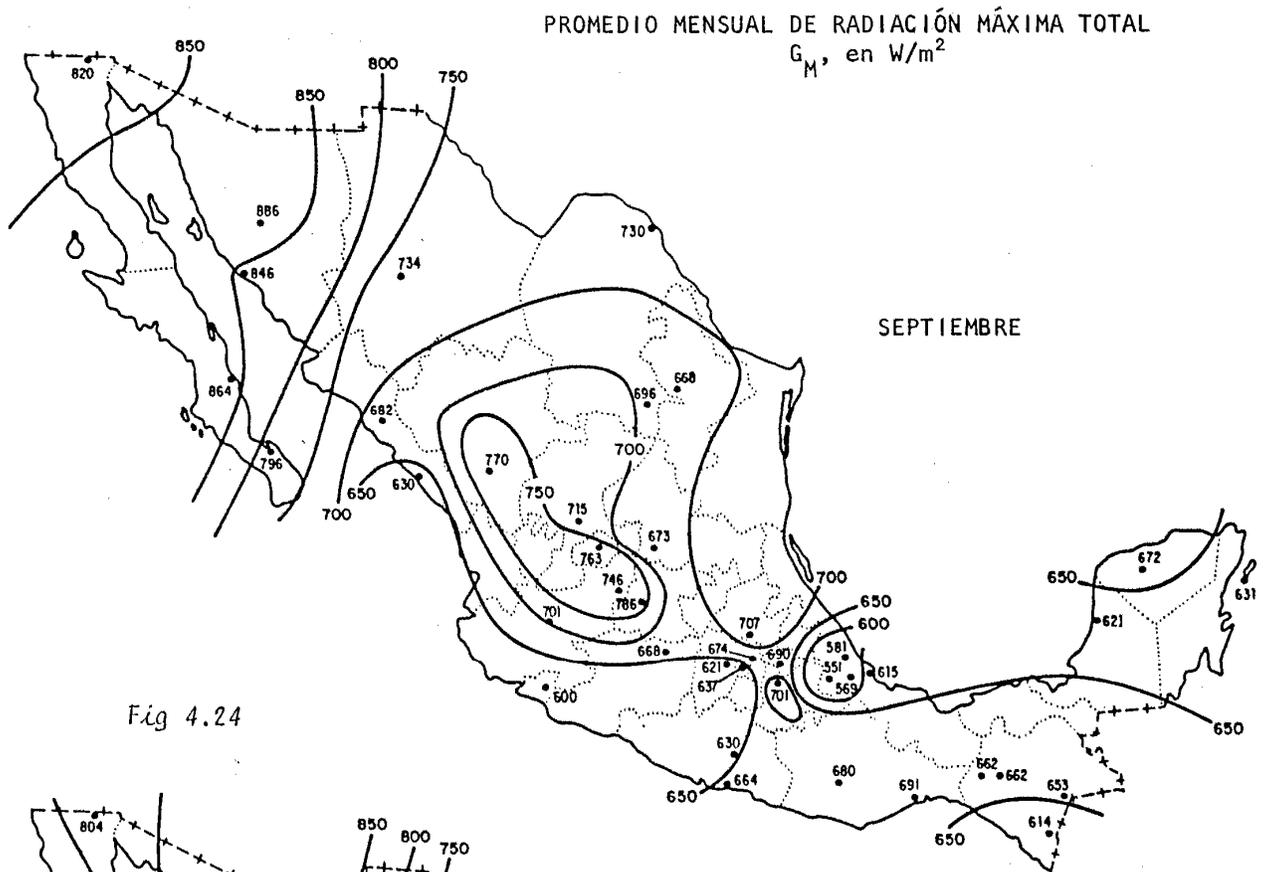


Fig 4.24

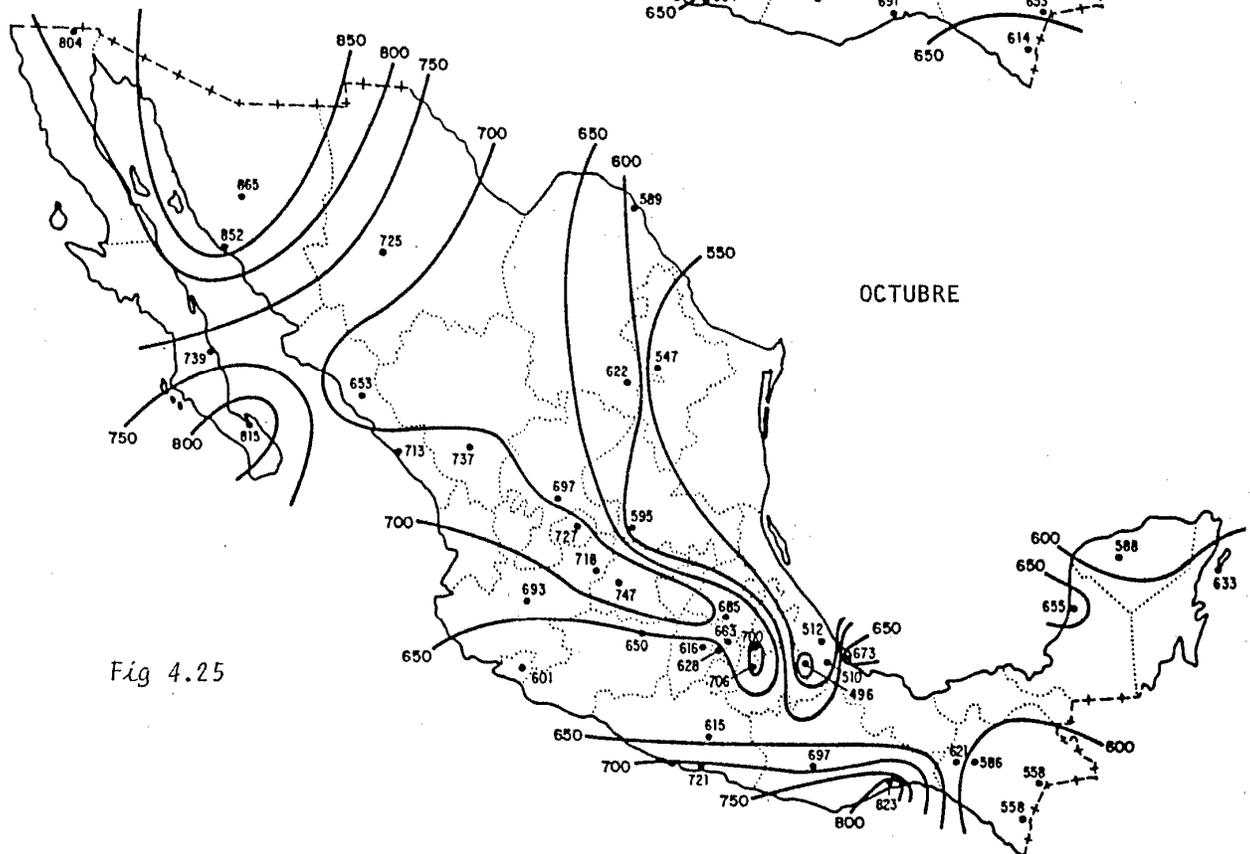


Fig 4.25

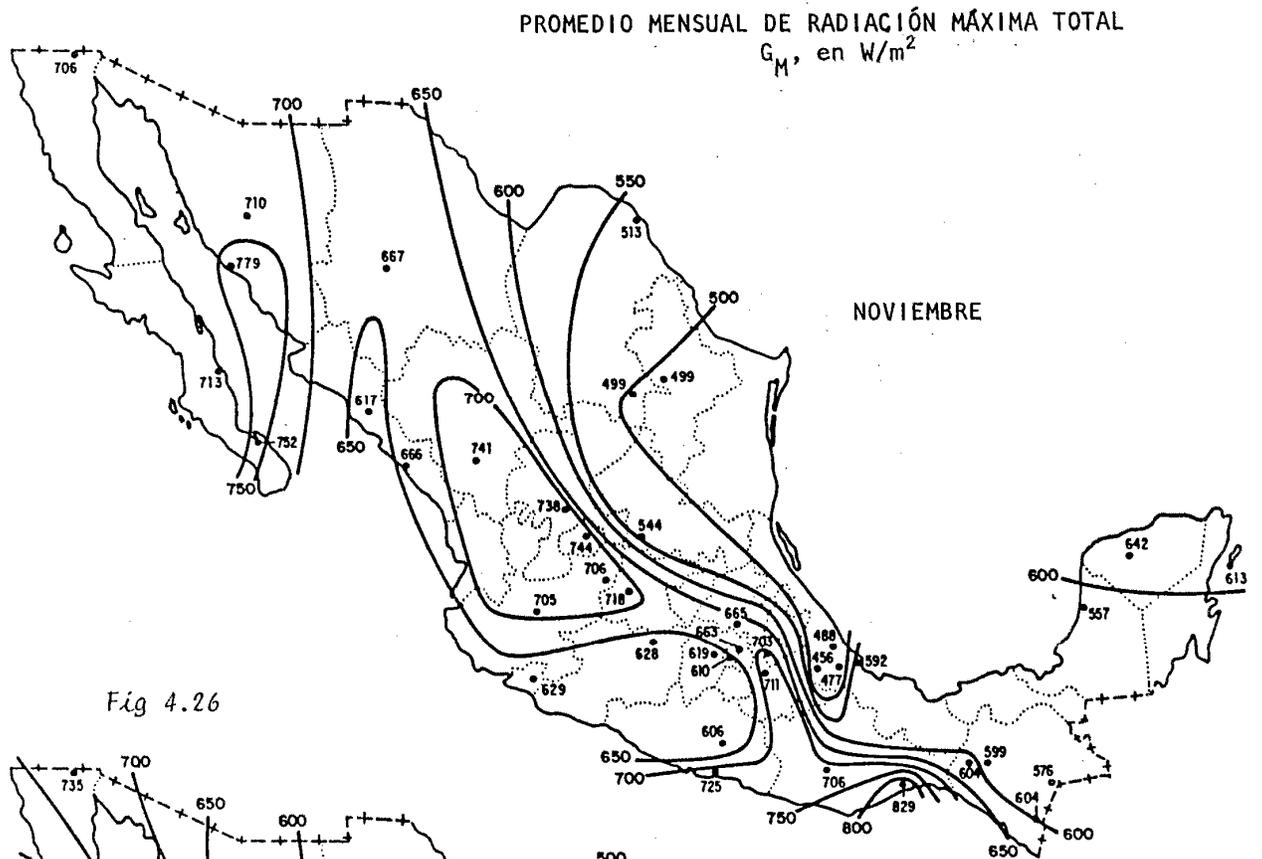


Fig 4.26

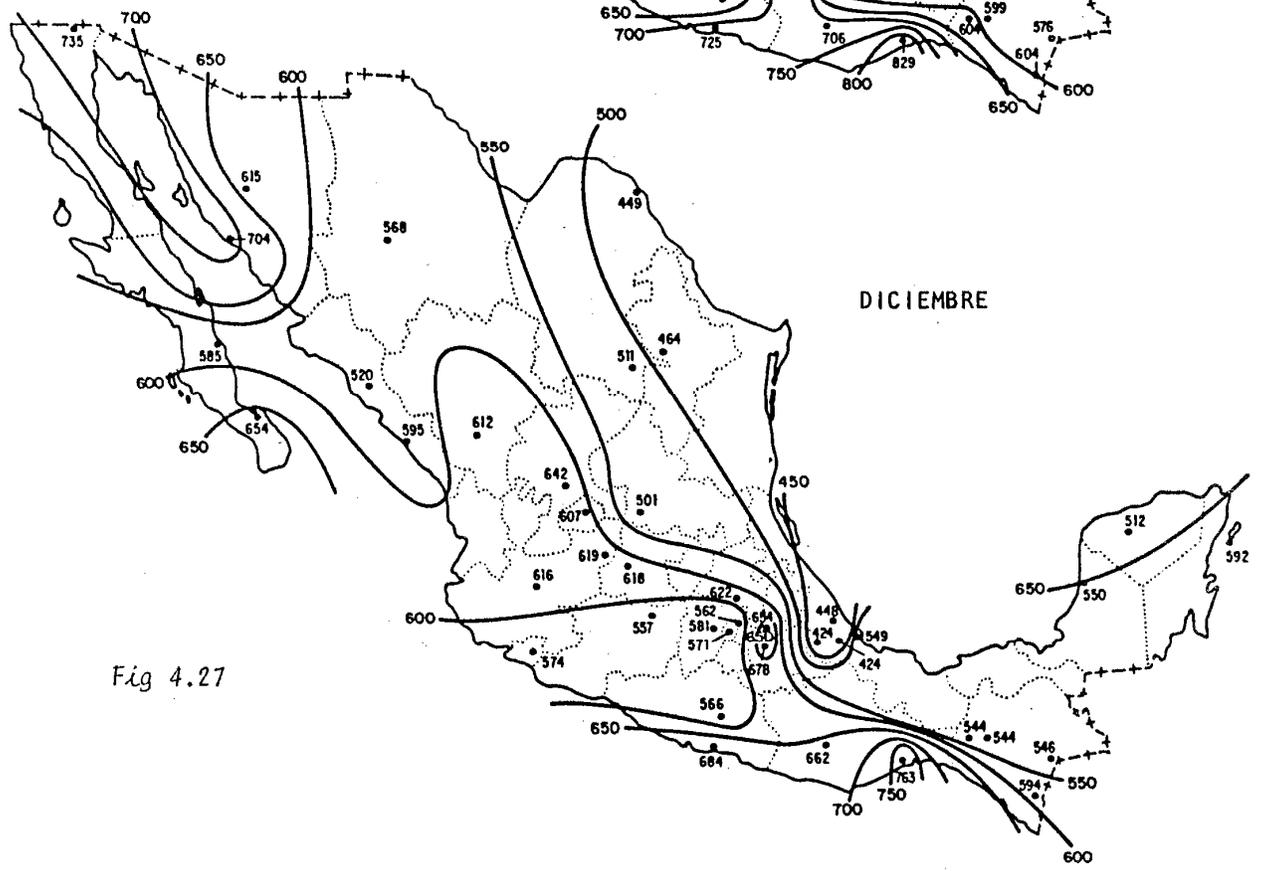


Fig 4.27



PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN MÁXIMA DIRECTA  
 $G_{bM}$ , en  $W/m^2$

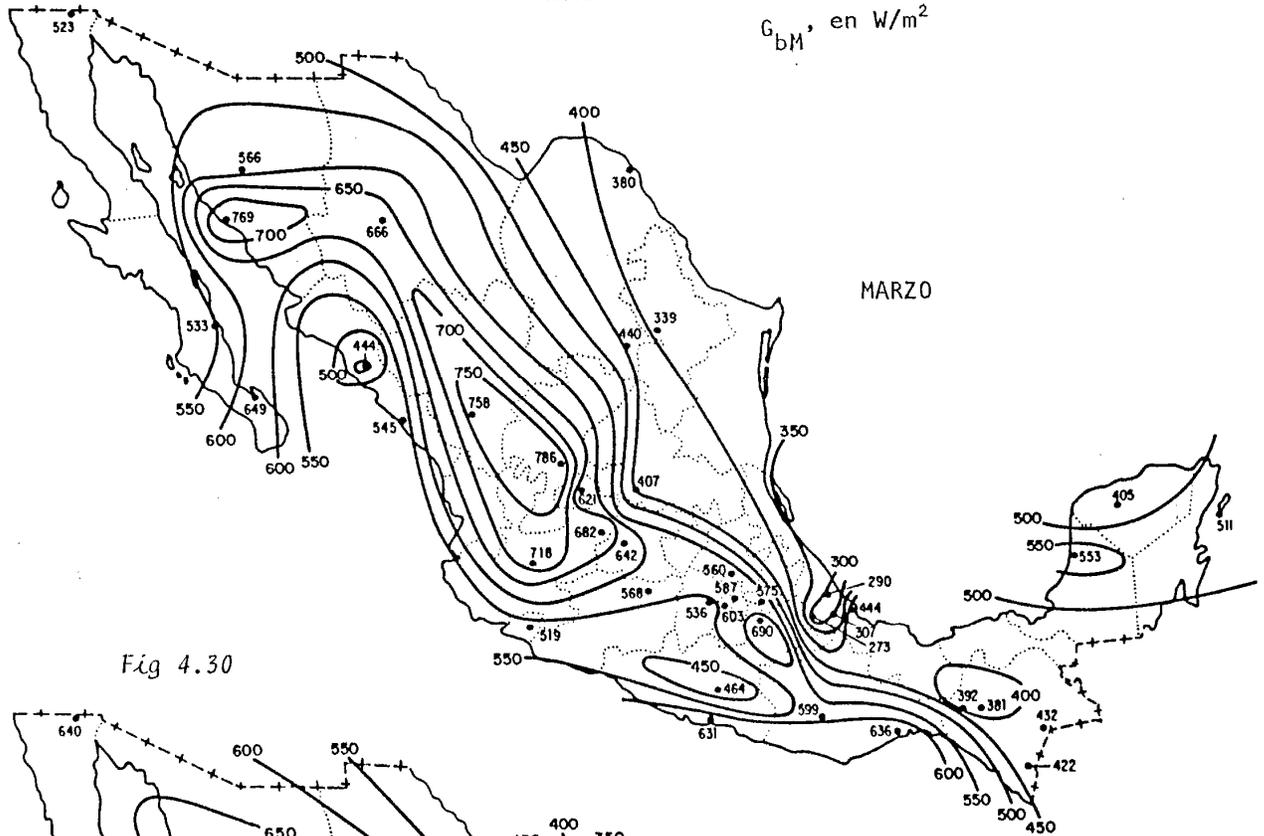


Fig 4.30

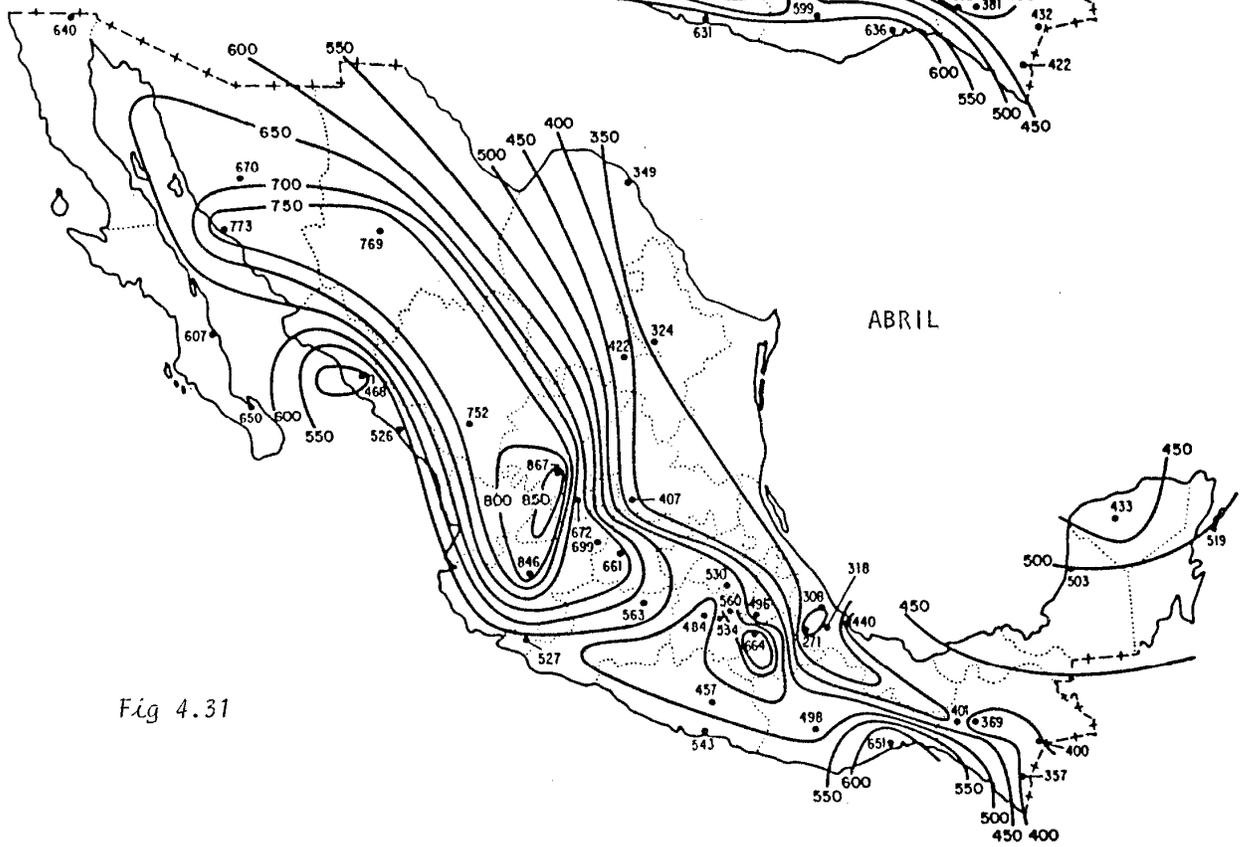
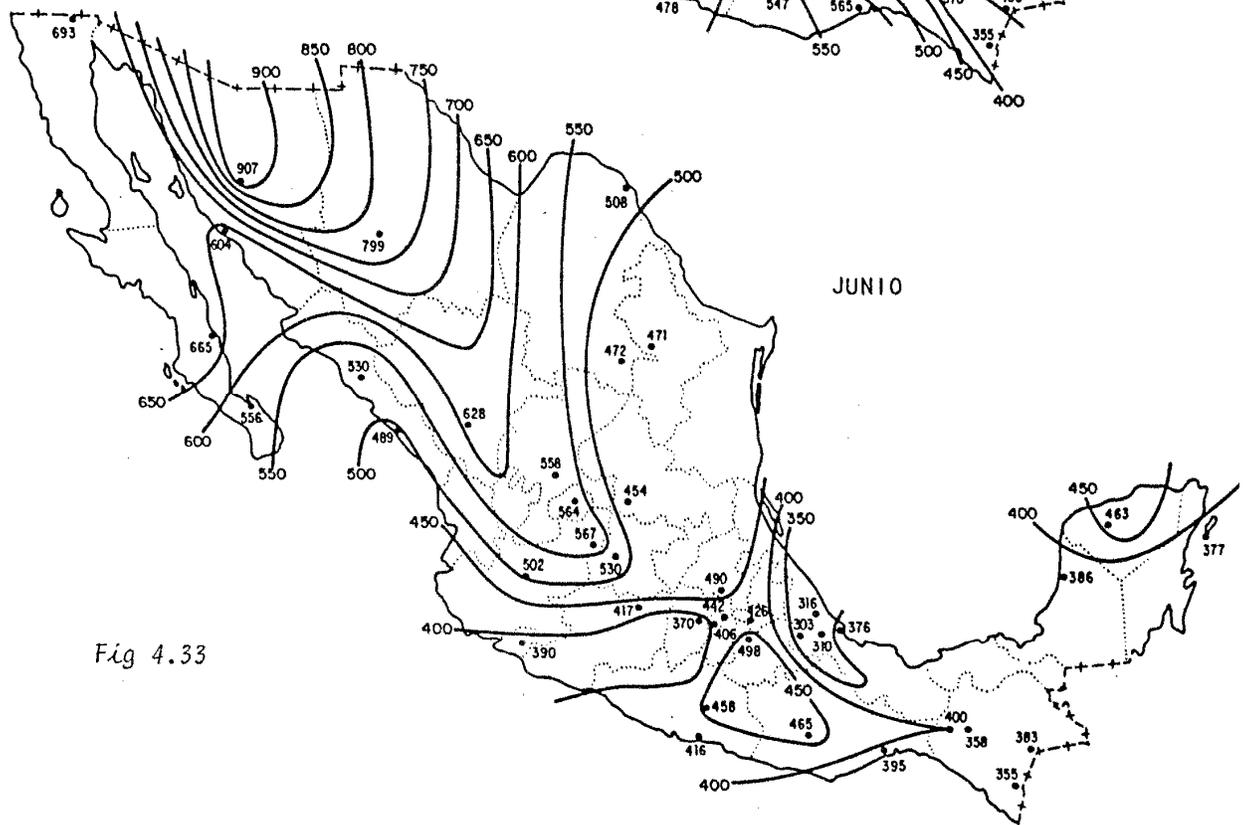
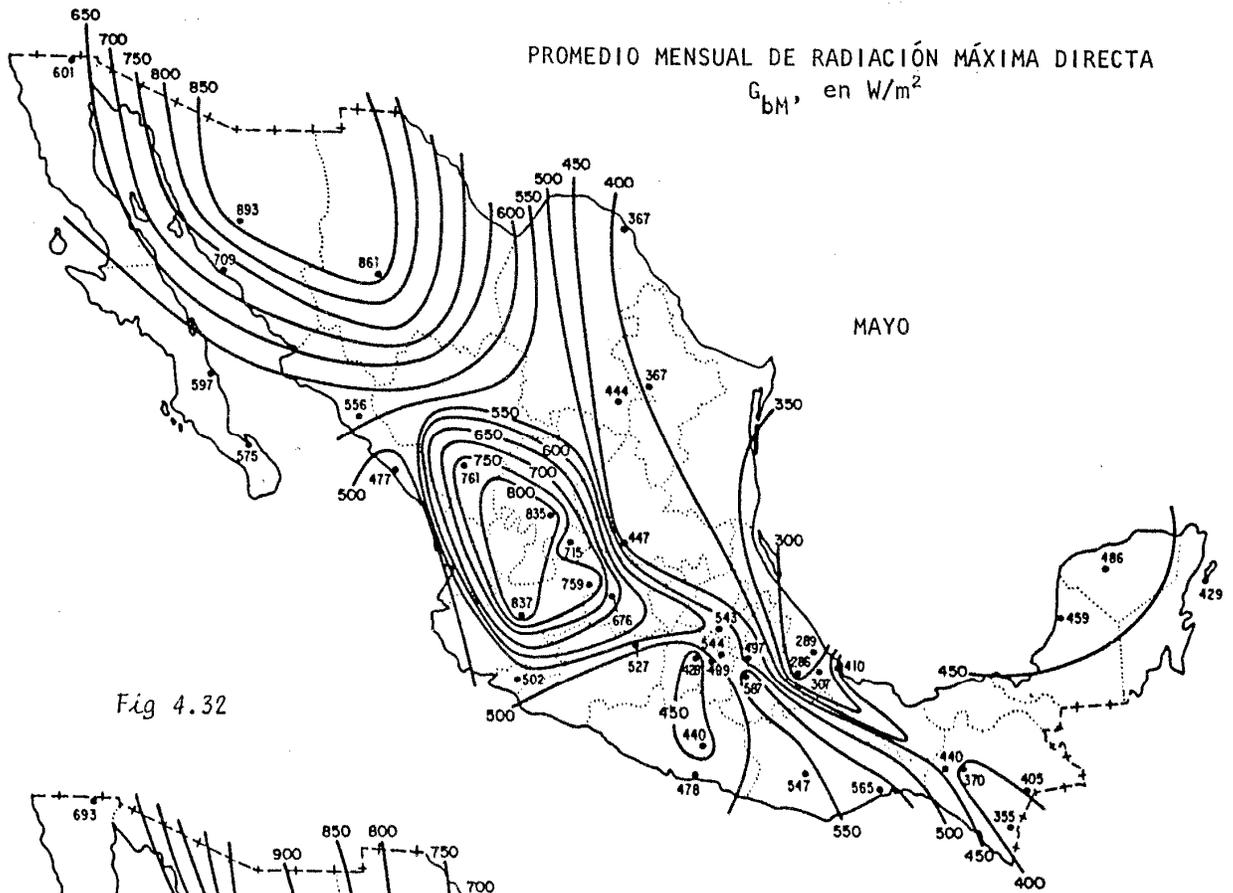


Fig 4.31



PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN MÁXIMA DIRECTA  
 $G_{bM}$ , en  $W/m^2$

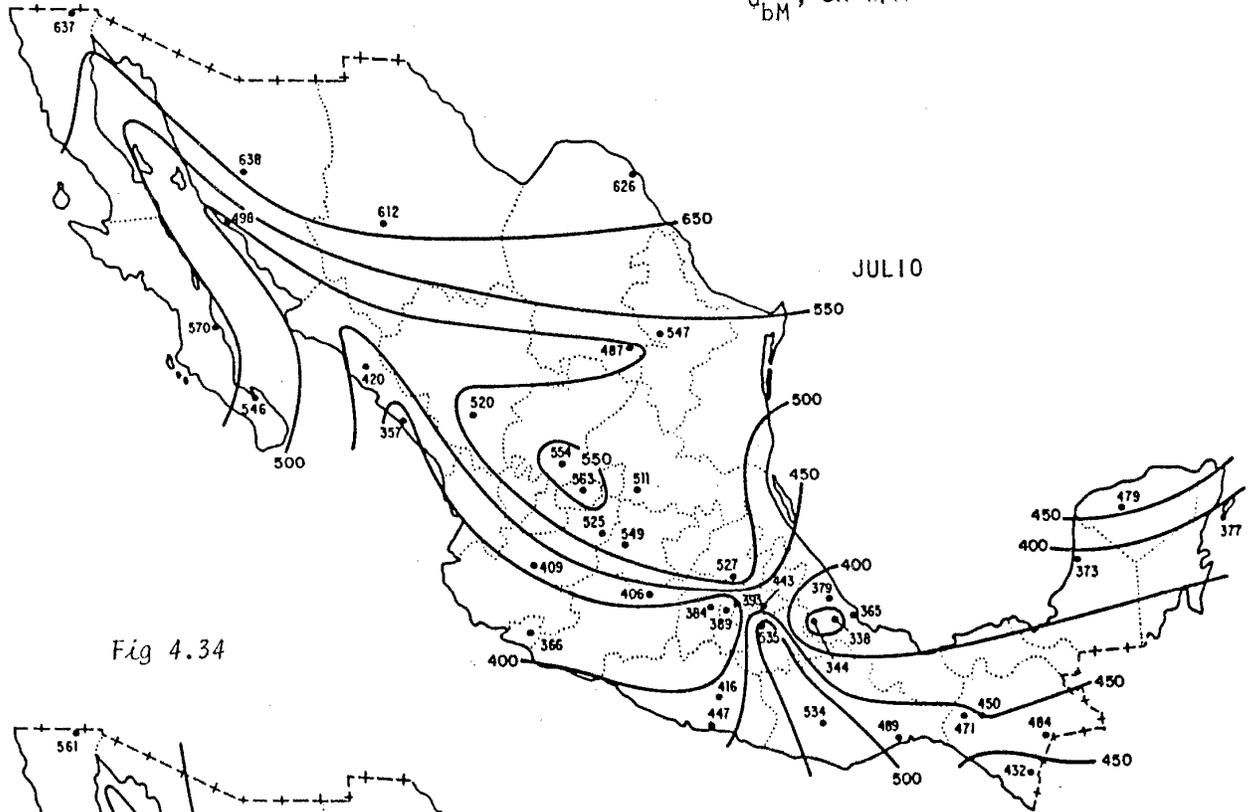


Fig 4.34

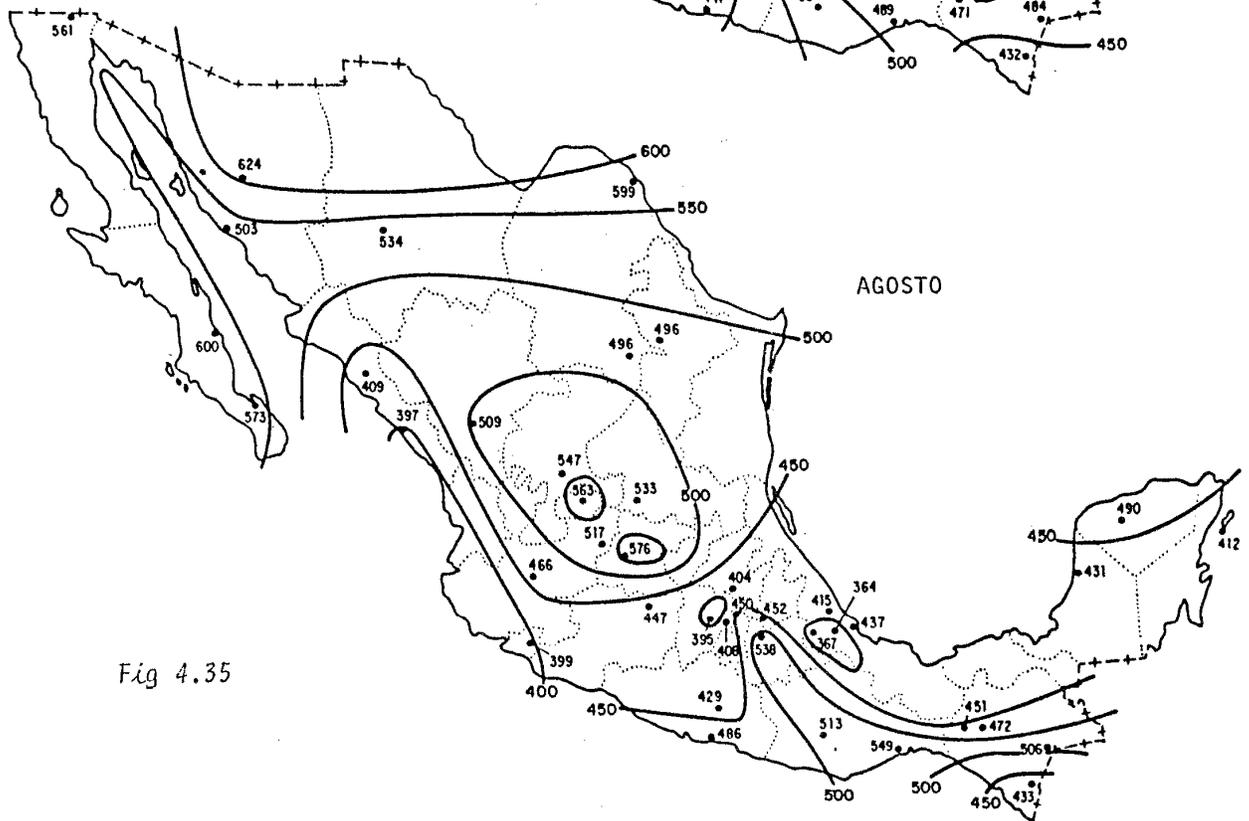


Fig 4.35



PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN MÁXIMA DIRECTA  
 $G_{bM}$ , en  $W/m^2$

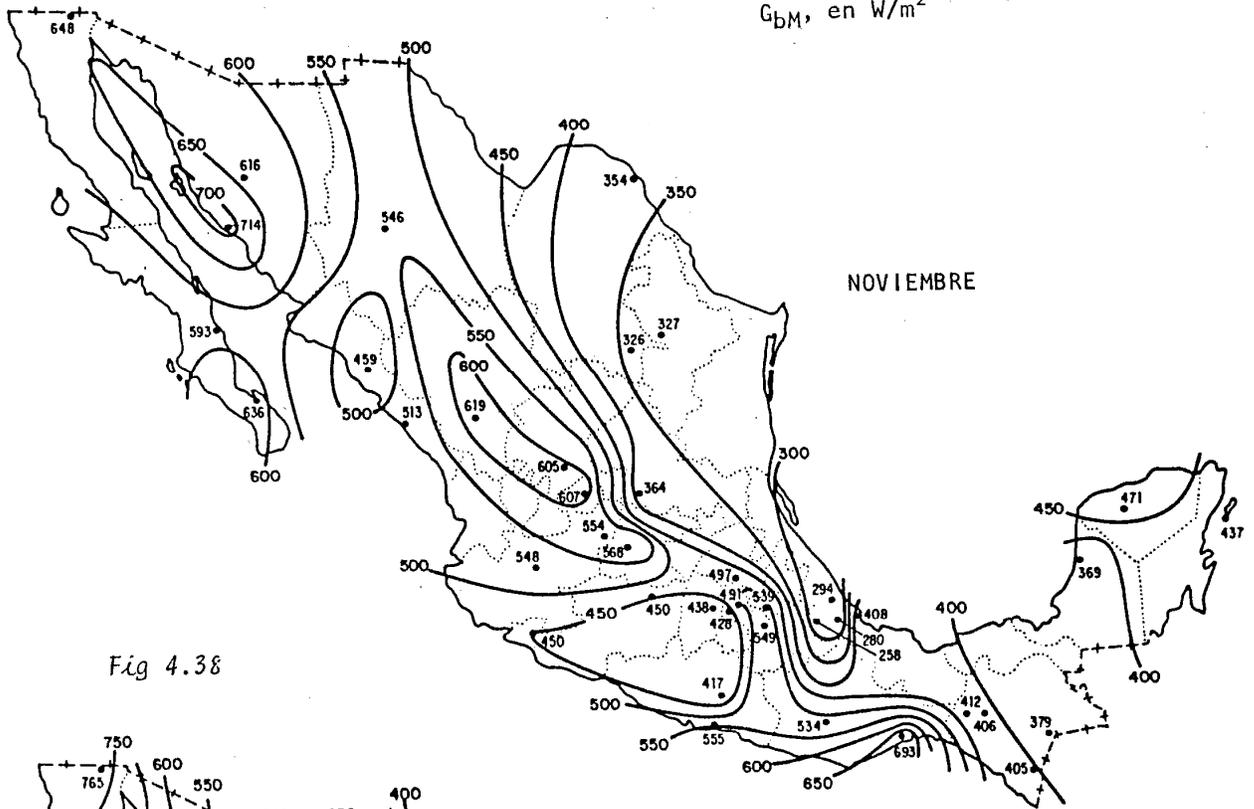


Fig 4.38

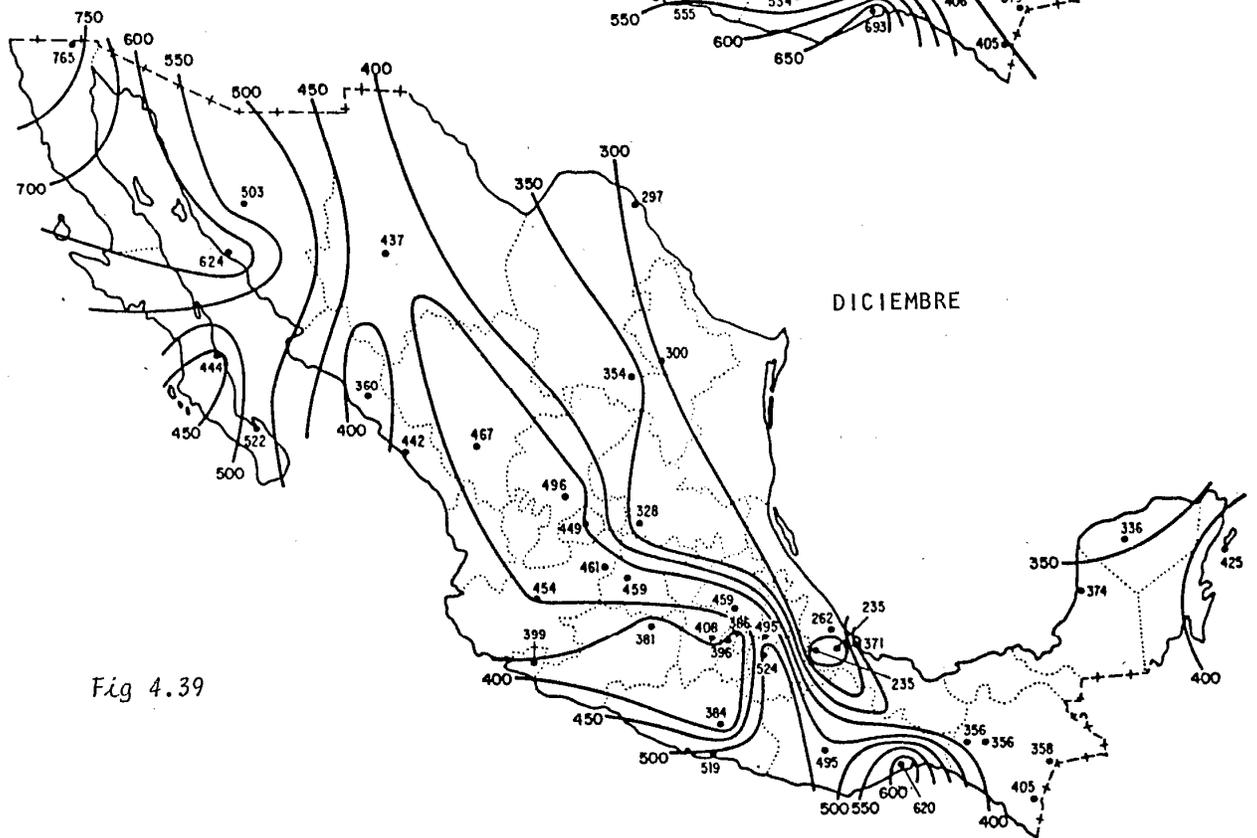


Fig 4.39

## ANEXO B

CONSTRUCCIÓN DE UN  
CALENTADOR SOLAR DE AGUA,  
CON UN TANQUE DE  
ALMACENAMIENTO DE 200  
LITROS, EN MÉXICO D.F.

## CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA CON UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 200 LITROS EN MÉXICO D.F.

Se describe en secuencia fotográfica, el proceso, paso a paso, para construir calentadores solares de 2 m<sup>2</sup> de área de captación, que consta de dos partes: el captador y el tanque de almacenamiento.

### A) Captador.

Consta de dos cabezales de tubo de cobre con un diámetro de 1.91 cm (3/4 pulg.) (fig. B.1); cada uno de ellos debe perforarse con broca de 1/2 pulgada a fin de obtener agujeros de 1.27 cm y con intervalos de 10 cm. La longitud de cada cabezal es de 1.22 m. En cada perforación se solda un tubo de 0.95 cm (3/8 pulg.) de diámetro y 2 m de longitud, con soldadura de bronce o latón y soplete de acetileno (fig.B.2).

Para captar la mayor cantidad de radiación solar se requiere añadir a cada tubo de 3/8 pulgada una aleta, la cual se describe a continuación:

Las aletas se construyen con lámina de cobre recocido, calibre 30 (1/64 pulg.), la cual se encuentra en el mercado en rollos de 5 m y ancho de 60 cm. Se cortan tramos de 60 X 11 cm (fig. B.3). Se troquelan en una prensa a fin de formar en su centro un canal que se adapte al tubo de 3/8 pulg. Dichos tramos se sueldan posteriormente, con un lijado previo, a este tubo con soldadura de estaño del tipo 95/5, usando soplete de gas o gasolina; en la fig. B.4 se muestra cómo una aleta debe ir soldada al tubo. Es importante que se distribuya uniformemente un cordón de soldadura a lo largo de todo el tubo y la lámina, por ambos lados, para lograr una buena transferencia de calor.

Una vez realizado este proceso en los diez tubos de 3/8 pulg., se tendrá la parte esencial del calentador solar (fig. B.5) o sea el captador.

Se recomienda pintar de negro mate los tubos de cobre y sus aletas (la pintura Sherwin Williams, tipo Enamel, negro mate, es la de mayor durabilidad, teniendo

propiedades de absorptividad de la radiación solar de 0.9). Antes de pintar se recomienda lavar y desengrasar con jabón.

También se puede utilizar en lugar de pintura negra una película selectiva como el cobre negro, el cual tiene mejores propiedades ópticas que la pintura negra (su absorptividad para la radiación solar es de 0.9 y su emisividad es de 0.16). Este tratamiento químico se puede hacer con el producto conocido como Ebonol C especial.

Una vez pintado de negro o ebonolizado este armazón, debe protegerse de la intemperie y del viento con objeto de reducir pérdidas por convección y conducción al aire. Para tal fin hay que construir una caja metálica de lámina galvanizada, calibre 27 (1/64 pulg.), de 2.10 m de largo, 1.20 m de ancho y 10 cm. de alto (fig. B.6). En la parte superior derecha lleva una perforación de 1 pulg. para la salida del tubo del agua caliente (fig. B.7), y en la parte inferior izquierda otra perforación, de 3.81 cm (1 ½ pulg.) para la entrada del tubo de agua fría. El fondo de la caja se cubre con lana de vidrio con un espesor de 2.54 cm (1 pulg.), a fin de aislar térmicamente la caja y el colector (fig. B.7).

La parte superior de la caja lleva unas cejas para la colocación de un vidrio de 3 mm de grosor (fig. B.8), sellándose éste con silicón para evitar que entre humedad al aislante y se empañe el cristal. El vidrio hará que el colector trabaje con el fenómeno conocido como efecto invernadero, reduciéndose así las pérdidas de calor.

#### B) Tanque de almacenamiento de agua caliente.

El tanque de almacenamiento de agua caliente tiene una capacidad de 200 litros (fig. B.9) y se construye de lámina de fierro. Debe contar con las siguientes conexiones:

Los tanques comerciales traen dos entradas roscadas (fig. B.10), una de 2 ½ pulg. y otra de ¾ pulg, de las cuales la primera se usa para la entrada de agua caliente proveniente del captador y la otra para la captación de agua fría, que surte el tinaco, o sea la que alimenta al sistema calentador solar. En esta última entrada se conecta un niple roscado de ¾ pulg. (difusor) con una longitud de 30 cm; el extremo que va dentro del tanque está tapado, además tiene perforaciones en los lados (fig. B.11) con el fin de evitar que el agua fría que viene del tinaco con presión, se mezcle con el agua caliente, y que se encuentra en la parte superior del tanque.

En la parte central de la base del tanque se hace una perforación adicional de ¾ pulg. (fig. B.10) para soldar un tubo galvanizado de fierro de ¾ pulg., y que servirá para alimentar al colector con el agua menos caliente del fondo del tanque. Por lo que respecta a los detalles de la entrada de agua caliente en el tanque y que proviene del captador, ésta lleva un tubo de ½ pulg, de PVC, de pared gruesa (fig. B.12) que va por dentro del tanque, siendo su objetivo distribuir dentro del tanque el agua caliente en forma estratificada a través de agujeros de 3/8 pulg. y con espaciamientos de una pulgada, de tal manera que cada perforación quede una enfrente de la otra sobre el tubo. La longitud del tubo es de 80 cm; se conecta a través de un cople de ¾ pulg (fig. B.13), el cual está soldado al tapón de 2 ½ pulg., que el tanque trae originalmente.

La obtención del agua caliente del tanque se lleva a cabo por la parte superior del tanque mediante un niple de ¾ pulg. soldado en la parte central (fig. B.14) del tanque y con una reducción de ½ pulg., para alimentar a las regaderas. Una vez que se terminó de soldar todos los niples se recomienda vaciar dos litros de pintura epóxica y girar en todos los sentidos el tanque para que se impregne en toda su parte interior. Con esto quedará protegido para que no se oxide y pueda servir durante más de cinco años.

Para mantener el agua caliente del tanque a lo largo de la noche se recomienda forrarlo con aislante térmico (lana de vidrio, perlita, lana mineral, aserrín, fibra de coco, etc.), con un espesor de 10 cm.

A su vez dicho aislante debe protegerse de la intemperie con un forro de lámina galvanizada, en forma cilíndrica de 80 cm de diámetro.

Una opción puede ser utilizar el tanque en forma horizontal (fig. B.15), lo cual se hace si la altura del tinaco de agua fría no es lo suficientemente alta para alimentar al sistema colector solar (las entradas y salidas cambian hacia la parte cilíndrica del tanque).

La conexión entre el captador y tanque de almacenamiento se muestra en las fig. B.16 y B.17. El captador debe tener una inclinación igual a la latitud del lugar (fig. B.18) y orientarse hacia el sur.

Todas las tuberías que conducen agua caliente deben forrarse con medias cañas de lana de vidrio para tubería de  $\frac{3}{4}$  pulg. Posteriormente, se cubren estas con lámina de aluminio a fin de protegerlas de la intemperie; finalmente se sellan las hendiduras con Apcoseal.

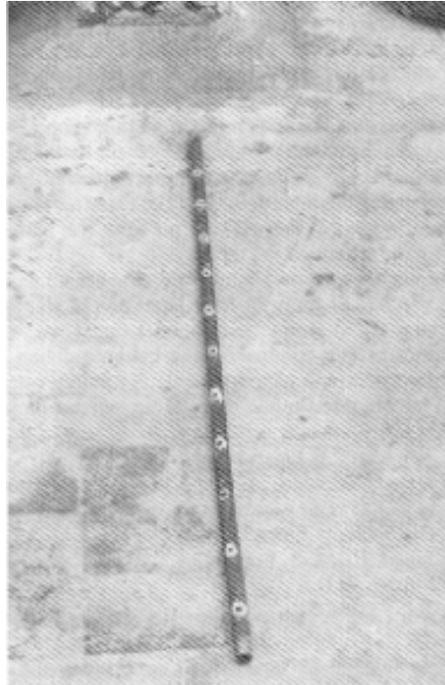


Figura B.1. Cabezal con agujeros de 1.91 cm (3/4

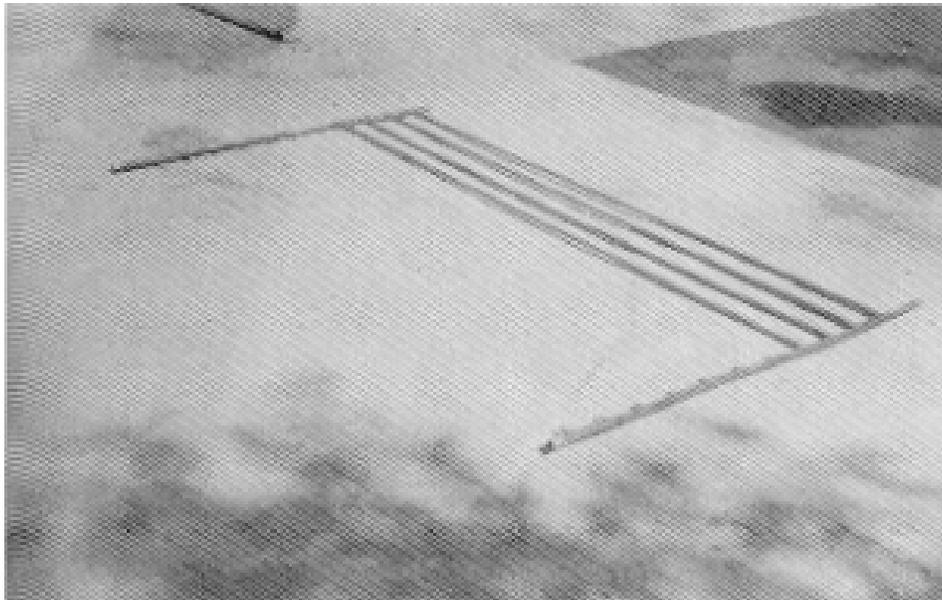


Figura B.2. Tubos de 0.95 cm (3/8 pulg.) soldados a los dos

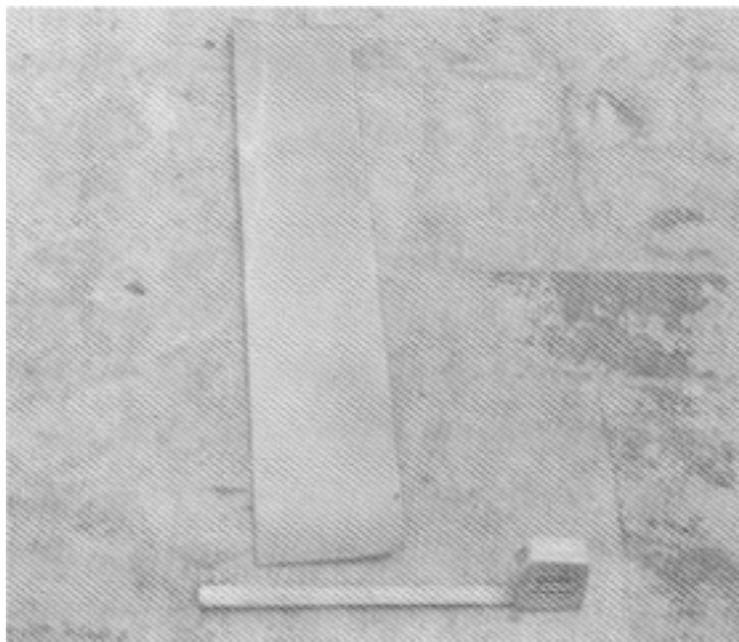


Figura B.3. Tramo de lámina de cobre 60 X

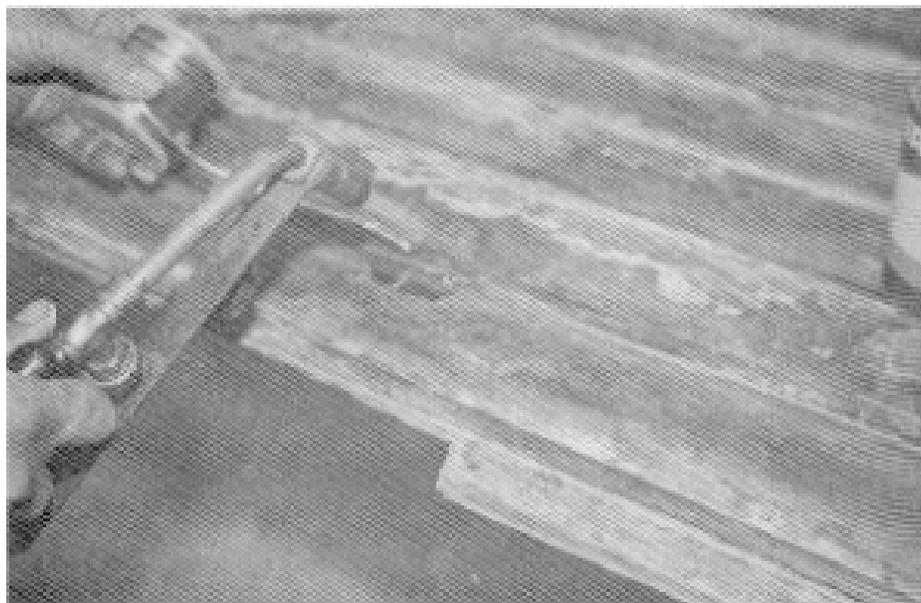


Figura B.4. Lámina de cobre soldada al tubo de 0.95 cm (3/8 pulg.) de

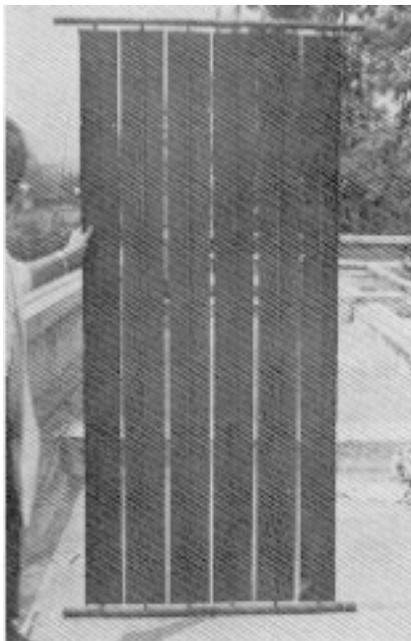


Figura B.5. Colector solar

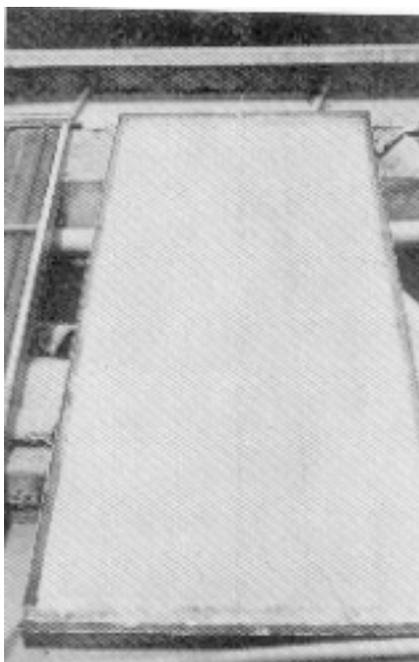


Figura B.6. Caja de lámina galvanizada con lana de vidrio

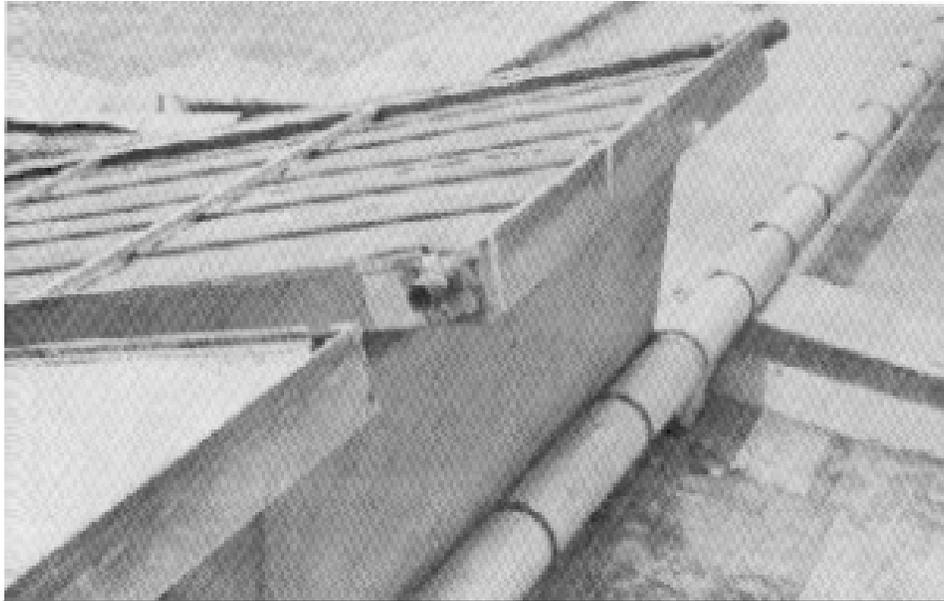


Figura B.7. Perforación de una pulgada en caja metálica para salida de tubo de agua caliente.

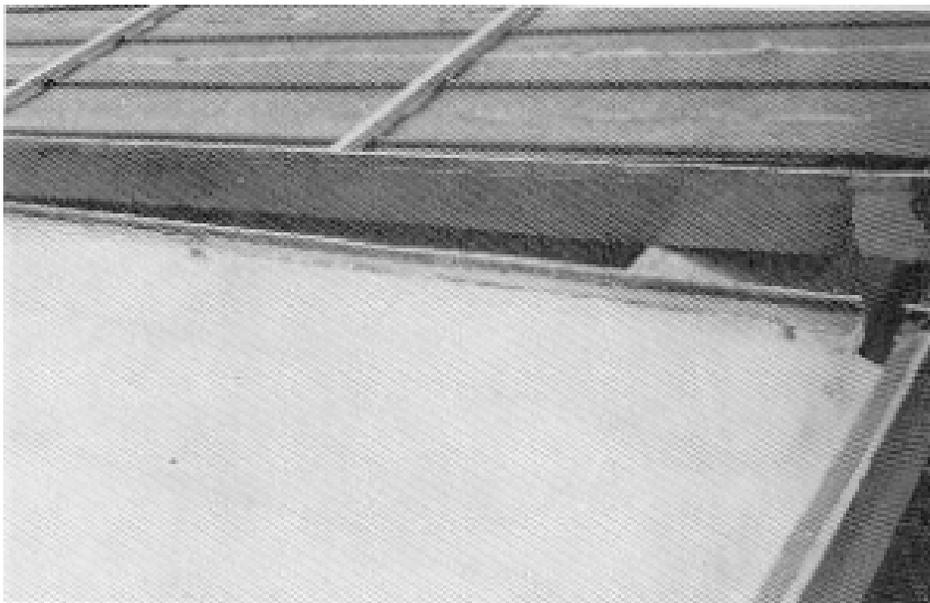


Figura B.8. Cejas para la colocación de



Figura B.9. Tanque metálico de 200

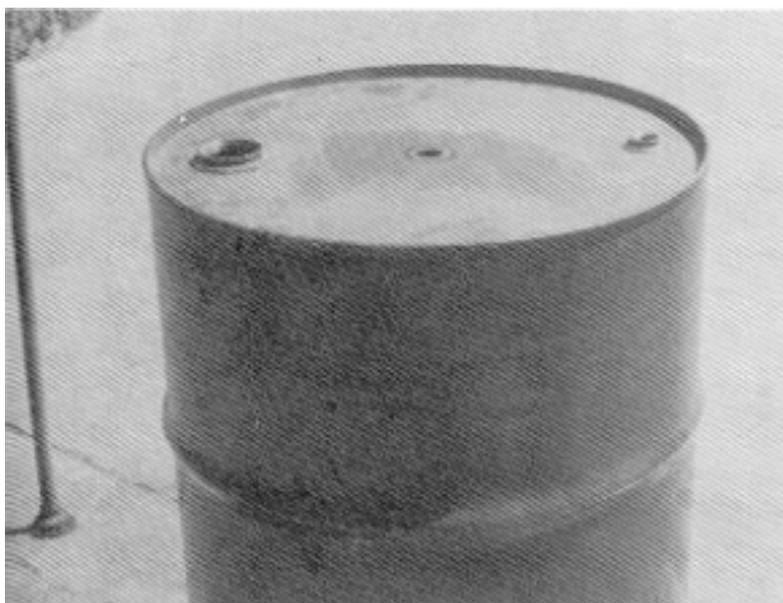


Figura B.10. Tanque con dos entradas roscadas, de 1.91 cm (3/4 pulg.) y de 3.81 cm (1 ½ pulg.).

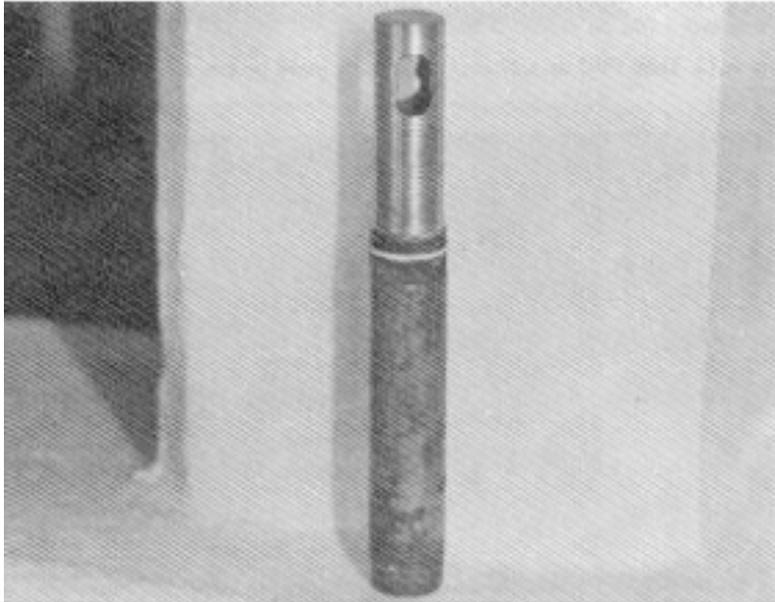


Figura B.11. Niple con perforaciones y tapado en un extremo

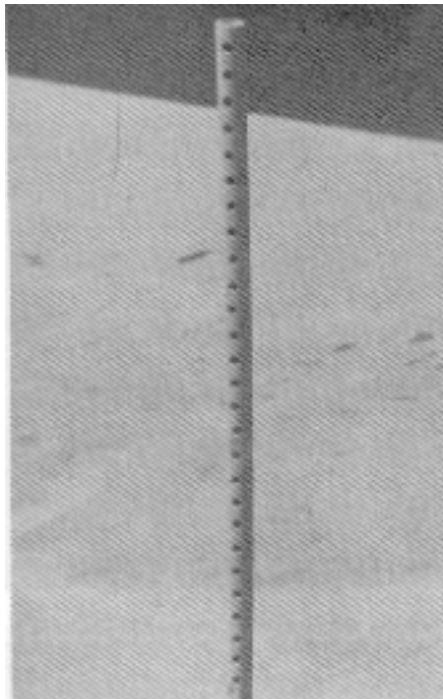


Figura B.12. Tubo de PVC de 1.27 cm (1/2 pulg.) y pared gruesa, roscada en uno de sus extremos.

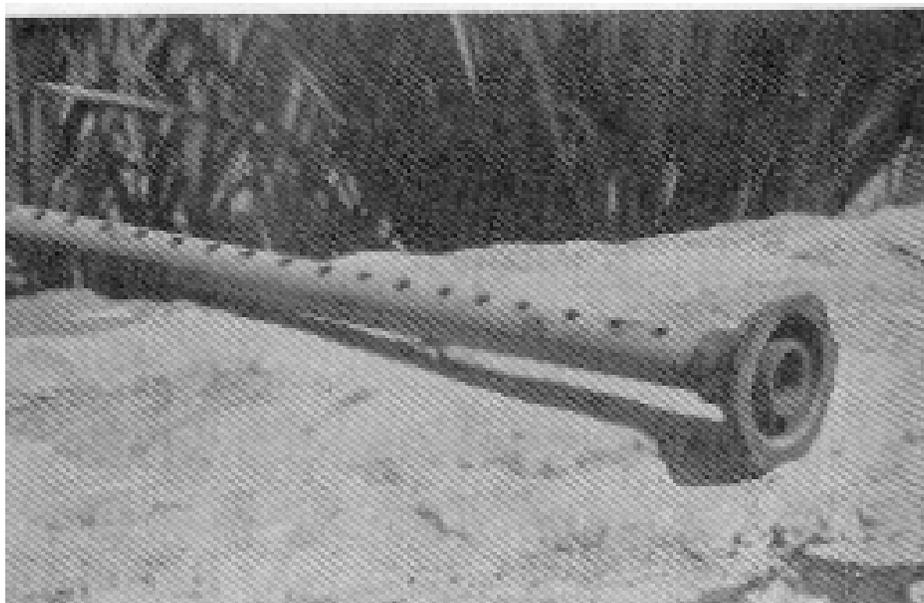


Figura B.13. Cople de 1.91 cm (3/4 pulg.) soldado al tapón de 3.81 cm (1 ½ pulg.) y con tubo de PVC puesto.

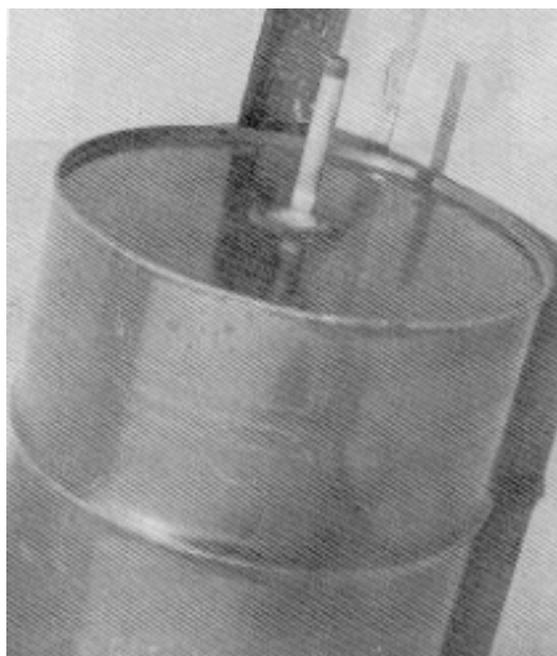


Figura B.14. Niple de 1.91 cm (3/4 pulg.) soldado al tanque de 200 litros para extraer agua caliente para los servicios.

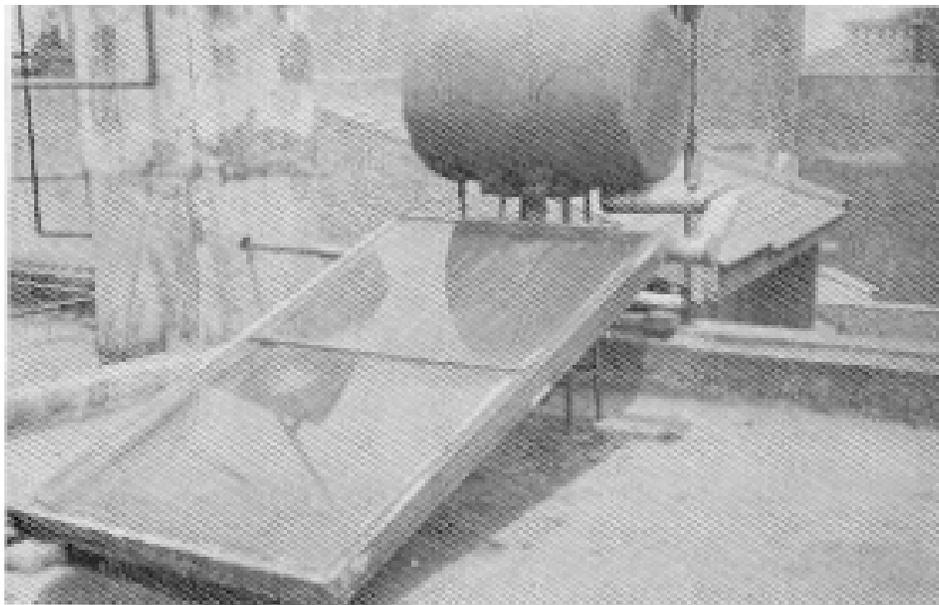


Figura B.15. Calentador con tanque de almacenamiento

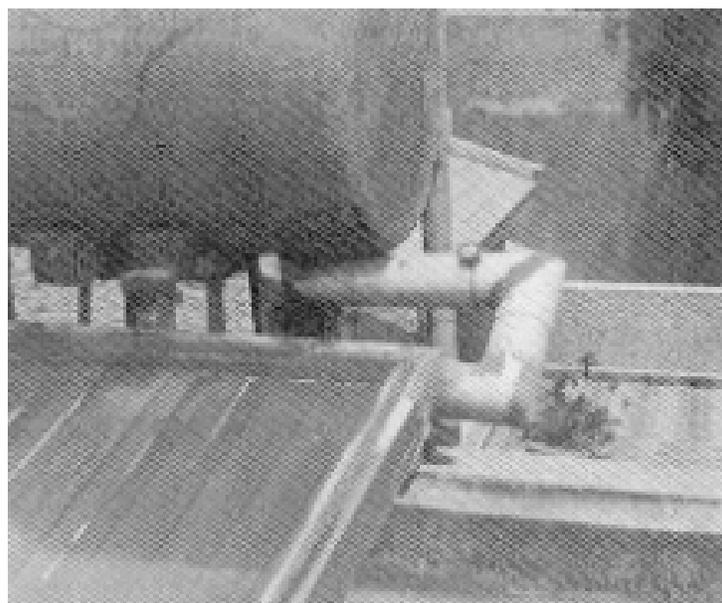


Figura B.16<sup>a</sup>. Conexión del agua caliente del colector hacia el tanque de almacenamiento horizontal.

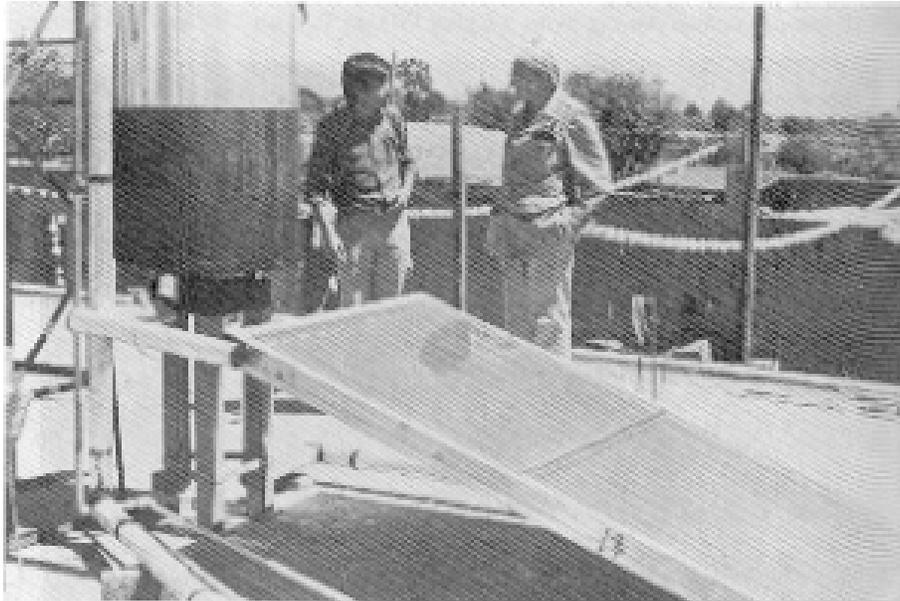


Figura B.16b. Conexión del agua caliente del captador hacia el tanque de almacenamiento vertical.



Figura B.17. Alimentación de agua menos caliente del tanque al

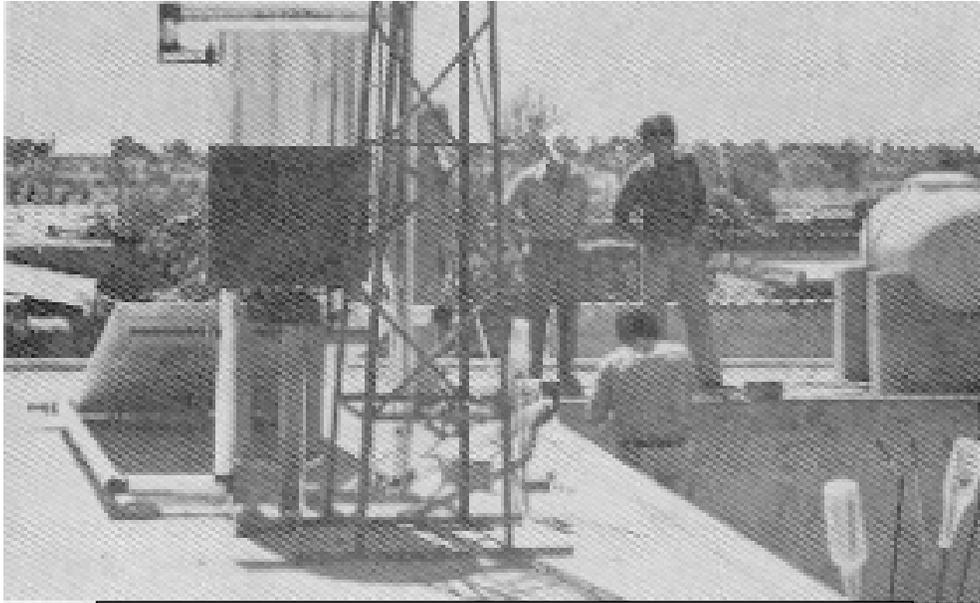


Figura B.18<sup>a</sup>. Inclinación del colector, igual a la latitud del

# ANEXO C

## UNIDADES DE ENERGÍA.

JULIO (J): Unidad de energía, que corresponde al trabajo realizado por una fuerza de 1 Newton (N) que provoca el desplazamiento de 1 metro.

VATIO (W): Unidad de potencia. Su relación con la energía es la siguiente:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Algunos de los múltiplos del vatio son:

Vatio-hora (Wh) = Unidad de energía cuya relación es  $1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ J}$

Kilovatio-hora (kWh) = Unidad de energía cuya relación es  $\text{kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ .

Megavatio (MW) = un millón de vatios.

Gigavatio (GW) = Corresponde a mil millones de vatios =  $10^9 \text{ W}$ .

Gigavatio-hora (GWh) = que corresponde a mil millones de kilovatios-hora:

$$3.6 \times 10^{12} \text{ J}.$$

Un micrómetro equivale a una milésima de milímetro:

$$1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} = 1000 \mu\text{m}$$

Un micrómetro equivale a una millonésima de metro:

$$1 \mu\text{m} = 0,000 \text{ 001 m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 1 \text{ 000 000 } \mu\text{m}$$

$$1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$$

$$1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m}$$

## BIBLIOGRAFÍA.

- Almanza Salgado, Rafael, *“Ingeniería de la energía solar”*, Editado por el Colegio Nacional, 1994, México, p.p. 418.
  
- *Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua (CSA) en el Sector Doméstico Mexicano, realizado por Econergy México, SA de CV, con la supervisión de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), México, D.F., Octubre del 2006, p.p. 84.*
  
- Cantarell Lara, Jorge, *“Geometría, energía solar y arquitectura”*, Editorial Trillas, 1990, México, p.p. 227.
  
- Casanova Colas José, Bilbas Julia, *“Curso de Energía Solar”*, Editado por el Secretariado de publicaciones de Valladolid, 1993, p.p. 533.
  
- Castro Gil M, *“Energía solar térmica de baja temperatura”*, Serie de monografías técnicas de energías renovables, Sevilla, España, Editorial Progensa, 2000, p.p. 94.
  
- Cusa Ramos, Juan de, *“Energía solar para viviendas”*, Monografías ceac de la construcción, Barcelona, España, 1989, p.p. 190.
  
- Daniels, *“Uso directo de la energía solar”*, Editorial H. BLUME EDICIONES, cuarta reimpression, 1982, p.p. 301.

- Fernández Salgado José M., Gallardo Rodríguez Vicente, *“Energía Solar Térmica en la Edificación”*, AMV EDICIONES, Primera edición, 2004, p.p. 327.
- Fernández Zayas José Luis, *“Introducción al estudio de los sistemas solares activos”*, Instituto de ingeniería, UNAM, p.p. 109.
- Guillén Solís Omar, *“Energías Renovables una perspectiva ingenieril”*, Editorial Trillas, México 2004, p.p. 128.
- Ibañez Plana M., Rosell Polo J.R., Rosell Urrutia J.J., *“Tecnología Solar, Energías Renovables”*, Ediciones Mundi-Prensa, Impreso en España, 2005, p.p. 350.
- López Campos, Carlos Enrique, *“Física de la energía solar”*, Universidad de Chapingo, México, 1990, p.p. 131.
- Montgomery Richard H, *“Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento”*, Editorial Limusa, Impreso en México, 1986, primera edición, p.p. 190.
- Perales Benito, Tomás, *“Instalación de paneles solares térmicos: componentes, instalación y desarrollo de proyectos”*, Editorial Alfaomega, tercera edición, México, 2008, p.p. 160.
- *Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (Procalso)*, realizado por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) en colaboración con Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)

y *Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Agosto de 2007, Impreso en México, p.p. 96.*

- Quadri, Néstor Pablo, *“Energía Solar: agua caliente, energía fotovoltaica, calefacción, energía eólica”*, Editorial Alsina, Impreso en Buenos Aires, Argentina, 2003, p.p. 166.
- Silvestrini, Vittorio, *“Uso de la energía solar”*, Ediciones del Serbal, Barcelona, España, 1981, p.p. 140.

#### **Revista.**

- Ramos Niembro Gaudencio, Patiño Flores Alejandro, *“La innovación tecnológica: Dimensionamiento, selección y beneficios del uso de calentadores solares de agua en el sector doméstico”*, *La revista solar*, Consejo XIII, Número 57, Marzo, 2006: 4-12

#### **Mesografía de información sobre energía solar.**

[www.anes.org](http://www.anes.org)

[www.censolar.com](http://www.censolar.com)

[www.portalsolar.com](http://www.portalsolar.com)

[www.solarweb.net](http://www.solarweb.net)

[www.erenovable.com](http://www.erenovable.com)

[www.mundoenergiarenovable.com](http://www.mundoenergiarenovable.com)

[www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)

[www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com)