



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACÁN**

ENERGIA SOLAR

**EL COLECTOR SOLAR TÉRMICO PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA
CALIENTE SANITARIA (ACS)**

P R O Y E C T O D E T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

KISIEV SALGADO CASTRO

ASESORES:

ING. ALFREDO MIRANDA ARRIAGA

ING. JOSÉ ANTONIO MORA JACOBO

México D.F.

SEPTIEMBRE 2008

Justificación:

Actualmente y debido a la necesidad del calentamiento de piscinas, ya sean estas para fines recreativos, deportivos, medicinales y de rehabilitación. Así como también en aplicaciones comerciales, procesos industriales y en general cualquier situación en donde se requiera agua caliente, el estudio y especialización en el uso de energías alternativas y con ello la utilización de sistemas más eficientes y poco contaminantes, serán un factor a considerar dentro de los proyectos energéticos de los próximos años. Tomando en cuenta que el ahorro de energía en las últimas fechas ha cobrado gran importancia dado el agotamiento y encarecimiento de los combustibles fósiles, así como la inherente contaminación que conlleva su uso.

IPN
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACAN

TESIS INDIVIDUAL

Que como prueba escrita de su Examen Profesional para obtener el Título de Ingeniero Mecánico deberá desarrollar el C.

KISIEV SALGADO CASTRO

“ENERGIA SOLAR”

**EL COLECTOR SOLAR TÉRMICO PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA
(ACS)**

Actualmente y debido a la necesidad del calentamiento de piscinas, ya sean estas para fines recreativos, deportivos, medicinales y de rehabilitación. Así como también en aplicaciones domesticas, comerciales, procesos industriales y en general cualquier situación en donde se requiera agua caliente sanitaria (ACS), el estudio y especialización en el uso de energías alternativas y con ello la utilización de sistemas más eficientes y poco contaminantes, serán un factor a considerar dentro de los proyectos energéticos de los próximos años. Tomando en cuenta que el ahorro de energía en las últimas fechas ha cobrado gran importancia dado el agotamiento y encarecimiento de los combustibles fósiles, así como la también inherente contaminación del ambiente que conlleva su uso.

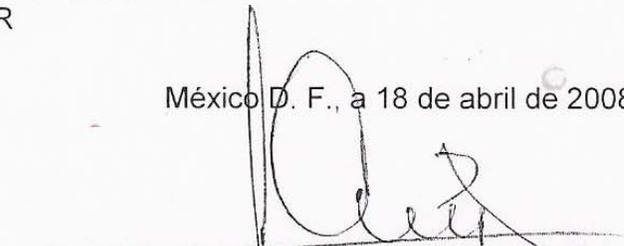
CAPITULADO

- I.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES
- II.- RADIACIÓN EXTRATERRESTRE
- III.- RADIACIÓN EXTRATERRESTRE SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES E INCLINADAS.
- IV.- FISICA DE LA CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA
- V.- EL COLECTOR SOLAR TÉRMICO
- VI.- FACTORES DE DISEÑO EN UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA
- VII.- RADIACIÓN TRANSMITIDA Y ABSORBIDA A TRAVÉS DE UN VIDRIO
- VIII.- RADIACIÓN TOTAL ABSORBIDA POR EL COLECTOR
- IX.- TERMODINÁMICA DEL COLECTOR
- CONCLUSIONES

México D. F., a 18 de abril de 2008



ING. ALFREDO MIRANDA ARRIAGA
PRIMER ASESOR



ING. JOSE ANTONIO MORA JACOBS
SEGUNDO ASESOR

ING. RAMON AVILA ANAYA
JEFE DE LA CARRERA DE I.M.

ING. RUBEN JUAREZ BARRIENTOS
SUBDIRECTOR ACADEMICO.

*Cuando el sol se eclipsa para desaparecer
se ve mejor su grandeza*

Lucius Annaneus SENECA, filósofo romano.

Agradecimientos:

*El día de hoy tiene en sus manos un ejemplar del proyecto de tesis en el cual se vieron invertidos horas, días, meses y años para finalizarlo; y donde sobre todo se condensó el esfuerzo de muchas personas importantes en mi vida, como **hijo**, como **estudiante**, como **profesor** y sobre todo como **ser humano**.*

*Para cada faceta de mi vida hubo gente que creyó en mí, y con la que estaré en deuda por siempre. Por lo que agradezco a mis **padres** por los ideales que inculcaron en mí, a la **ESIME** y a sus **profesores** por formar en un servidor un profesionista digno de cumplir cualquier reto de ingeniería y de la vida, a mis **alumnos** por ser ellos los impulsores de la constante labor de mantenerme actualizado en los temas de ingeniería, y a mis **hermanos** y **amigos** porque al haber yo cometido errores, ser ellos los que me los han hecho saber con la única finalidad de formar íntegramente a la persona y ser humano que debo representar.*

Sin el apoyo y confianza de todos los arriba mencionados, difícilmente habría yo concluido el ciclo de estudiante, que con el presente trabajo, he dado por concluido. Por lo anterior y muchas otras cosas más que hoy quizás se me escapen por citar...

... gracias, muchas gracias.

Kisiev Salgado Castro.

CONTENIDO

ALCANCE Y OBJETIVO	3
1.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES	
1.1 Radiación y tipos de radiación	5
1.2 Estructura y datos del Sol	6
1.3 Efecto de la distancia Tierra-Sol	7
1.4 Efecto del ángulo de declinación	8
1.5 Componentes de la radiación	10
1.6 Irradiación en cielo despejado	12
1.7 Irradiación en superficies planas	13
1.8 Tiempo solar	15
1.9 Promedio mensual de radiación en superficies inclinadas	18
1.10 Orientación del colector solar	20
2.- RADIACIÓN EXTRATERRESTRE SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES E INCLINADAS	
2.1 Superficies Horizontales	22
2.2 Superficies Inclinadas	24
2.3 Radiación sobre superficies terrestres	25
2.3.1 Radiación difusa	25
2.3.2 Mapas de irradiación global solar en la república mexicana	27
2.3.3 Radiación total sobre una superficie terrestre inclina	29
2.4 Estimación de la radiación extraterrestre horaria sobre superficies horizontales	34
2.5 Calculo de irradiación sobre superficies terrestres por horas del día	34
2.6 Calculo de las Componentes Directa y Difusa horarias	38
3.- FISICA DE LA CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TERMICA	
3.1 Absorbancia	43
3.2 Transmitancia	44
3.3 Reflejancia	44
3.4 Emitancia	45
3.5 Superficies selectivas	46
3.6 Efecto del ángulo de incidencia sobre la transmitancia	49

4.-EL COLECTOR SOLAR TERMICO

4.1 Energía solar térmica	52
4.2 Clases de colectores solares	52
4.3 Colector solar térmico de baja temperatura	52
4.4 Funcionamiento por termosifón	53
4.5 Funcionamiento por circulación forzada	54
4.6 Importancia del colector solar térmico en México	56

5.- FACTORES DE DISEÑO EN UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA

5.1 Elementos constitutivos de un colector solar térmico de baja temperatura	58
5.2 Marco de aluminio anodizado	58
5.3 Cubierta de vidrio	59
5.3.1 Efecto de las impurezas en el vidrio	61
5.4 Placa absorbadora	62
5.4.1 Placa absorbadora-removiendo el Calor	63
5.4.2 Diseño de la placa absorbadora	65
5.4.3 Transfiriendo el calor al fluido	66
5.5 Cabezales de alimentación y descarga	69
5.6 Aislante térmico	70
5.7 Caja del colector	71

6.- RADIACION TRANSMITIDA Y ABSORBIDA A TRAVES DE UN VIDRIO

6.1 Introducción	73
6.2 Polarización	73
6.3 Polarización por reflexión	74
6.4 Reflexión de la radiación	74
6.5 Transmitancia a través de la cubierta	76
6.6 Absorción del vidrio	78
6.7 Transmitancia para la radiación difusa	80
6.8 Producto transmitancia-absorbancia	82
6.9 Dependencia angular del producto transmitancia-absorbancia	84
6.10 Radiación total absorbida por el colector	85
6.10.1 Radiación absorbida horaria	85
6.10.2 Promedio mensual de radiación absorbida	87

7.- TERMODINAMICA DEL COLECTOR

7.1 Balance de energía para un colector solar plano	91
7.2 Coeficiente total de pérdidas de calor	91
7.3 Distribución de temperatura entre tubos y el factor de eficiencia del colector	96

7.4 Factor de remoción de calor y factor de flujo del colector	98
7.5 Eficiencia del colector	100
7.6 Recta de rendimiento energético de un colector solar	101
7.7 Temperaturas promedio del fluido y placa de absorción	103
8.- APLICACIONES	
8.1 Aplicaciones	105
8.2 Sistemas de calentamiento de agua	105
8.2.1 Caso práctico de aplicación domestica	106
8.2.2 Caso práctico de aplicación deportiva	109
8.3 Refrigeración solar por absorción	111
8.4 Otras aplicaciones	112
8.5 Consideraciones y factores prácticos en el diseño de un colector solar plano.	114
8.6 PROSOLMEX Programa para la estimación del recurso solar y de apoyo en el diseño de colectores solares	115
8.7 Validación de los resultados de PROSOLMEX-1	118
8.7.1 Utilizando "RETScreen International"	119
CONCLUSIONES	123
Apéndices	
Apéndice 1	
Propiedades físicas de los materiales	124
Apéndice 2	
Mapas de radiación solar para la república mexicana	126
Bibliografía	140

Nomenclatura

A_c	Área superficial del colector [m^2]
C_p	Calor específico a presión constante [$J/kg\ C^\circ$]
H_{DN}	Irradiación directa normal a una superficie horizontal [W/m^2]
\bar{H}_T	Irradiación global promedio diario-mensual sobre una superficie horizontal terrestre [MJ/m^2]
$\bar{H}_{Td}, \bar{H}_{Tb}$	Irradiación difusa o directa promedio diario-mensual sobre una superficie horizontal [MJ/m^2]
H_0	Irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal [W/m^2]
H_{OT}	Irradiación extraterrestre promedio diario sobre una superficie horizontal [MJ/m^2]
\bar{H}_{OT}	Irradiación extraterrestre promedio diario-mensual sobre una superficie horizontal [MJ/m^2]
h_{OT}	Irradiación extraterrestre horaria sobre una superficie horizontal [MJ/m^2]
I_D	Irradiación directa instantánea [W/m^2]
I_{DN}	Irradiación directa normal a una superficie inclinada [W/m^2]
\bar{I}_T	Irradiación global diaria-mensual promedio sobre una superficie inclinada [MJ/m^2]
\dot{I}_T	Irradiación global diaria-mensual promedio sobre una superficie inclinada [MJ/m^2]
$\bar{I}_{Td}, \bar{I}_{Tb}$	Irradiación difusa o directa promedio diario-mensual sobre una superficie inclinada [MJ/m^2]
I_0	Irradiación solar extraterrestre normal al rayo de incidencia [W/m^2]
I_{OT}	Irradiación extraterrestre promedio diario sobre una superficie inclinada [MJ/m^2]
\bar{I}_{OT}	Irradiación extraterrestre promedio diario-mensual sobre una superficie inclinada [MJ/m^2]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
Q	Tasa de transferencia de calor o recolección de calor [W]
Q_u	Calor útil recolectado por el colector [W]
S	Radiación total absorbida por el colector [MJ/m^2]
s	Radiación total absorbida horaria por el colector [MJ/m^2]
T	Temperatura [C°]
T_{alred}	Temperatura de los alrededores [C°]
T_s	Temperatura absoluta [K]
U_L	Coefficiente total de pérdidas de calor del colector [$W/m^2\ C^\circ$]
T_{fi}	Temperatura del fluido de transferencia de calor a su entrada al colector [C°]

T_{fo}	Temperatura del fluido de transferencia de calor a la salida del colector [C°]
T_{fm}	Temperatura promedio del fluido de transferencia de calor al interior del colector [C°]
T_{pm}	Temperatura de la placa de absorción [C°]

Constantes de importancia

I_{SC}	Constante solar, 1353 W/m ²
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, 5.67x10 ⁻⁸ W/m ²

Caracteres Griegos

λ	Longitud de onda del espectro electromagnético
ϵ	Emisividad, radiación de toda la materia con una temperatura arriba del 0 absoluto.
ρ	Reflectancia, reflexión de la radiación incidente sobre distintas superficies.
α	Absorbancia, absorción de la radiación incidente sobre distintas superficies.
T	Transmitancia, transmisión de la radiación incidente a través distintas superficies.

Medidas Angulares

α	Altitud del sol
β	Elevación del colector o su ángulo de inclinación, medido por encima de la horizontal al suelo
γ	Ángulo acimutal del colector, medido como negativo de Este a Sur, como positivo de Oeste a Sur
δ	Inclinación solar
θ	Ángulo de incidencia entre los rayos solares y la línea normal a la superficie del colector.
θ_z	Ángulo del cenit, comprendido desde la línea normal a la superficie horizontal y la altitud solar α
ϕ	latitud del lugar
ψ	Ángulo acimutal del sol medido a partir del sur, siendo “-” del Este al Sur y “+” del Oeste al Sur.
ω	Ángulo horario solar
ω_s	Ángulo horario del amanecer/atardecer
ω'_s	Ángulo horario solar del amanecer/atardecer en el colector
$\tilde{\omega}_s$	Ángulo horario solar del amanecer/atardecer en el colector o en el horizonte, eligiéndose el menor entre estos 2 últimos.

Relaciones adimensionales

B	Coefficiente extinción
F	Eficiencia de la aleta (placa del colector)
F'	Factor eficiencia del colector
F''	Factor de flujo del colector

F_R	Factor de remoción de calor del colector
N	Número del día durante el transcurso del año
n_n	Índice de refracción de n cubierta de vidrio
\bar{K}_T	Proporción de la componente horizontal de la radiación extraterrestre que logra incidir sobre la superficie terrestre — Coeficiente de Nubosidad
k_T	Proporción de la componente horizontal de la radiación extraterrestre horaria que logra incidir sobre la superficie terrestre — Coeficiente de nubosidad horario
Re	Número de Reynolds
R_b	Coeficiente de conversión para la componente directa de la radiación
R_d	Coeficiente de conversión para la componente difusa de la radiación
R_p	Coeficiente de conversión para la componente reflejada de la radiación
R	Factor de transformación del total de radiación global sobre una superficie horizontal, a el total de radiación global sobre una superficie inclinada
r_T	Razón de la irradiación total horaria h_t sobre la irradiación global promedio diario-mensual \bar{H}_T
S	Selectividad de las superficies absorbedoras de radiación solar

Abreviaturas

IR	Luz infrarroja
UV	Luz ultravioleta
TSA	Tiempo solar aparente
HL	Hora local
ZH	Zona horaria
SI	Sistema Internacional

Objetivo:

Sentar las bases teóricas para el estudio, desarrollo y diseño de colectores solares para el calentamiento de agua en sistemas de circulación forzada. Siendo el principal interés alcanzar los rendimientos más altos posibles, con base en el conocimiento de las características hidráulicas y térmicas de los elementos que conforman a los sistemas de captación solar.

Alcance:

El alcance del presente trabajo se concretará en dar a conocer de forma global y práctica el estudio y fundamentos de la energía solar térmica, su naturaleza, tipos, estimación, así como los medios y tecnologías existentes para su captación y aprovechamiento.

1.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES



1.1 RADIACIÓN Y TIPOS DE DE RADIACION

Radiación.- En física, radiación es un término que designa la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío. La parte de la radiación emitida en forma de ondas electromagnéticas se le designa como radiación electromagnética.

Radiación térmica.- La radiación térmica es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas. La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de otras formas de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y televisión, que no están relacionadas con la temperatura, pues todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto (0 Kelvin) emiten radiación térmica.

Radiación Solar.- La radiación electromagnética emitida por el sol se conoce como radiación solar, y al ser un cuerpo a una temperatura superior al cero absoluto, obviamente emite radiación térmica. Casi la mitad de la radiación solar es luz (es decir cae dentro del rango visible), siendo la restante ultravioleta e infrarroja.

El ojo humano está adaptado al tipo de luz que emite el Sol, la cual depende de su temperatura superficial. La luz que emite el sol, aparentemente blanca, no es tal, sino que constituye un conjunto de luces de diversos colores: los colores del espectro o del arco iris.

La luz se caracteriza, como ya lo hemos visto, por ser una radiación electromagnética que se propaga en el vacío a una velocidad de 299,792.458 m/s (aproximadamente 3×10^8 m/s). Todas las radiaciones electromagnéticas se propagan a la misma velocidad, pero se pueden distinguir por su **longitud de onda λ** (figura 1.1), valor que se expresa en nanómetros ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9}$). Los tres tipos de radiación proveniente del sol se encuentran en la banda de longitudes de onda de 300nm a 3000nm.

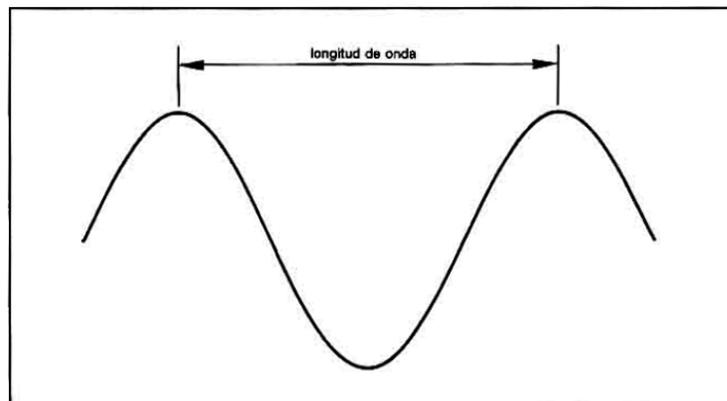


FIGURA 1-1 Longitud de onda

De entre las visibles, la luz roja es la que tiene mayor longitud de onda, y la violeta la que tiene la menor. En aquellas longitudes de onda mayores a las que

el ojo humano puede percibir están el infrarrojo, cuyo efecto en nosotros es la sensación de calor al estar expuestos al sol. La región del ultravioleta se alcanza con longitudes de onda menores a la del color violeta, cuyos efectos se dejan sentir en el fenómeno del bronceado de la piel.

La proporción de los distintos tipos de radiación solar es:

- Luz Visible 47%
- Infrarrojo 45%
- Ultravioleta 7%

La zona visible abarca desde los 380nm (violeta) hasta 780nm (rojo). El infrarrojo se extiende hasta longitudes de onda muy elevadas; particularmente puede considerarse que 3000nm es el límite máximo efectivo de radiación infrarroja que recibimos del Sol; por su parte, el ultravioleta se extingue rápidamente a medida que alcanza longitudes de ondas menores, siendo su límite práctico de unos 200nm.

1.2 ESTRUCTURA Y DATOS DEL SOL

El sol es un cuerpo esférico de naturaleza gaseosa que genera su energía debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su zona central.

Las reacciones nucleares que tienen lugar en el sol, consisten en la transformación de **hidrogeno** en **helio**, a través de varios pasos intermedios, entre los que figuran la obtención de deuterio. El resultado global es que cuatro átomos de hidrogeno se convierten en uno de helio. Ahora bien, esta transformación se realiza con una pequeña pérdida de masa. El átomo de helio obtenido tiene una masa algo inferior a la de los cuatro átomos de hidrogeno primitivos. Esta pérdida de masa se ha transformado en energía, que de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$. El sol pierde cada segundo 4.2 millones de toneladas de materia que se transforman en energía. De acuerdo con la fórmula de Einstein, ello representa una energía de:

$$E = mc^2 = 4.2 \times 10^9 \text{ Kg/s} \times 3 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{s} = 3.78 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

Esta energía se irradia por el espacio con simetría esférica en todas direcciones. La tierra orbita al sol a una distancia de 149 millones de Kms. Calculando ahora la potencia que recibe una superficie de 1m^2 en la tierra si se halla perpendicular al sol, solo hace falta dividir la potencia producida por el sol, por los metros cuadrados de superficie de una esfera hipotética que envolviera al sol y tuviera como radio la distancia que lo separa de la tierra al sol.

$$\frac{\text{Potencia producida por el Sol}}{\text{Superficie esferica}} = \frac{3.78 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi (149 \times 10^9 \text{ m})^2} = 1353 \text{ W/m}^2$$

Es decir, una superficie de 1m^2 situada a la distancia de la órbita terrestre recibe una potencia de 1353 W . Ahora bien puesto que la energía producida por el Sol es constante, y la tierra se mueve en una órbita casi circular, este valor permanece prácticamente constante a lo largo del año, y por ello se le ha convenido en llamarle **constante solar I_{SC}** . En la tierra, la constante solar será, pues, la potencia de la radiación solar, situada perpendicularmente a dicha radiación y **fuera de la atmósfera**.

El valor de la **constante solar I_{SC}** es la máxima potencia energética que nos puede llegar del Sol por unidad de superficie.

1.3 EFECTO DE LA DISTANCIA TIERRA-SOL

La tierra, en su órbita, pasa a lo largo del año unas veces más cerca y otras más alejada del Sol. De hecho, la órbita de la tierra es casi circular y la variación de la constante solar es mínima. Aproximadamente el 3 de enero la tierra se encuentra en el perihelio, distancia mínima al sol, y el 6 de julio en el afelio, punto de máxima distancia. Esto hace que la constante solar tenga algunas variaciones a lo largo del año.

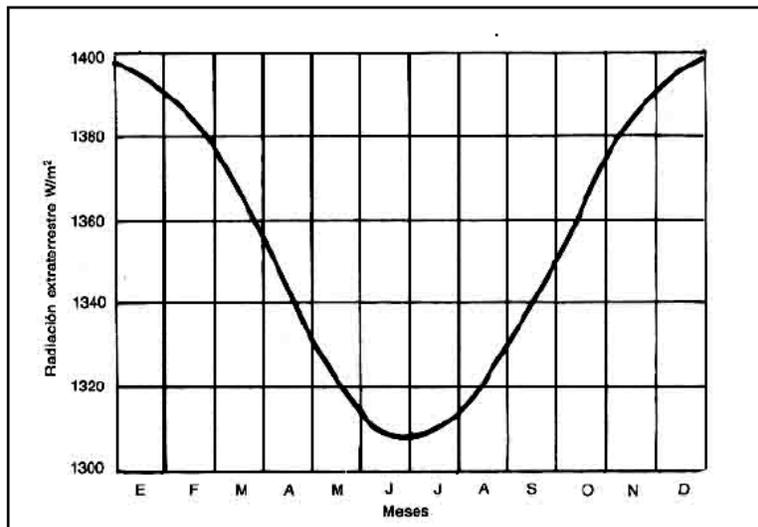


FIGURA 1-2 Variación anual de irradiación solar extraterrestre aparente I_0

No obstante es posible conocer estas variaciones de la constante solar I_{SC} , llamándole ahora *irradiación solar extraterrestre aparente I_0* (figura 1.2), y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$I_0 = I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{370} \right) \right] \quad (1-1)$$

Donde n es el día del año a considerar (del 1 al 365), o bien tomando un valor promedio mensual para dicha variable de la tabla 1-3.

Con lo anterior queda por sentado que el valor de la constante solar de 1353 W/m^2 es invariable, siendo la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 la que presentara ligeras variaciones, siendo ésta la que se ocupara en los cálculos con la finalidad de dar más precisión a los mismos.

Como se mencionó la energía proveniente del sol varia a lo largo del año como también lo hace estacionalmente la distancia de la tierra al sol, siendo I_0 alrededor del 3.5% mayor que I_{SC} en Enero y 3.5% menor en Junio. La tabla 1-1 muestra valores mensuales promedio para I_0 .

TABLA 1-1 Variación mensual de la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 respecto a I_{SC}

Dates	Jan 1	Jan 4 ^a	Feb 1	Mar 1	Apr 4 ^b	May 1	June 1
I_0 , Btu/hr ft ²	443.79	444.11	442.20	437.13	429.20	422.86	417.54
I_0 , W/m ²	1399	1400	1394	1378	1353	1333	1316
Distance, A.U.	0.9834	0.9831	0.9852	0.9909	1.0000	1.0075	1.0138
Dates	July 1	July 5 ^c	Aug 1	Sept 1	Oct 5 ^b	Nov 1	Dec 1
I_0 , Btu/hr ft ²	415.24	415.24	416.51	421.27	429.10	435.54	441.54
I_0 , W/m ²	1309	1309	1313	1328	1353	1373	1392
Distance, A.U.	1.0167	1.0167	1.0151	1.0094	1.0000	0.9927	0.9859

^a Perihelio, la distancia tierra-sol es la mínima

^b Distancia Tierra-sol es 1.000 Unidad Astronómica (A.U.) cuando: $I_0 = I_{SC}$

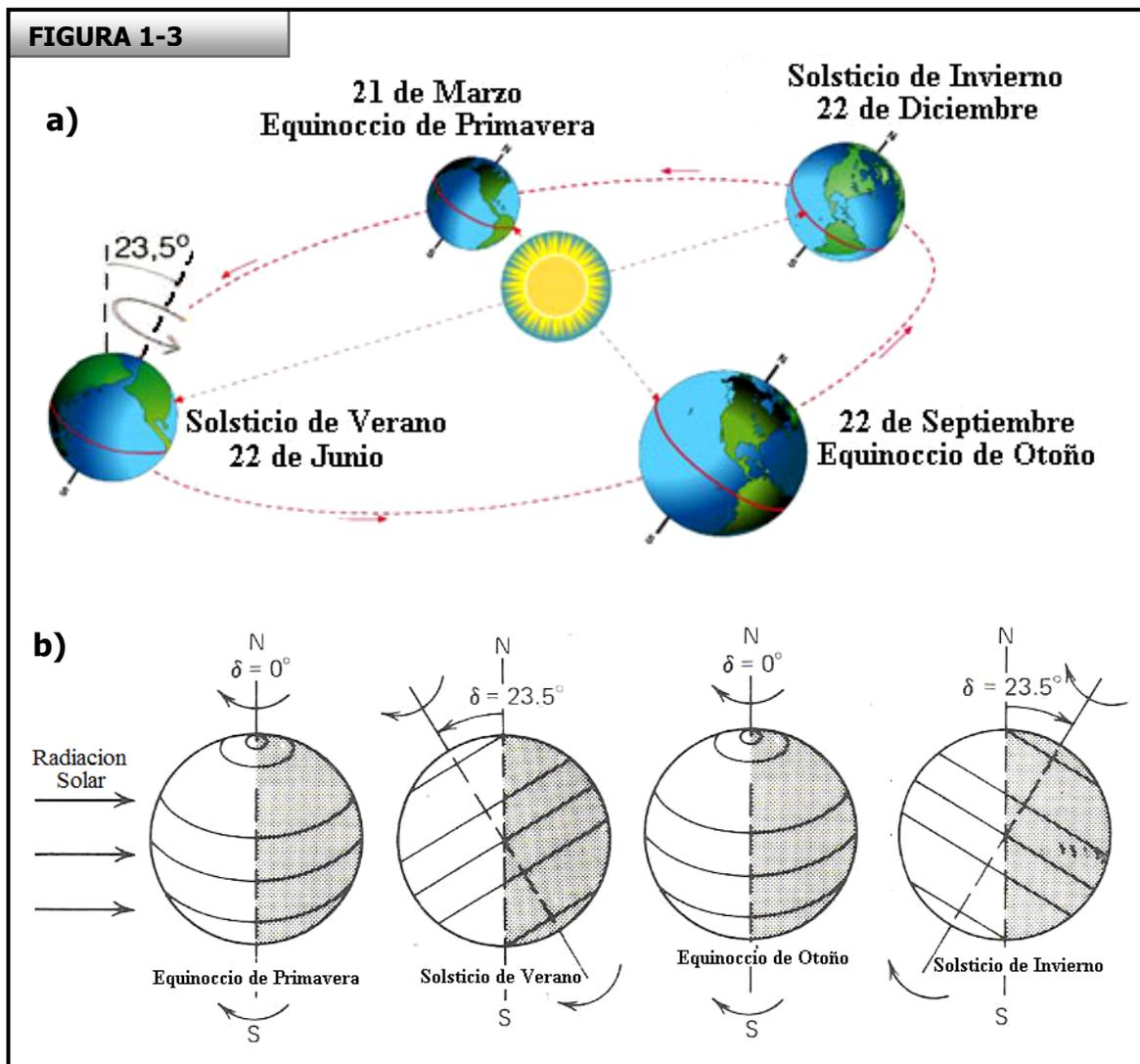
^c Afelio, la distancia tierra-sol es la máxima

1.4 EFECTO DEL ÁNGULO DE DECLINACIÓN

La mayor variación ocurrida en la cantidad de radiación aparente extraterrestre es causada por el cambio estacional del trayecto del sol a través del cielo, es decir la altitud del sol, los ángulos acimutales relativos al colector solar, y el tiempo que tarda el sol en cruzar el horizonte según la estación del año. Todo esto tiene un importante efecto en el total de radiación captada por el colector solar.

El cambio estacional y por ende el trayecto del sol a través del cielo es debido a la variación de la inclinación del eje de rotación de la tierra de 23.45° con respecto al plano de la órbita terrestre. Por esta razón regiones, en especial las más cercanas a los polos, reciben más luz en verano y menos luz en invierno. La inclinación δ varia de $+23.45$ a -23.45° (figura 1-3b) en el curso de un año siendo ésta para el hemisferio norte de 23.45 en verano, 0 en otoño, -23.45 en invierno y 0° en primavera, correspondiendo así el solsticio de verano, equinoccio de otoño, solsticio de invierno y el equinoccio de primavera respectivamente.

De la figura 1-3b se concluye que durante un equinoccio tanto de otoño como de primavera los días y las noches tienen la misma duración; así pues durante un solsticio de verano el día es más largo que la noche e inversamente durante el solsticio de invierno, la noche es más larga que el día. Lo anterior solo es válido para el hemisferio norte, puesto que en el hemisferio sur ocurre lo contrario. Cabe mencionar que el ángulo que cambia no es propiamente el de la inclinación del eje de rotación de la tierra, al contrario éste es siempre constante en valor y dirección, por lo tanto lo que en realidad se modifica es el ángulo formado por el eje terrestre de rotación y el área límite de iluminación solar (figura 1-3a) esto debido a la inclinación del plano de la órbita terrestre, y el movimiento de la tierra al ir orbitando alrededor del sol va cambiando dicho ángulo de inclinación, al cual por unificación de criterios se ha decidido nombrarle ángulo de declinación δ .



La siguiente ecuación es recomendable para el cálculo de la declinación δ :

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1-2)$$

Donde n es el día del año en consideración (del 1 al 365), la tabla 1-2 provee valores nominales del número de día (segunda columna de izquierda a derecha) representativo (21) de cada mes.

TABLA 1-2 Parámetros utilizados para la estimación de la intensidad de radiación solar

Nominal Day	Day Number ^a	Declination Degrees	Parameter			Equation of Time (min) ^b	Solar Noon	
			A Btu/hr ft ²	B W/m ²	C Air Mass ⁻¹			Dimen- sionless
Enero 21	19.85	-20.0	390	1,230	0.142	0.058	-11.2	Late
Febrero 21	54.06	-10.0	385	1,215	0.144	0.060	-13.9	Late
Marzo 21	80.00	0.0	376	1,186	0.156	0.071	-7.5	Late
Abril 21	110.47	+11.6	360	1,136	0.180	0.097	+1.1	Early
Mayo 21	140.15	+20.0	350	1,104	0.196	0.121	+3.3	Early
Junio 21	172.50	+23.45	345	1,088	0.205	0.134	-1.4	Late
Julio 21	201.84	+20.6	344	1,085	0.207	0.136	-6.2	Late
Agosto 21	232.49	+12.3	351	1,107	0.201	0.122	-2.4	Late
Septiembre 21	265.00	0.0	365	1,151	0.177	0.092	+7.5	Early
Octubre 21	292.34	-10.5	378	1,192	0.160	0.073	+15.4	Early
Noviembre 21	324.20	-19.8	387	1,221	0.149	0.063	+13.8	Early
Diciembre 21	357.50	-23.45	391	1,233	0.142	0.057	+1.6	Early

Tabla 1-3. Datos de número de días que proporcionan promedios mensuales para su uso en las ec. 1-1 y 1-2

Date	Day Number
17 Jan	17
15 Feb	46
17 Mar	76
15 Apr	105
15 May	135
11 Jun	162
18 Jul	199
17 Aug	229
15 Sep	258
15 Oct	288
14 Nov	318
12 Dec	346

Con la ecuación 1-2 nunca se obtiene más de un día de diferencia del resultado correcto para el ángulo de declinación del eje terrestre. Por otra parte para obtener resultados mensuales promedio del ángulo de declinación, éste puede ser calculado casi exactamente si se utiliza el número de día de la tabla 1-3 en la ecuación 1-2

1.5 COMPONENTES DE LA RADIACIÓN

Hasta ahora se han definido dos conceptos de interés como lo son la intensidad de la energía solar radiante I_{sc} o constante solar y la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 , en donde I_{sc} es una constante de la cantidad de radiación emitida por el astro solar, y por otro lado I_0 es la fracción de radiación que llega a la tierra momentos antes de penetrar la atmósfera, en donde I_0 varía en función de la distancia Tierra-Sol, la cual por la órbita terrestre (elíptica) presenta variaciones.

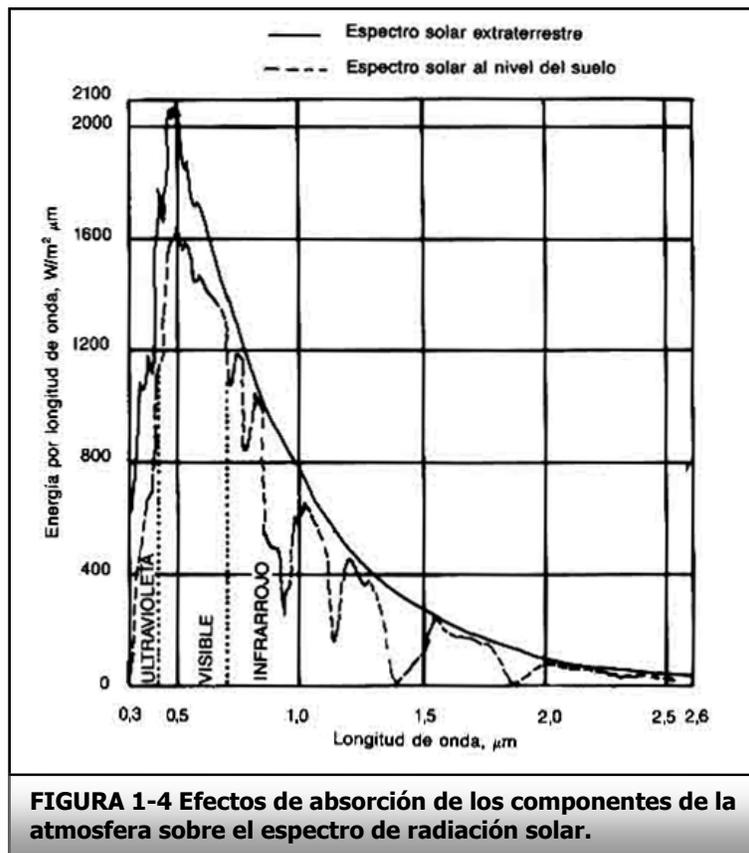
radiación que llega a la tierra momentos antes de penetrar la atmósfera, en donde I_0 varía en función de la distancia Tierra-Sol, la cual por la órbita terrestre (elíptica) presenta variaciones.

La presencia de la atmosfera altera fuertemente el valor de la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 que recibimos en la superficie de la tierra, y que es el valor que nos es realmente útil. La atmosfera actúa de la siguiente forma con respecto a la radiación solar:

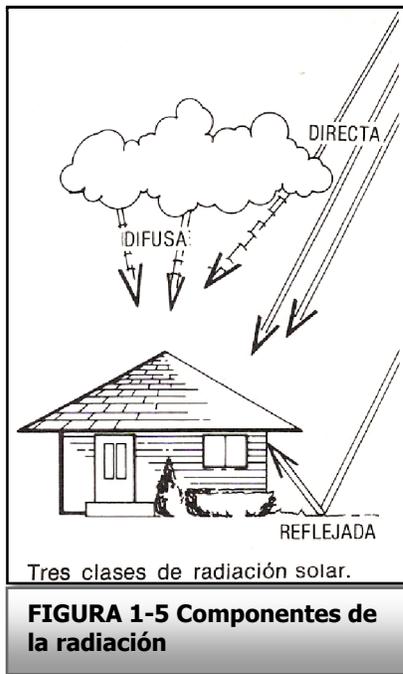
- Absorbiendo ciertas longitudes de onda de forma selectiva
- Dispersándola (cambio de dirección)
- Absorbiendo la radiación de forma general (nubes y polvo)

Estos factores hacen que a nivel del suelo el valor I_0 sea menor que el valor extraterrestre. Recordando que el espesor de la atmosfera es de aproximadamente 150km, lo cual es despreciable en comparación de la distancia al Sol.

Así, en la capa de ozono, la cual existe en la estratosfera a unos 25Km de altura, se absorbe casi la totalidad de la radiación ultravioleta. Por lo tanto la incidencia de la radiación ultravioleta no se considerará, excepto en los casos de envejecimiento de los materiales (gomas, plásticos, superficies selectivas, etc.). La presencia de **vapor de agua** y de **bióxido de carbono** absorbe las longitudes de onda situadas preferentemente en el infrarrojo (figura 1-4).



Es sabido que al atravesar la atmósfera, la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 , además de ser absorbida por los componentes de la atmósfera (vapor de agua, ozono, contaminación, etc.) es dispersada. Por lo que la radiación incidente sobre suelo terrestre se divide en dos componentes, **directa y difusa**. La fracción de la radiación solar extraterrestre aparente que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida se llama **radiación directa**. La **radiación difusa** se compone de rayos dispersos no paralelos provenientes de todas direcciones. Este tipo de radiación hace que el cielo se vea azul en días despejados y gris en días brumosos (figura 1-5).



Existe otro tipo de radiación llamada reflejada, la cual llega a los colectores desde las superficies adyacentes al edificio o desde el suelo. Ésta depende en gran medida de la forma y textura de los alrededores (figura 1-5).

1.6 IRRADIACIÓN EN CIELO DESPEJADO

Como se comentó con anterioridad, al atravesar la atmósfera, la radiación solar sufre una atenuación, siendo ésta proporcional a la distancia que recorre dentro de la atmósfera hasta el punto de incidencia, y a un coeficiente de extinción B . Siendo la siguiente expresión útil para calcular la Irradiación Directa Instantánea

I_D :

$$I_D = A \exp\left(-\frac{P}{P_0} \times \frac{B}{\cos \theta_z}\right) \quad (1-3)$$

En donde A expresa los valores mensuales de la intensidad de radiación solar extraterrestre, los cuales se encuentran tabulados en la tabla 1-2. El coeficiente de extinción B indica la tasa a la que se pierde o se redirecciona la energía solar debido a las interacciones con los gases y las partículas suspendidas en la atmósfera, la magnitud de estos efectos de degradación de la visibilidad depende de varios factores tales como el tamaño y composición de las partículas, y la longitud de onda de la luz incidente, a continuación se presenta la tabla 1-4 con los valores para la atmósfera circundante en el valle de México.

TABLA 1-4 Estadísticas descriptivas de contaminantes en el aire, visibilidad, y meteorología. Ciudad de México, área metropolitana, Enero 1 1994- Diciembre 30, 1998

	Units	Days with observations	Mean	Minimum
Visibility	B _{vis}	1765	0.63	0.16
NO ₂ ^{b,d}	ppb	1825	35.6	9.3
O ₃ ^{b,e}	ppb	1825	38.8	9.26
Windspeed	m/s	1755	1.81	0
Temperature ^f				
Mean	°C	1825	16.5	8.4
Minimum	°C	1825	10.84	1.08
Maximum	°C	1825	23.5	10.77
Relative humidity ^f				
Mean	%	1825	52.62	12.65
Minimum	%	1825	30.31	4.25
Maximum	%	1825	71.77	22.18

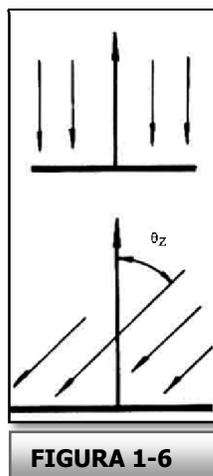
Values are 24-h means except windspeed and visibility (noontime readings).
^aSierra-Anderson PM₁₀ High-Volume Air Sampler System.
^bAverage over five monitors (Cerro de la Estrella, Merced, Pedregal, Tlalnepantla, and Xalostoc).
^cNO₂ measure with chemiluminescence (thermo-electron).
^dO₃ measured with ultraviolet photometry.
^eAverage of readings reported each day by Mexico City automatic monitoring network stations.

Por último para la ec. 1-3 se tiene que θ_z es el ángulo del cenit (o el complemento de la altitud, figura 1-7) y P/P_0 es la razón de la presión atmosférica de la localidad y una presión atmosférica estándar, y está dada por:

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-0.0001184 \times \text{altitud en metros sobre el nivel del mar}) \quad (1-4)$$

1.7 IRRADIACIÓN EN SUPERFICIES PLANAS

La radiación que alcanza una superficie plana depende del ángulo de incidencia de la radiación con respecto a la superficie. Se ha definido la irradiación solar extraterrestre aparente I_0 como la potencia recibida por una superficie de 1m^2 **perpendicular** a la radiación solar. Si la radiación no es perpendicular a la superficie, entonces el valor real de la potencia que incide sobre ésta ha de multiplicarse por el coseno del ángulo que forman los rayos incidentes y la perpendicular a la superficie (figura 1.6).



Dado que la función coseno varía poco para pequeños ángulos, incluso una desviación de 15 grados es prácticamente inapreciable, pues origina una reducción de la potencia incidente del 3.5%.

La irradiación sobre una superficie horizontal puede ser calculada por simples relaciones trigonométricas, la técnica consiste en calcular la intensidad de radiación normal incidente, después la altitud del sol sobre el horizonte y la distancia acimutal de éste con respecto al medio día.

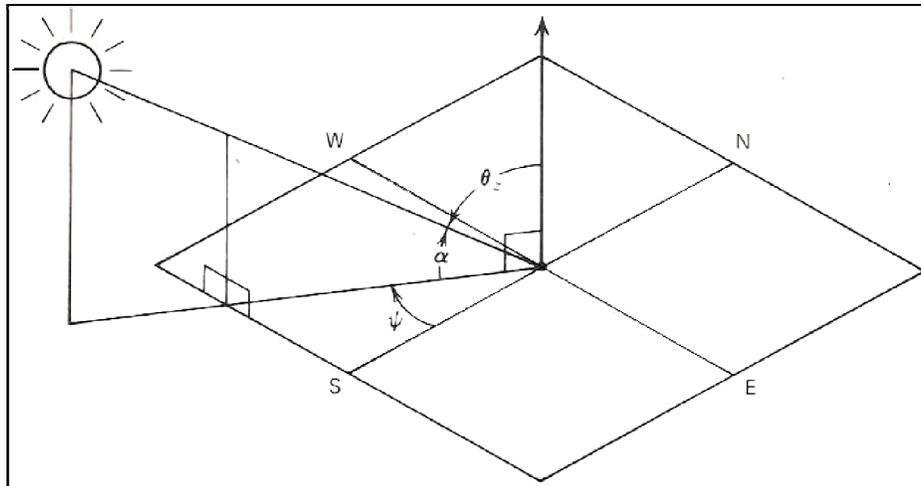


FIGURA 1-7 Ángulos del zenit solar θ_z , altitud solar α y acimutal solar Ψ en relación a una superficie horizontal

De la figura 1-7, el ángulo del cenit θ_z y su complemento, la altitud α , están dados por:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \delta \quad (1-5)$$

Donde ϕ es la latitud del lugar (positiva en ambos hemisferios), δ la inclinación terrestre y causada por la rotación de la tierra ω es el ángulo horario, es decir la distancia angular que separa a la localidad del medio día solar¹ (figura 1.8a). Así pues si el día tiene 24 horas (mismo número de usos horarios alrededor del mundo), 1 hora equivale a un ángulo de 15° ($360/24$), un minuto de tiempo equivale a 0.25° ($15/60$). Así, si faltan 2 horas y 35 minutos para el medio día solar aparente¹, el ángulo horario ω será de $2\text{hr} \times 15^\circ + 35\text{min} \times 0.25^\circ = 38.75^\circ$. Lo anterior se puede realizar directamente haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\omega = \text{hrs al } \acute{o} \text{ del medio día} \times \frac{360}{24} \quad (1-6)$$

En donde ω es negativa antes del medio día, y positiva después del medio día.

El acimut solar ψ medido en grados a partir de la coordenada sur, es el ángulo que forman la línea cardinal del sur y la proyección del astro sobre la superficie, midiéndose en sentido horario a partir del sur (figura 1-7) y esta dado por:

$$\text{sen} \psi = \frac{\cos \delta \text{sen} \omega}{\cos \alpha} \quad (1-7)$$

¹ Consultar el tema *tiempo solar* de la página 14.

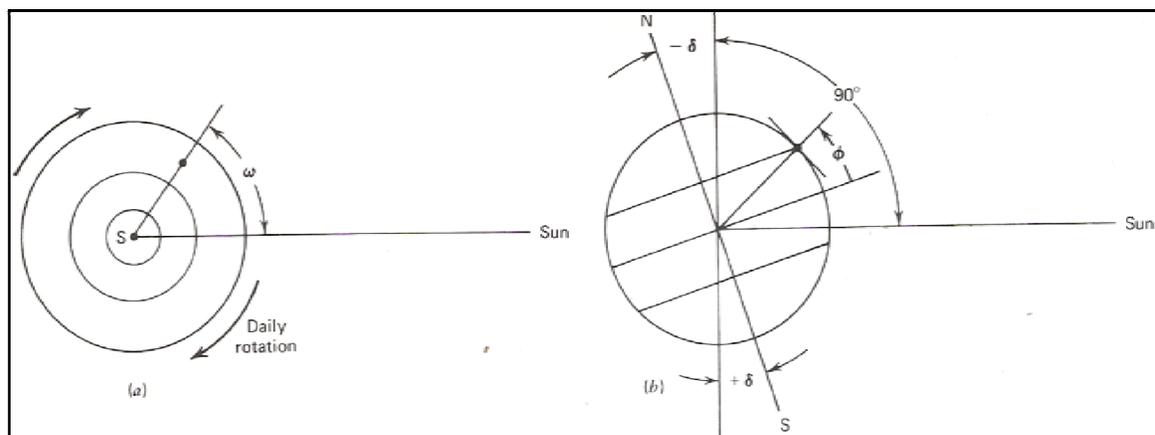


FIGURA 1-8 (a) Vista desde el polo sur mostrando el ángulo horario ω (b) Vista mostrando las relaciones entre los ángulos de la latitud Φ y el de declinación δ

El ángulo horario para la salida y ocaso del Sol, es decir la duración del día en grados, puede ser calculado con la ec. 1-5 cuando $\alpha = 0$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1-8)$$

Si se desea conocer la duración del día en horas, solo es necesario multiplicar el resultado de la ec. 1-8 por 24/360.

1.8 TIEMPO SOLAR

El *tiempo solar estándar*, es decir el de nuestros relojes, está basado en un sol ficticio que viaja a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir la duración del día en 24 horas u 86.400 segundos.

Sin embargo el Sol no tiene un movimiento regular a lo largo del año, esto se debe a que la órbita terrestre es una elipse, con lo cual la Tierra en su movimiento de traslación se mueve más veloz cuando se acerca al Sol y más despacio cuando se aleja de él, por lo que el *tiempo solar* se define como la medida del tiempo fundamentada en el movimiento real del sol sobre el horizonte. Por lo que no necesariamente la hora local de un lugar coincide con el recorrido verdadero del sol sobre el horizonte, o en otras palabras nuestro reloj podría estar marcando el mediodía mientras en su recorrido real, el sol, no estuviese aun en su punto más alto.

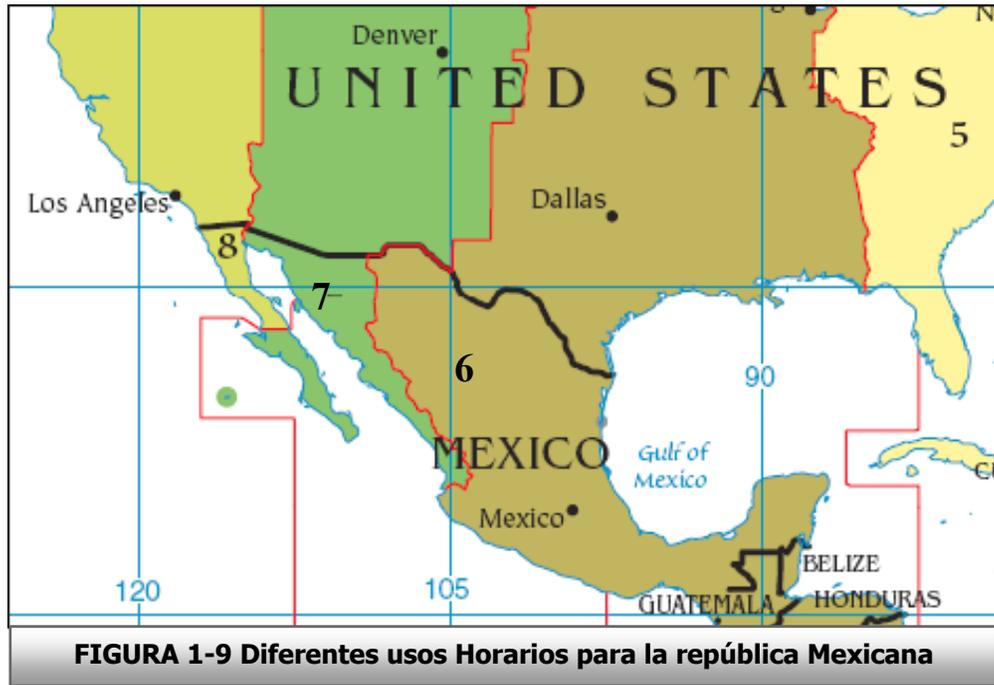
Para calcular el tiempo solar se utiliza la siguiente ecuación:

$$TS = HL / 60 + ZH - LONG / 15 + EQT / 60 \quad (1-9)$$

en donde TSA es el Tiempo Solar, HL es la Hora Local, ZH es la Zona Horaria (Figura. 1-9) del país o lugar en consideración, LONG es la longitud en grados

tomada como positiva para localidades hacia el Oeste y como negativa para localidades al Este.

La diferencia entre el tiempo solar y el tiempo solar estándar, que en ocasiones llega a ser de 15 minutos, es llamada Ecuación de tiempo, EQT, y se define dependiendo del mes en consideración y cuyo valor se encuentra tabulado en la penúltima columna (de izquierda a derecha) de la tabla 1-2.



Ejemplo 1-1

Calcule el tiempo solar en la ciudad de México para un 21 de Noviembre a las 9.50 A.M.

Lugar: México D.F.
 Latitud = 19.43° Norte
 Longitud = 99.08° Oeste

De la ecuación 1-8 con el resultado en horas:

$$TSA = 9 \frac{50}{60} + 6 - \frac{99.08}{15} + \frac{13.8}{60} = 9.45hrs$$

O expresando el resultado en horas y minutos, $9 + 0.45 \times 60 = 9:27$ A.M.

Comentario final del ejemplo: En caso de encontrarnos en horario de verano, debemos restar una 1 hora al resultado.

Ejemplo 1-2

Para un día claro del 21 de noviembre a las 10 a.m. (tiempo solar) a 40°N de latitud (día 325), encontrar:

a) La irradiación directa a 1524 m sobre el nivel del mar

Empezamos por calcular la altitud del sol 2 horas antes del medio día:

$$\omega = -2 \times \frac{360}{24} = -30^\circ$$

$$\phi = 40^\circ$$

Calculando la Inclinación solar por la ec. 1-2,

$$\delta = 23.45 \sin \left[\left(\frac{325 - 80}{370} \right) \times 360^\circ \right] = -20.0^\circ$$

Calculando la altitud solar usando la ec. 1-5,

$$\text{sen} \alpha = \cos 40^\circ \cos(-20^\circ) \cos(-30^\circ) + \sin 40^\circ \sin(-20^\circ) = 0.4036$$

$$\text{altitud } \alpha = \arcsen(0.4036) = 23.8^\circ$$

De las ec. 1-3 y 1-4, con los valores de A y B de la tabla 1-2 para el 21 de noviembre y a 1524 m de altura, tenemos:

$$I_D = 1221 \exp \left(- \frac{0.149}{\cos(90 - 23.8)^\circ} \times \exp(-0.0001184 \times 1524) \right)$$
$$I_D = 897 \text{ W/m}^2$$

y al nivel del mar:

$$I_D = 1221 \exp \left(- \frac{0.149}{\cos(90 - 23.8)^\circ} \right)$$
$$I_D = 844 \text{ W/m}^2$$

1.9 PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS

El uso práctico de los datos disponibles de radiación extraterrestre sobre superficies horizontales requiere la estimación de la radiación correspondiente sobre superficies inclinadas, lo cual no es un proceso simple pues el cálculo de la radiación directa y difusa involucra diferentes procedimientos, y generalmente los únicos datos disponibles son los de la radiación global.

El procedimiento consiste en el cálculo del potencial de radiación extraterrestre disponible a diario sobre el sitio en cuestión, obteniéndose un promedio mensual, para luego con la aplicación de una correlación empírica conocer la componente difusa de la radiación y la reflejada si es el caso.

TABLA 1-5 Promedio diario-mensual de irradiación extraterrestre sobre superficies horizontales a diferentes latitudes. [MJ/m²]

Latitude Degrees North	Month											
	Jan Day No. 17.	Feb 46.	Mar 76.	Apr 105.	May 135.	Jun 162.	Jul 199.	Aug 229.	Sept 258.	Oct 288.	Nov 318.	Dec 346.
15	29.41	32.51	35.83	37.74	38.19	38.02	37.90	37.62	36.24	33.39	30.10	28.22
16	28.91	32.12	35.63	37.74	38.36	38.26	38.11	37.68	36.12	33.06	29.63	27.69
17	28.40	31.73	35.42	37.73	38.52	38.50	38.31	37.74	35.99	32.73	29.16	27.15
18	27.89	31.32	35.19	37.71	38.67	38.73	38.51	37.79	35.84	32.39	28.68	26.61
19	27.37	30.91	34.96	37.67	38.81	38.95	38.69	37.82	35.68	32.04	28.19	26.06
20	26.84	30.48	34.71	37.63	38.94	39.16	38.86	37.85	35.52	31.68	27.70	25.51
21	26.31	30.05	34.46	37.57	39.06	39.36	39.02	37.86	35.34	31.31	27.19	24.95
22	25.77	29.61	34.19	37.50	39.16	39.55	39.17	37.87	35.15	30.93	26.69	24.39
23	25.23	29.17	33.91	37.43	39.26	39.73	39.31	37.86	34.95	30.55	26.17	23.82
24	24.68	28.71	33.63	37.34	39.35	39.90	39.44	37.84	34.74	30.15	25.65	23.24
25	24.12	28.25	33.33	37.24	39.42	40.06	39.56	37.81	34.52	29.75	25.12	22.67
26	23.56	27.77	33.02	37.12	39.49	40.21	39.67	37.78	34.29	29.33	24.59	22.08
27	22.99	27.29	32.70	37.00	39.55	40.36	39.77	37.73	34.04	28.91	24.05	21.50
28	22.42	26.81	32.38	36.87	39.59	40.49	39.86	37.66	33.79	28.48	23.50	20.91
29	21.85	26.31	32.04	36.72	39.63	40.61	39.94	37.59	33.53	28.04	22.95	20.31
30	21.27	25.81	31.69	36.57	39.65	40.72	40.02	37.51	33.26	27.59	22.40	19.72
31	20.68	25.30	31.34	36.40	39.67	40.83	40.08	37.42	32.98	27.14	21.84	19.12
32	20.10	24.79	30.97	36.23	39.67	40.92	40.13	37.32	32.68	26.67	21.27	18.52
33	19.50	24.27	30.59	36.04	39.67	41.00	40.17	37.20	32.38	26.20	20.70	17.91
34	18.91	23.74	30.21	35.85	39.65	41.08	40.20	37.08	32.07	25.72	20.13	17.30
35	18.31	23.20	29.81	35.64	39.63	41.15	40.23	36.95	31.75	25.24	19.55	16.70
36	17.71	22.66	29.41	35.42	39.59	41.20	40.24	36.81	31.41	24.75	18.97	16.09
37	17.11	22.12	29.00	35.19	39.55	41.25	40.24	36.65	31.07	24.25	18.38	15.48
38	16.51	21.57	28.58	34.96	39.49	41.29	40.24	36.49	30.72	23.74	17.79	14.86
39	15.90	21.02	28.15	34.71	39.43	41.32	40.23	36.32	30.36	23.23	17.20	14.25
40	15.29	20.45	27.71	34.45	39.36	41.35	40.20	36.13	29.99	22.71	16.61	13.64

En el ejemplo 1-2 se calculó el total de la radiación incidente sobre una superficie horizontal, es decir el suelo terrestre, a un ángulo α correspondiente a la altitud del sol sobre el horizonte, sin embargo la magnitud de radiación solar de interés es la componente vertical a la superficie de incidencia conocida como *radiación directa normal a una superficie horizontal* H_{DN} , o la superficie del colector I_{ND} , dado que estas componentes serán la cantidad de radiación efectiva máxima que podrá recolectarse de una superficie horizontal o inclinada (figura 2-0). De aquí se explica el por qué de la inclinación que se les da a la mayoría de los colectores o paneles solares, en donde se busca que los rayos del sol incidan de manera

perpendicular a la superficie del colector o que la componente vertical (normal a la superficie en un colector) sea lo mayor posible.

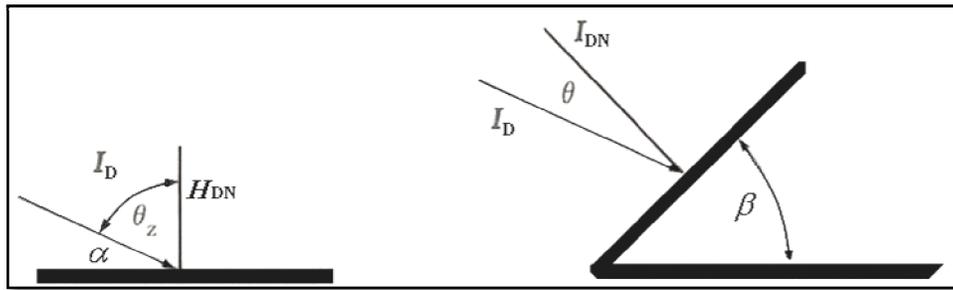


FIGURA 2-0 Radiación directa sobre un plano horizontal e inclinado

Por lo tanto para una superficie horizontal la componente normal de la radiación directa es:

$$H_{DN} = I_D \text{sen} \alpha = I_D \cos \theta_z \quad (2-0)$$

y para una superficie inclinada

$$I_{DN} = I_D \cos \theta \quad (2-1)$$

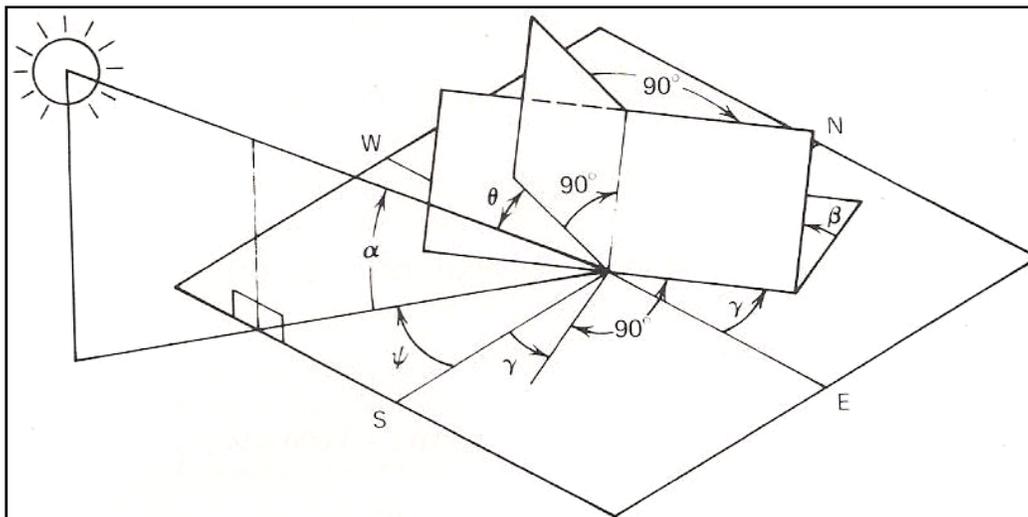


FIGURA 2-1 Ángulos usados para calcular I_{DN} . Siendo α la altitud solar, ψ el ángulo acimutal solar, la inclinación del colector es β y su respectivo ángulo acimutal γ , y finalmente θ , ángulo de incidencia de la luz solar con respecto a la normal a la superficie del colector.

Donde de la figura 2-1 $\cos \theta$ para una superficie inclinada es calculado con:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen} \delta \text{sen} \phi \cos \beta - \text{sen} \delta \cos \phi \text{sen} \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{sen} \phi \text{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \text{sen} \beta \text{sen} \gamma \text{sen} \omega \end{aligned} \quad (2-2a)$$

O en otros términos:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \text{sen} \theta_z \text{sen} \beta \cos(\psi - \gamma) \quad (2-2b)$$

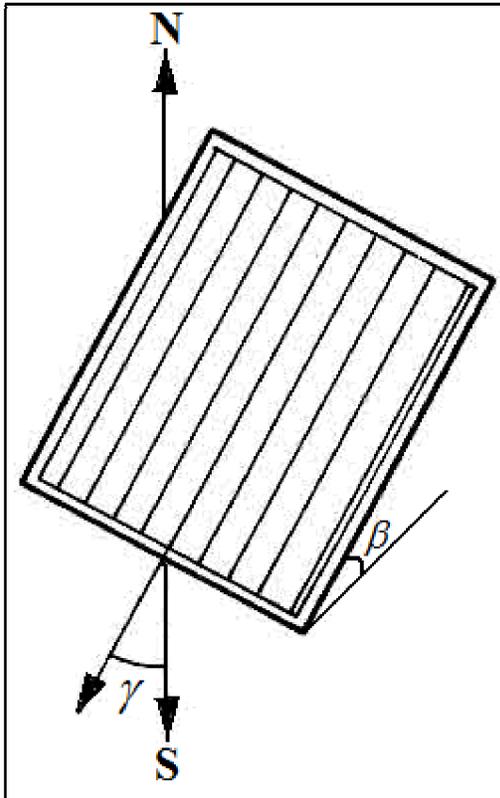


FIGURA 2-2 Angulo de orientación o acimutal γ

El ángulo horario del posible amanecer u ocaso exclusivo del colector (superficie inclinada) está dado por:

$$\omega'_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \quad (2-3)$$

1-10 ORIENTACIÓN DEL COLECTOR SOLAR

La orientación de un colector solar lo define el ángulo γ , formado por el plano perpendicular al colector y la dirección de la meridiana (Norte-Sur) tal como se muestra en la figura 2-2.

Este ángulo γ es el mismo descrito en la figura 2-1, el cual se conoce como acimutal, y su origen se toma en el sur si el colector se encuentra localizado en el hemisferio norte, o al norte si el colector se encontrase en el hemisferio sur.

Para nuestro caso, en el hemisferio norte se procura que el ángulo de orientación o acimutal γ sea pequeño o de ser posible nulo, de manera que la superficie del colector apunte totalmente al sur, siendo éste el sur geográfico, puesto que de usarse una brújula habrá que tomarse en cuenta el valor de la declinación magnética, que es el ángulo formado entre el norte verdadero (geográfico) y el norte magnético.

Por convenio se ha de considerar el ángulo de orientación negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste.

2.- RADIACIÓN EXTRATERRESTRE SOBRE SUPERFICIES HIZONTALES E INCLINADAS



2.1 SUPERFICIES HORIZONTALES

Para una superficie horizontal localizada fuera de la atmósfera (de ahí el nombrarla radiación extraterrestre) con un ángulo θ igual a θ_z , sustituyendo la ec. 1.5 en la ec. 2.0 la irradiación extraterrestre global total H_0 está dada por:

$$H_0 = I_0 [\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \delta] \quad (2-4)$$

Al tratarse de radiación medida fuera de la atmósfera I_0 es equivalente I_D , con la diferencia que I_0 de la ec. 1-1 es la irradiación solar extraterrestre.

La irradiación diaria extraterrestre total² sobre una superficie horizontal H_{0T} , se obtiene mediante la integración de la ec. 2-4 sobre todo el transcurso del día solar, dando:

$$H_{0T} = \frac{I_{0(\text{sumatoria diaria})}}{\pi} \left[\cos \phi \cos \delta \text{sen} \omega_s + \left(\frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \text{sen} \phi \text{sen} \delta \right] \quad (2-5)$$

Donde $I_{0(\text{sumatoria diaria})}$ es la radiación directa total extraterrestre. Si I_0 esta expresado como un flujo de radiación (W/m^2), entonces para un periodo de 24 horas tenemos:

$$I_{0(\text{sumatoria diaria})} = 24I_0 \quad (2-6)$$

Por lo cual el resultado de la ec. 2-6a esta expresado en $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, sin embargo se tiene que un watt es un joule por segundo, las dimensiones $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ son realmente $(\text{J}/\text{s}) \times \text{hr}/\text{m}^2$, lo cual no es consistente con el sistema internacional de unidades SI. Por lo tanto, si H_{0T} debe ser expresado en unidades del SI, entonces las horas deben ser convertidas a segundos por medio de:

$$I_{0(\text{sumatoria diaria})} = \frac{24\text{hr}}{\text{día}} \times \frac{60\text{min}}{\text{hr}} \times \frac{60\text{sec}}{\text{min}} \times \frac{\text{MJ}}{1000000\text{J}} \times I_0$$

$$I_{0(\text{sumatoria diaria})} = 24 \times 0.0036I_0 \quad (2-7)$$

Donde en la ec. 2-6b $I_{0(\text{sumatoria diaria})}$ es ahora expresado en MJ/m^2

² Al ser extraterrestre la radiación incidente es 100% de tipo directa, puesto que las componentes difusa y reflejada de la radiación aparecen después de haberse cruzado la atmósfera.

Otra manera de expresar de forma práctica y más representativa la irradiación captada sobre cualquier superficie lo es mediante el promedio *diario mensual*.³

El total de irradiación promedio diario mensual extraterrestre disponible sobre una superficie horizontal \bar{H}_{OT} o inclinada \bar{I}_{OT} puede ser calculado usando el dato del día representativo del mes de la tabla 1-3, esto con el fin de conocer los promedios mensuales del ángulo de inclinación solar δ y la irradiación solar extraterrestre I_0 .

Ejemplo 1-3

Para una latitud de 40°N durante el mes de noviembre.

Encontrar el promedio diario mensual de irradiación extraterrestre en una superficie horizontal

Para el promedio diario mensual se usa el número de día al que hace referencia la tabla 1-3, siendo éste el 318 para el mes de noviembre, y resolviendo con la ec. 1-1 tenemos:

$$I_0 = 1353 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \times 318}{370} \right) \right] = 1381 \text{ W/m}^2$$

De la ec. 2-6b:

$$I_{0(\text{sumatoria diaria})} = 1381 \times 24 \times 0.0036 = 119.3 \text{ MJ/m}^2$$

De la ec. 1-2:

$$\delta_{\text{grados}} = 23.45^\circ \text{sen} \left[\left(\frac{318 - 80}{370} \right) \times 360 \right] = -18.37^\circ$$

De la ec. 1-8:

$$\begin{aligned} \cos \omega_s &= -\tan(40^\circ) \tan(-18.37^\circ) = 0.2786 \\ \omega_s &= 73.82^\circ ; \phi = 40^\circ \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ec. 2-5

$$\begin{aligned} \bar{H}_{OT} &= \frac{119.3 \text{ MJ/m}^2}{\pi} [\cos 40^\circ \cos(-18.37^\circ) \text{sen} 73.82^\circ \\ &\quad + \left(\frac{2\pi \times 73.82}{360} \right) \text{sen} 40^\circ \text{sen}(-18.37^\circ)] = 16.61 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

Analizando el ejemplo 1-3 vemos que el promedio diario mensual de irradiación extraterrestre en una superficie horizontal, es el mismo que se puede encontrar para la latitud y mes en cuestión en la tabla 1-5, por lo que se concluye el valor de \bar{H}_{OT} se puede calcular u obtenerlo de tablas. (tablas)

³Diaria-mensual se refiere a las mediciones de radiación hechas a diario y después promediadas con la finalidad de obtener un valor mensual de irradiación.

2.2 SUPERFICIES INCLINADAS

Si el total de radiación extraterrestre sobre una superficie inclinada es requerido, la ec. 2-7 se modifica, dando como resultado:

$$I_{0T} = \frac{I_{0(\text{sumatoria diaria})}}{\pi} \left[\cos(\phi - \beta) \cos \delta \text{sen} \tilde{\omega}_s + \left(\frac{2\pi \tilde{\omega}_s}{360} \right) \text{sen}(\phi - \beta) \text{sen} \delta \right] \quad (2-8)$$

Por analogía con la ec. 2-5 I_{0T} es el la irradiación diaria extraterrestre total global sobre una superficie, ahora, inclinada y donde $\tilde{\omega}_s$ es ángulo de la hora del ocaso exclusivamente para dicha superficie, y se obtiene eligiendo el mínimo valor entre el resultado que de ω_s (ec.1-8) y ω'_s (ec. 2-3).

Ejemplo 1-4

Para el ejemplo 1-3 supóngase ahora una inclinación de la superficie de 60° por arriba de la horizontal. Calcule el promedio diario mensual de irradiación extraterrestre sobre dicha superficie.

El ocaso para la superficie inclinada al ángulo horario dado por la ec. 2-3 ocurre a:

$$\begin{aligned} \cos \omega'_s &= -\tan(40^\circ - 60^\circ) \tan(-18.37^\circ) = -0.1209 \\ \omega'_s &= 96.94^\circ \end{aligned}$$

El ocaso en el horizonte ocurre más temprano, a un ángulo horario $\omega_s = 73.82^\circ$ obtenido por la ec. 1-8 en el ejemplo 1-3, por lo tanto el ocaso al colector ocurre a $\omega'_s = 73.82^\circ$, siendo este el valor mínimo obtenido.

Utilizando la ec. 2-8 la irradiación global promedio diaria mensual sobre la superficie inclinada es:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{0T} &= \frac{119.3 \text{ MJ/m}^2}{\pi} \left[\cos(40^\circ - 60^\circ) \cos(-18.37^\circ) \text{sen} 73.82^\circ \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2\pi \times 73.82}{360} \right) \text{sen}(40^\circ - 60^\circ) \text{sen}(-18.37^\circ) \right] = 37.81 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

Comentario final del ejemplo: Como se puede apreciar al comparar el resultado de irradiación extraterrestre promedio diario mensual sobre la superficie inclinada para noviembre (37.81 MJ/m^2) es mayor que en el caso de una superficie horizontal $\beta = 0$ (16.61 MJ/m^2) por lo que se concluye que la inclinación del colector hará que se mejore la capacidad de recolección de la energía solar, y en base a este comportamiento se ha demostrado que el ángulo óptimo de

inclinación del colector es aquel valor de la latitud del sitio donde vaya a ser instalado el o los colectores. Tal como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 1-6 Promedio diario-mensual de irradiación extraterrestre sobre superficies inclinadas, orientadas hacia el sur a diferentes latitudes. [MJ/m²]

Day No.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dic
Lat	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°	40°
Tilt 0°	15.29	20.45	27.71	34.45	39.36	41.35	40.20	36.13	29.99	22.71	16.61	13.64
20°	26.29	30.28	34.71	37.63	38.94	39.16	38.86	37.85	35.52	31.58	27.26	24.80
30°	30.67	33.88	36.68	37.58	37.19	36.63	36.70	37.11	36.70	34.64	31.42	29.33
40°	34.11 ↑	36.46 ↑	37.53 ↑	36.43 ↑	34.45 ↓	33.19 ↓	33.60 ↓	35.31 ↓	36.77 ↑	36.65 ↑	34.63 ↑	32.97 ↑
50°	36.52	37.92	37.24	34.20	30.78	28.92	29.63	32.50	35.72	37.55	36.78	35.61
60°	37.82	38.24	35.82	30.97	26.30	23.97	24.91	28.77	33.60	37.30	37.81	37.17
70°	37.98	37.39	33.31	26.83	21.18	18.51	19.63	24.24	30.45	35.92	37.70	37.60
90°	34.85	32.35	25.36	16.44	9.85	7.13	8.31	13.46	21.52	29.96	34.07	35.06

De la tabla 1-6 para una latitud de 40° y una inclinación del colector del mismo valor, apreciamos que la radiación global promedio diario mensual recolectada es mayor durante casi todo el año, en comparación con otro colector cuya inclinación sea 0°.

El resultado del ejemplo 1-4 se obtuvo considerando que el ángulo de orientación γ era de igual a cero, o en otras palabras la el colector estaba orientado hacia el sur geográfico.

2.3 RADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES TERRESTRES

Todos los ejemplos discutidos hasta el momento, al referirse a la medición de la radiación extraterrestre incidente sobre superficies horizontales o inclinadas, hablan implícitamente del cálculo de radiación de tipo directa, puesto que al no atravesar la atmósfera, los rayos solares no son dispersados y por lo tanto no existen ni componentes difusa ni reflejada.

2.3.1 Radiación difusa

Actualmente se tienen disponibles datos de insolación sobre distintas partes del planeta incluyendo para las principales ciudades de la república mexicana, y debido a que la mayoría de las mediciones locales de irradiación solar son globales o totales, es necesario establecer qué porcentaje de ésta es difusa y reflejada. Obviamente a medida que el clima local sea más nublado mayor será la componente difusa de la radiación incidente. Liu-Jordan así como Page encontraron las proporciones de la componente difusa en datos de radiación horizontalmente colectada como una función del índice de nubosidad τ , siendo esta la razón que establece la proporción de la componente horizontal de la radiación extraterrestre que logra llegar a la superficie terrestre sin ser dispersada, es decir, el cociente de la radiación global mensual medida sobre una superficie horizontal terrestre τ , (usualmente expresada como el promedio total

diario-mensual) y la cantidad disponible de radiación global extraterrestre sobre una superficie horizontal H_{0T} , esto es:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}_T}{H_{0T}} \quad (2-9)$$

Liu-Jordan, así como Page sugieren la siguiente gráfica para evaluar el cociente \bar{H}_{Td} / \bar{H}_T :

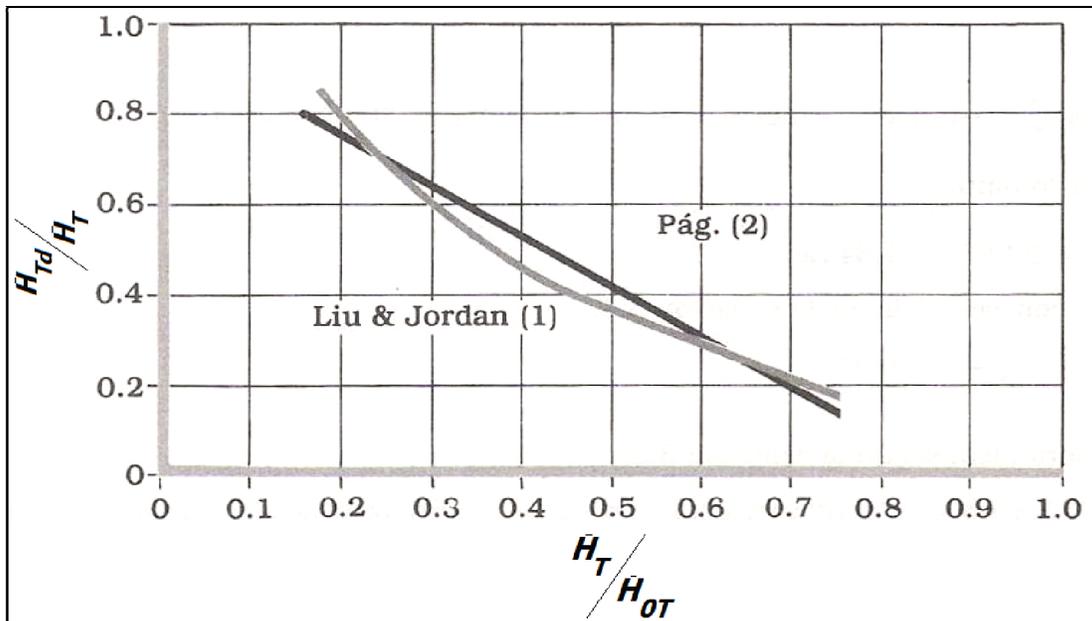


FIGURA 2-3 Comparación gráfica de las ecuaciones de Page y Liu-Jordan para la predicción de la proporción de radiación difusa a partir del índice de nubosidad \bar{K}_T

En la figura 2-3 se despliega de forma gráfica el comportamiento de las ecuaciones de Liu-Jordan, así como de Page, para la evaluación del cociente \bar{H}_{Td} / \bar{H}_T , siendo dichas ecuaciones las siguientes:

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} = 1.00 - 1.13\bar{K}_T \quad (\text{Page}) \quad (3-0)$$

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} = 1.390 - 4.027\bar{K}_T + 5.531\bar{K}_T^2 - 3.108\bar{K}_T^3 \quad (\text{Liu-Jordan}) \quad (3-1)$$

Donde \bar{H}_{Td} es la componente o Irradiación difusa promedio diario-mensual sobre una superficie horizontal.

2.3.3 Mapas de irradiación global solar en la república mexicana

Una primera versión de los mapas de irradiación global diaria promedio mensual y anual, en langleyes (cal/cm^2) por día, apareció en 1975 (Almanza y López, 1975; Almanza y López, 1978). A la fecha, se ha ampliado la estadística de datos meteorológicos así como el número de localidades con observaciones del Servicio Meteorológico Nacional (1940-1990), por lo que ha sido posible presentar una actualización de estos mapas (apéndice 1) al contar con una mejor estadística, que los hace más confiables; además, actualmente se usan las unidades del Sistema Internacional (MJ/m^2).

Aun cuando existen otros tipos de mediciones meteorológicas relacionados con la energía solar, los datos de irradiación medidos directamente, son la mejor fuente de información para elaborar mapas climatológicos de irradiación global, y es común medir ésta en sus componentes directa y difusa, valoradas en unidades de energía por unidad de tiempo, por unidad de área sobre un plano horizontal.

A continuación se muestra en la figura 2-4 uno de estos mapas, en el cual se muestran los datos de irradiación diaria promedio durante el mes de enero para las principales ciudades de la república mexicana.



Ejemplo 1-5

Considérese un colector plano de 0.8m de ancho por 1.2m de largo, con una inclinación de 35° sobre la horizontal y orientado hacia el sur. El colector será instalado en la ciudad de Monterrey que se encuentra a una latitud de 25°N.

(a) Calcule el promedio diario-mensual de radiación difusa incidente durante el mes de enero.

Haciendo uso de la tabla 1-5 se obtiene el valor de la cantidad disponible de radiación global promedio diario-mensual extraterrestre sobre una superficie horizontal \bar{H}_{0T} para el mes de enero a una latitud de 25°N.

$$\bar{H}_{0T} = 24.12 \text{ MJ/m}^2$$

El dato de la cantidad de radiación global promedio diario-mensual medida sobre la entidad de Monterrey durante el mes de enero se obtiene del mapa de la figura 2-4.

$$\bar{H}_T = 11.6 \text{ MJ/m}^2$$

En consecuencia de la ec. 2-9:

$$\bar{K}_T = \frac{11.6 \text{ MJ/m}^2}{24.12 \text{ MJ/m}^2} = 0.48$$

De la figura 2-3 o de las ecuaciones 3-0 y 3-1

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} = 1.00 - 1.13(0.48) = 0.46$$

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} = 1.390 - 4.027(0.48) + 5.531(0.48)^2 - 3.108(0.48)^3 = 0.38$$

Finalmente de la ecuación 3-0 la cantidad de radiación difusa incidente es:

$$\bar{H}_{Td} = \bar{H}_T (0.46) = 11.6 \text{ MJ/m}^2 (0.46) = 5.33 \text{ MJ/m}^2$$

Comentario final del ejemplo: En la gráfica 2-3, obtenemos porcentajes distintos para la composición de radiación difusa, en donde por seguridad utilizaremos el valor más alto, es decir del 46% el cual corresponde a la ecuación de *Page* dado que ésta representa las condiciones de operación más adversas (a mayor nubosidad mayor componente difusa) por lo que cualquier mejoría a partir de ella representará una ganancia de energía radiante y por lo tanto de eficiencia.

2.3.3 Radiación total sobre una superficie terrestre inclinada

Un método ampliamente aceptado es aquel desarrollado por Liu y Jordan, en donde se considera que la radiación solar total incidente sobre un plano inclinado \bar{I}_T está formada por tres partes: la radiación directa del sol, la difusa procedente de la bóveda celeste, y la reflejada por el suelo sobre la superficie inclinada. Es decir:

$$\bar{I}_T = \bar{H}_{Tb} \bar{R}_b + \bar{H}_{Td} \bar{R}_d + (\bar{H}_{Tb} + \bar{H}_{Td}) \bar{R}_p \quad (3-2)$$

Ahora bien de la ecuación anterior, analizando únicamente la sumatoria de la radiación difusa y reflejada (segundo y tercer términos); y partiendo del hecho que la radiación reflejada es de carácter difuso, la suma de ambas dará una componente difusa total siendo:

$$\bar{I}_{Td} = \bar{H}_{Td} \bar{R}_d + (\bar{H}_{Tb} + \bar{H}_{Td}) \bar{R}_p \quad (3-3)$$

Donde \bar{R}_b , \bar{R}_d , \bar{R}_p son, respectivamente los factores de conversión para las componentes de radiación directa, difusa y reflejada sobre la superficie inclinada. Esto es:

$$\begin{aligned} \bar{R}_b &= \frac{\text{Radiación directa diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada}}{\text{Radiación directa diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal}} \\ \bar{R}_d &= \frac{\text{Radiación difusa diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada}}{\text{Radiación difusa diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal}} \\ \bar{R}_p &= \frac{\text{Radiación diaria promedio mensual reflejada del suelo hacia la superficie colectora}}{\text{Radiación global diaria promedio mensual}} \end{aligned}$$

Sustituyendo la ec. 3-3 en la ec. 3-2 tenemos:

$$\bar{I}_T = \bar{H}_{Tb} \bar{R}_b + \bar{I}_{Td} \quad (3-4)$$

El factor \bar{R}_b es función de la transmitancia de la atmósfera y depende de la nubosidad de la localidad, la concentración de vapor de agua y otras partículas suspendidas, sin embargo Liu y Jordan sugieren que \bar{R}_b puede estimarse como el cociente de la radiación extraterrestre promedio mensual sobre una superficie inclinada y la correspondiente a una superficie horizontal, por lo tanto:

$$\bar{R}_b = \frac{I_{0T}}{H_{0T}} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \text{sen} \omega'_s + (\pi / 180) \tilde{\omega}_s \text{sen}(\phi - \beta) \text{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \text{sen} \omega'_s + (\pi / 180) \tilde{\omega}_s \text{sen} \theta \text{sen} \delta} \approx \frac{I_{Tb}}{H_{Tb}} \quad (3-5a)$$

Si se requiere R_b a una hora del día en particular, la ecuación será:

$$R_b = \frac{I_D \cos \theta}{I_D \cos \theta_z} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \text{sen}(\phi - \beta) \text{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \delta} \quad (3-5b)$$

Por otra parte la radiación difusa no varía en función de los contenidos atmosféricos de vapor de agua, polvo, etc. Se supone que la radiación procedente de la bóveda celeste es isotrópica, o sea que es uniforme en todas las direcciones, entonces el cociente de la radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada un ángulo β , y la radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal es igual a $(1 + \cos \beta)/2$.

$$\bar{R}_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3-6)$$

Similarmente, dado que la mayoría de los materiales que constituyen el suelo (césped o pasto, concreto, arena, tierra, etc.) reflejan radiación solar de una manera difusa. En consecuencia, considérese que el suelo localizado frente a la superficie inclinada es muy grande y tiene un albedo o reflectancia ρ ante la radiación solar. Si la radiación global diaria promedio mensual es H_{0T} y la radiación reflejada por el suelo es H_{0T} , entonces la fracción de ésta que intercepta la superficie inclinada del colector es:

$$\bar{R}_\rho = \frac{1 - \cos \beta}{2} \rho \quad (3-7)$$

TABLA 1-7 Albedo para distintas superficies

Superficie	Albedo
Desierto	0.24 - 0.28
Campos, varios tipos	0.03 - 0.25
Bosque, verde	0.03 - 0.10
Pasto, varias condiciones	0.14 - 0.37
Suelo, común	0.07 - 0.20
Moho, negro	0.08 - 0.14
Arena, seca	0.18 - 0.40
Arena, húmeda	0.09 - 0.18
Hielo o nieve	0.46 - 0.86

* J. R. Vaillant, *Utilisations et Promesses de l'Energie Solaire*, Editions Eyrolles, 1978.
 B. Y. H. Liu, R. C. Jordan, "Daily Insolation on Surfaces Tilted toward the Equator", *Trans. ASHRAE*, págs.

La tabla 1-7 muestra valores de albedo o reflectancia para distintas superficies. En la práctica se emplea un valor de 0.20 para suelos comunes, y de 0.70 cuando se encuentran cubiertos de nieve.

Ahora bien, regresando a la ec. 3-3 y sustituyendo las expresiones dadas para \bar{R}_d y \bar{R}_p :

$$\bar{I}_{Td} = \bar{H}_{Td} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho (\bar{H}_{Tb} + \bar{H}_{Td}) \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad *4 \quad (3-8)$$

Considerando que el cociente del promedio diario-mensual de radiación extraterrestre sobre una superficie inclinada y el promedio diario-mensual de radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal I_{0T}/H_{0T} son aproximadamente de igual valor al cociente de la misma naturaleza que los anteriores pero sobre la superficie terrestre I_{Tb}/H_{Tb} ,es decir de la ec. 3-5 tenemos:

$$\bar{R}_b = \frac{I_{0T}}{H_{0T}} \approx \frac{I_{Tb}}{H_{Tb}}$$

Introduciendo \bar{R} como el factor para la transformación del total de radiación global sobre una superficie horizontal a el total de radiación global sobre una superficie inclinada, esto es:

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}_T}{\bar{H}_T}$$

Dividiendo la ec. 3-4 entre \bar{H}_T tenemos:

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}_T}{\bar{H}_T} = \frac{\bar{H}_{Tb} \bar{R}_b}{\bar{H}_T} + \frac{\bar{I}_{Td}}{\bar{H}_T} \quad (3-9)$$

Sustituyendo la ec. 3-8 en la ec. 3-9:

$$\frac{\bar{I}_T}{\bar{H}_T} = \bar{R} = \frac{\bar{H}_{Tb} \bar{R}_b}{\bar{H}_T} + \frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4-0)$$

Finalmente una vez calculado el factor R es posible conocer la cantidad total de irradiación global diaria-mensual promedio sobre una superficie inclinada \bar{I}_T .

$$\bar{I}_T = \bar{R} \bar{H}_T \quad (4-1)$$

*4 Donde la componente directa mas la difusa es la igual a la radiación total, o sea: $\bar{H}_{Tb} + \bar{H}_{Td} = \bar{H}_T$

Ejemplo 1-6

Para el ejemplo 1-5 calcule el total de radiación incidente sobre el plano del colector.

De la ec. 1-2 o de la tabla 1-2 se calcula la inclinación solar promedio mensual:

$$\delta_{\text{grados}} = 23.45^{\circ} \text{sen} \left[\left(\frac{17-80}{370} \right) \times 360 \right] = -20.9^{\circ}$$

El ocaso para el horizonte se calcula con la ec. 1-8 y tenemos:

$$\omega_s = \cos^{-1} \theta [-\tan(25) \tan(-20.9)] = 79.74^{\circ}$$

Y el ocaso para el colector partiendo de la ec. 2-3 es:

$$\omega_s = \cos^{-1} \theta [-\tan(-10) \tan(-20.9)] = 93.86^{\circ}$$

De estos dos resultados el menor es que el arroja la ecuación 1-8 y por lo tanto 79.74° es el ángulo horario para el ocaso del colector.

Para el promedio diario mensual se usa el número de día al que hace referencia la tabla 1-3, siendo éste el 318 para el mes de noviembre, y resolviendo con la ec. 1-1 tenemos:

$$I_0 = 1353 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \times 17}{370} \right) \right] = 1395.8 \text{ W/m}^2$$

Expresando el resultado anterior en MJ/m^2 se tiene:

$$I_{0(\text{sumatoria diaria})} = 24 \times 0.0036 \times 1395.8 = 120.59 \text{ MJ/m}^2$$

Introduciendo finalmente los valores de las ecuaciones 1-1, 1-2 y 1-7 en la ecuación 2-8 vamos a conocer el promedio de irradiación diaria mensual extraterrestre sobre un colector inclinado 35°

$$\bar{I}_{0T} = \frac{120.59 \text{ MJ/m}^2}{\pi} \left[\cos(25-35) \cos(-20.9) \text{sen}(79.74) + \left(\frac{2\pi(79.74)}{360} \right) \text{sen}(25-35) \text{sen}(-20.9) \right] = 38.05 \text{ MJ/m}^2$$

Repitiendo el procedimiento anterior pero ahora para la ec. 2-5 se calcula la irradiación diaria mensual promedio extraterrestre sobre una superficie horizontal.

$$H_{0T} = \frac{120.59 MJ / m^2}{\pi} [\cos(25) \cos(-20.9) \text{sen}(79.74) + \frac{2\pi(79.74)}{360} \text{sen}(25) \text{sen}(-20.9)] = 23.92 MJ / m^2$$

De la ecuación 3-5a

$$\bar{R}_b = \frac{38.05 MJ / m^2}{23.92 MJ / m^2} = 1.59$$

Recordando la ec. 4-0

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_{Tb} \bar{R}_b}{\bar{H}_T} + \frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

Podemos observar que el cociente \bar{H}_{Td}/\bar{H}_T representa la proporción de la irradiación global la cual es directa y ésta se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{H}_{Tb}}{\bar{H}_T} = 1 - \frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} \quad (4-2)$$

Donde el cociente \bar{H}_{Td}/\bar{H}_T está dado por las ecuaciones 3-0 o 3-1, según sea el caso⁵. Del problema 1-5 $\bar{H}_{Td}/\bar{H}_T = 0.46$ y aplicando la ec. 4-2 al problema:

$$\frac{\bar{H}_{Tb}}{\bar{H}_T} = 1 - 0.46 = 0.54$$

Sustituyendo ahora en la ecuación 4-1, con una reflectividad para los alrededores ρ de 0.2, y del mapa de la figura 2-4 para la ciudad de Monterrey Nuevo León $\bar{H}_T = 11.6 MJ/m^2$ tenemos:

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}_T}{\bar{H}_T} = (0.54)(1.59) + (0.46) \frac{1 + \cos(35)}{2} + (0.2) \frac{1 - \cos(35)}{2} = 1.29$$

Finalmente despejando \bar{I}_T obtenemos que esta es de:

$$\bar{I}_T = R \bar{H}_T = 1.29 (11.6 MJ / m^2) = 14.964 MJ / m^2$$

⁵ Revisar el comentario final del ejemplo 1-5

Comentario final del ejemplo: Es fácil deducir que el factor de transformación \bar{R} nos indica el número de veces que aumenta \bar{H}_T por el solo hecho de la inclinación dada al colector. Sin embargo dicho factor puede llegar a ser menor a 1, cuando la inclinación del colector no es la óptima (entre otros factores) para obtener cuando menos lo que se recolectaría con una superficie horizontal.

2.4 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE HORARIA SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES

Es también de interés calcular la radiación sobre una superficie horizontal por un lapso de horas. Lo anterior se logra integrando la ec. 2-5 en un periodo de ángulos horarios ω_2 y ω_1 los cuales abarcan una hora.

$$H_{0T} = \frac{12 \times 3600 \times I_o}{\pi} \left[\cos \phi \cos \delta (\text{sen} \omega_2 - \text{sen} \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \text{sen} \phi \text{sen} \delta \right] \quad (4-3)$$

Donde ω_1 es el ángulo horario mayor o más lejano del medio día, ω_2 el más cercano y se obtienen con facilidad a partir de multiplicar el número de horas en consideración por 360/24 (ec.1-6).

2.5 CALCULO DE IRRADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES TERRESTRES POR HORAS DEL DÍA

Cuando es requerida la estimación hora-por-hora del funcionamiento de un sistema de captación solar, será necesario partir de datos promediados a diarios mensuales y de ahí derivar a un cálculo por horas. Sin embargo como lo fue la estimación de la componente difusa del total de la irradiación, este no es un procedimiento exacto. Por ejemplo, la variación en los valores del total de radiación diaria en el rango promedio de un día totalmente despejado a uno completamente nublado puede ocurrir por distintas circunstancias. Por lo que los métodos que aquí se presentan son mucho más exactos cuando se trata de días claros y despejados.

Aun cuando obviamente estos valores pueden obtenerse de manera experimental, en muchas ocasiones no se cuenta con la instrumentación necesaria; o más comúnmente, se desea que sean valores representativos de un día típico, evitándose así las irregularidades meteorológicas que puedan prevalecer en un día específico.

Estudios estadísticos de la distribución del total de radiación sobre superficies horizontales a lo largo de un día, han guiado a la creación de graficas r_t , la cual es la razón de la irradiación total hora-por-hora h_T sobre la irradiación global promedio diario-mensual \bar{H}_T

$$r_t = \frac{h_T}{\bar{H}_T} \quad (4-4)$$

La figuras 2-5 muestran una serie de curvas adaptadas por Liu y Jordan, donde se gráfica la relación existente entre la radiación horaria y la total diaria incidente sobre una superficie horizontal, en función de la duración del día.

De la ec. 1.8 se deriva la siguiente expresión para calcular la duración total de un día en horas:

$$\omega_s = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4-5)$$

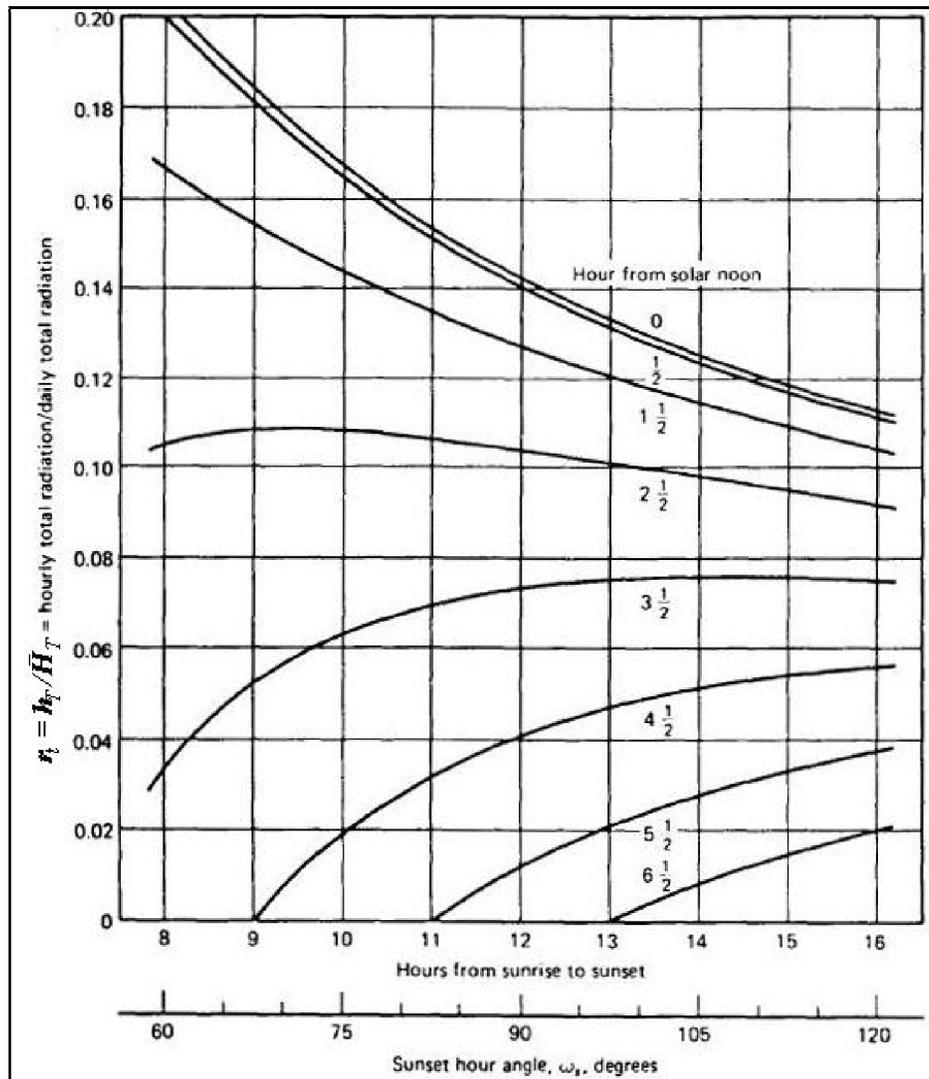


FIGURA 2-5 Relación entre la fracción horaria y la radiación total, sobre una superficie horizontal, en función de la duración del día. Adaptación hecha por Liu y Jordan

Las curvas de la figura 2-5 tienen también solución analítica mediante la siguiente ecuación:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (4-6)$$

Donde los coeficientes a y b están dados por:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

En donde ω_s representa la distancia angular al medio día solar y ω_s la duración total del día en grados (ec. 1-8).

Liu y Jordan también adaptaron una gráfica similar para la determinación de la componente difusa, y de igual forma se tiene ahora el cociente r_d , el cual es la razón entre la fracción de radiación difusa horaria y la cantidad total de radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal, esto, en función de la duración del día (figura 2-6).

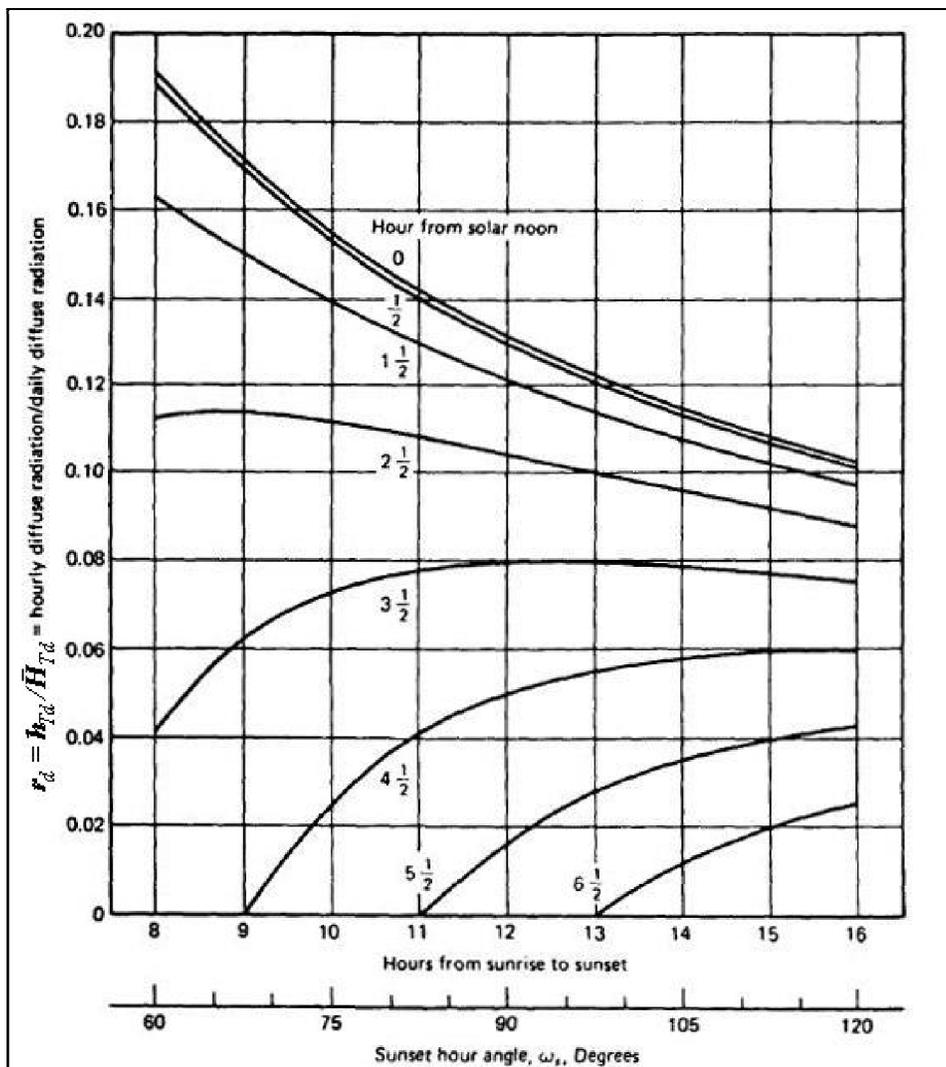


FIGURA 2-6 Relación entre la fracción horaria difusa y la radiación difusa total, sobre una superficie horizontal, en función de la duración del día. Adaptación hecha por Liu y Jordan

La figura 2-6 en combinación con la figura 2-5, puede ser usada para estimar los promedios horarios de radiación difusa si el promedio total diario de radiación se tuviera como dato:

$$r_d = \frac{h_{Td}}{\bar{H}_{Td}} \quad (4-7)$$

Como en la gráfica de la figura 2-5, la solución analítica para las curvas de la figura 2-6 es:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (4-8)$$

En donde nuevamente ω representa la distancia angular al medio día solar y ω_s la duración total del día en grados.

Ejemplo 1-7

¿Cuál es la fracción promedio de radiación recibida en Melbourne, Australia, durante el mes de enero entre las 8.00 y 9.00 a.m.?

Para Melbourne, Australia $\phi = -38^\circ$ (hemisferio sur)

Usando la tabla 1-3 y la ec. 1-2 $\delta = -20.6^\circ$

De la ec. 4-5 el día tiene una duración de $\omega_s = 14.3$ hrs

En la figura 2-5, usando la curva de 3.5 horas (distancia de la hora especificada al medio día solar) y partiendo del eje de las abscisas con el valor de 14.3 (horas de duración del día) obtenemos, con referencia al eje de las ordenas, un valor para $r_t = 0.078$. Lo que en otras palabras nos dice que durante las 8 y las 9 de la mañana se colecta 7.8% de la radiación total del día.

De la ec. 1-8 $\omega_s = 107.07^\circ$

Se hizo uso de la curva de 3.5 horas, por lo tanto convirtiéndolas en grados tenemos:

$$\omega = 3.5 \times \frac{360}{24} = 52.5^\circ$$

Ahora utilizando la ec. 4-6:

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{sen}(107.07 - 60) = 0.7762$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{sen}(107.07 - 60) = 0.3122$$

$$r_i = \frac{\pi}{24} \left(0.7762 + 0.3122 \cos(-52.5) \frac{\cos-52.5 - \cos 107.07}{\sin 107.07 - \frac{\pi 107.07}{180} \cos 107.07} \right) = 0.076$$

Este resultado es muy aproximado al valor que arrojó la gráfica de la figura 2-5, demostrando así la validez de ambas.

2.6 CALCULO DE LAS COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA HORARIAS

Nuevamente se hace necesario definir un índice de nubosidad del cual obtener una aproximación a la fracción de la componente difusa que en estos nuevos términos, será de carácter horario.

Por lo que ahora se buscará una correlación h_{Td}/h_{oT} , siendo como, se mencionó, la fracción horaria de radiación sobre un plano horizontal, la cual es difusa. Definiendo k_T como el índice nubosidad horario.

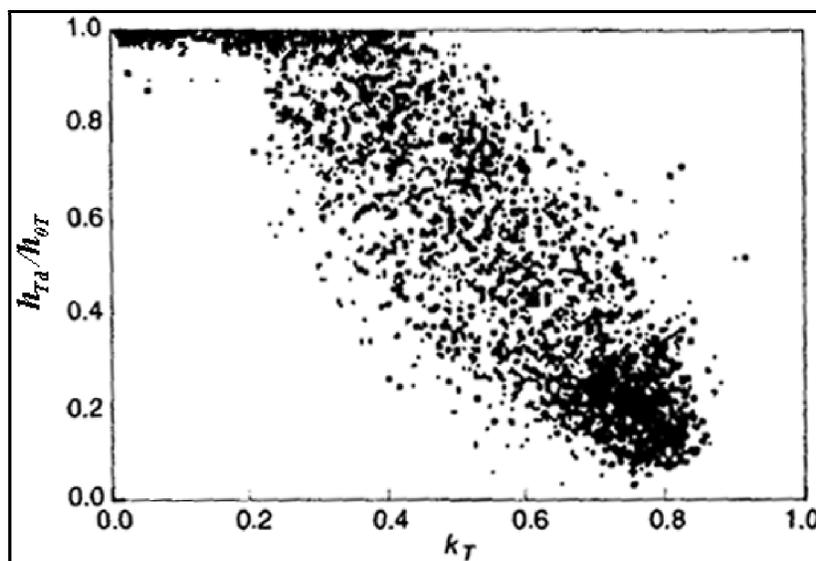


FIGURA 2-7 Ejemplo de la *fracción difusa* Vs *índice de nubosidad* para Cabo Cañaveral, Florida.

La figura 2-7 muestra la gráfica de la fracción difusa h_{Td}/h_{oT} Vs k_t para Cabo Cañaveral, Florida. Para hacer posible la obtención de la correlaciones entre h_{Td}/h_{oT} y k_{tr} datos provenientes de varias locaciones como la de la figura 2-7, son divididos en "recipientes" o gamas de valores k_t . Los datos en cada recipiente son promediados para obtener un punto de la grafica, así pues una serie de estos puntos formaran una correlación más explícita como en la grafica que se muestra a continuación:

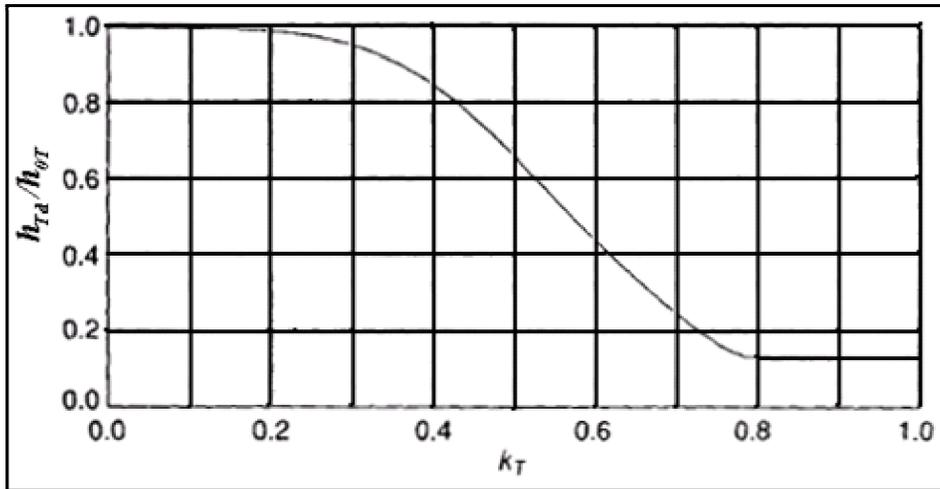


FIGURA 2-7 Gráfica del cociente h_{Td}/h_{0T} como función del índice de

$$k_T = \frac{h_T}{h_{0T}} \quad (4-9)$$

Ejemplo 1-8

Estimar las componentes directa, difusa y reflejada de los alrededores; de la radiación solar, y el total de irradiación sobre una superficie con una inclinación de 60° orientada hacia sur. La altitud de la locación es de $40^\circ N$, el día 20 de febrero para la hora de 9 a 10 AM. Las mediciones locales de irradiación horaria sobre superficies horizontales $h_T = 1.04 \text{ MJ} / \text{m}^2$, la reflectividad de los alrededores es $\rho = 0.60$.

De la ec. 1-1 y la tabla 1-3 $I_0 = 1380.7 \text{ W} / \text{m}^2$

De la ec. 1-2 $\delta_{\text{grados}} = -10.87^\circ$

De la ec. 1-6 obtenemos:

9 A.M. - 3 horas al medio día solar, $\omega_1 = -45^\circ$

10 A.M. - 2 horas al medio día solar, $\omega_2 = -30^\circ$

Finalmente utilizando la ec. 4-8 para calcular la cantidad de radiación incidente sobre una superficie horizontal entre las 9 y 10 de la mañana, tenemos:

$$h_{0T} = \frac{12 \times 3600 \times 1380}{\pi} [\cos 40 \cos -10.87 (\text{sen}(-30) - \text{sen}(-45)) + \frac{\pi(-30 - (-45))}{180} \text{sen} 40 \text{sen} -10.87] = 2.36 \text{ MJ} / \text{m}^2$$

De la ec. 4.9 calculamos el índice de nubosidad horario:

$$k_t = \frac{1.04 \text{ MJ} / \text{m}^2}{2.36 \text{ MJ} / \text{m}^2} = 0.44$$

Con el resultado anterior entramos en la gráfica de la figura 2-7 para obtener la fracción de radiación difusa horaria sobre la radiación total horaria h_{Td} / h_{0T} , todo esto sobre una superficie horizontal:

$$\frac{h_{Td}}{h_{0T}} = 0.76 \quad \therefore \quad h_{Td} = 0.76h_{0T} = 0.76(1.04\text{MJ/m}^2) = \mathbf{0.79\text{MJ} / \text{m}^2}$$

En consecuencia $1 - 0.76$ ó el 24% restante será la fracción correspondiente a la componente directa:

$$h_{Tb} = 0.24h_{0T} = 0.24(1.04\text{MJ/m}^2) = \mathbf{0.249\text{MJ} / \text{m}^2}$$

De la ecuación 3-5b obtenemos el factor \bar{R}_b en donde ya tomaremos en cuenta la inclinación del colector, latitud del lugar y el ángulo horario ω tomándose este último del punto medio de la hora considerada (9-10 A.M.) al medio día solar; es decir:

$$2.5\text{hrs} \times \frac{360}{24} = 37.5^\circ$$

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(40-60)\cos(-10.87)\cos(-37.5) + \text{sen}(40-60)\text{sen}(-10.87)}{\cos 40 \cos(-10.87)\cos(-37.5) + \text{sen}40\text{sen}(-10.87)} = \frac{0.7966}{0.4756} = \mathbf{1.67}$$

Revisando los valores obtenidos en la ec. 4-0 y adaptándola a condiciones horarias, tenemos:

$$R = \frac{h_{Tb}R_b}{h_T} + \frac{h_{Td}}{h_T} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (5-0)$$

Ahora bien multiplicando todos los miembros de la ecuación anterior por \bar{h}_T :

$$i_T = h_{Tb}R_b + h_{Td} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho h_T \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (5-1)$$

Donde el término i_T es la cantidad de radiación global incidente sobre la superficie durante el horario en cuestión.

Finalmente sustituyendo los valores calculados sobre la ec. 5-1 se tiene:

$$i_T = 0.249 \times 1.67 + (0.79) \frac{1 + \cos 60}{2} + 0.60 \times 1.04 \frac{1 - \cos 60}{2}$$

$$i_T = 0.415 + 0.592 + 0.156 = \mathbf{1.163\text{MJ} / \text{m}^2}$$

Comentario final del ejemplo: De los resultados anteriores podemos concluir que cantidad de radiación captada entre las 9 y 10 AM, fue de 0.415MJ/m^3 de radiación directa, 0.592MJ/m^3 difusa y 0.156MJ/m^3 radiación reflejada, dando un total global de 1.163MJ/m^3 .

3.- FÍSICA DE LA CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TERMICA



Los cuerpos, al incidir sobre ellos la radiación y dependiendo de sus características superficiales **absorben, transmiten y reflejan** parte de la radiación que incide sobre ellos.

3.1 ABSORBANCIA

Usualmente representada por la letra griega α , la absorbancia representa al cociente entre la radiación absorbida y la radiación incidente. La absorbancia varía entre 0 y 1.

$$\alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{I_{abs}}{I} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Un cuerpo con una absorbancia $\alpha = 0$ es un espejo perfecto, no absorbe nada de radiación. Un cuerpo con $\alpha = 1$, es un cuerpo negro perfecto, ya que absorbe toda la radiación y, en consecuencia, al no emitir ninguna es de color negro. Los cuerpos reales son, desde este punto de vista, "grises", es decir, de propiedades intermedias. Los valores más bajos de absorbancia están alrededor de 0.03 (un 3%) para superficies especulares, y los más elevados del 0,97 (97%) para superficies de color negro mate.

En el caso particular de que el cuerpo sea una superficie plana, o pueda asimilarse a una superficie más o menos plana, al incidir la radiación solar, parte de la radiación se absorbe y la superficie se calienta. La experiencia demuestra que si disponemos de varias superficies idénticas pero pintadas de diferentes colores, éstas al exponerlas a la radiación solar alcanzan temperaturas diferentes.

La temperatura más alta es alcanzada por aquella superficie que posee una absorbancia mayor, que suele corresponder a un color oscuro. En efecto: el color negro es el que posee una absorbancia mayor (en especial el negro mate), y una superficie o un objeto pintados de este color se calentarán intensamente al ser expuestos a radiación solar.

Por el contrario un cuerpo brillante, como un metal pulido, reflejará intensamente casi la totalidad de la radiación solar y, por lo tanto, se calentará poco.

Concluyendo, los elementos destinados a captar la energía solar serán de color negro mate, puesto que una superficie de este color es la más eficiente para su captación.

3.2 TRANSMITANCIA

Los materiales transparentes son aquellos que permiten el paso de la radiación electromagnética a través de ellos. Los materiales transparentes sólo suelen ser transparentes a determinadas longitudes de onda, por ejemplo el vidrio ordinario de ventana es transparente para el rango de longitud de onda visible y hasta el infrarrojo próximo ($\lambda < 3\mu\text{m}$), pero no lo es para el ultravioleta ($\lambda < 0.2\mu\text{m}$) y para el infrarrojo lejano ($\lambda > 3\mu\text{m}$) tal como lo indica la figura 2.8.

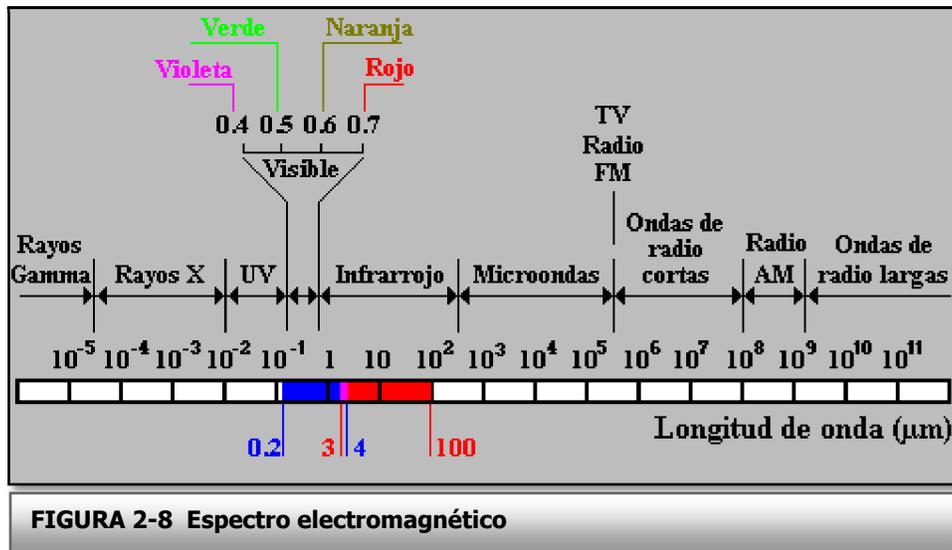


FIGURA 2-8 Espectro electromagnético

Los materiales transparentes se caracterizan por su coeficiente de transmitancia τ , que se define como el cociente de la radiación que ha sido transmitida a través del material entre la radiación que incide sobre el mismo.

$$\tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{I_{trans}}{I} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

Donde la transmitancia τ puede variar de 0 a 1, por lo que un valor intermedio en dicho rango nos hablaría de una fracción de la radiación que está siendo reflejada y/o absorbida.

3.3 REFLEJANCIA

Llamamos reflejancia ρ a la fracción de la radiación que es reflejada al incidir sobre alguna superficie.

$$\rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{I_{ref}}{I} \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

Finalmente los fenómenos de absorbancia, transmitancia y reflejancia se pueden comprender mejor observando la siguiente figura.

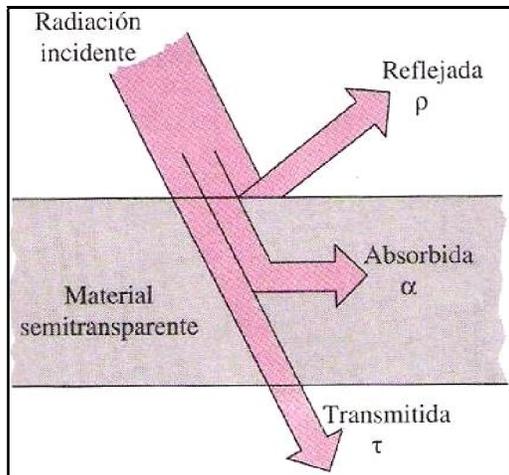


FIGURA 2-9 Absorción, reflexión y transmisión de la radiación

La primera ley de la termodinámica requiere que la suma de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida sea igual a la radiación incidente; esto es:

$$I_{abs} + I_{ref} + I_{tr} = I \quad (5-2)$$

Dividiendo cada termino de la ec. 5.2 entre I se obtiene:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5-3)$$

3.4 EMITANCIA

Los cuerpos además del valores de absorbanca, transmitancia y reflejancia; se caracterizan por otro valor: la emitancia, que se define como el cociente entre la radiación emitida por el cuerpo en cuestión, y la que emitiría un cuerpo negro perfecto a la misma temperatura. Al valor de la emitancia lo representamos con la letra E .

$$E = \frac{\text{Emisión real del objeto}}{\text{Emisión de un cuerpo negro perfecto a la misma temperatura}} \quad (5-4)$$

La emitancia variara de igual modo de 0 a 1, siendo una magnitud que está relacionada con la capacidad de enfriamiento por radiación de un cuerpo. Así, si calentáramos 2 cuerpos a la misma temperatura y tuviesen el mismo calor específico, al dejarlos en un medio aislado (en el vacío), se enfriará antes el que tenga mayor **emitancia**.

Las superficies brillantes y pulidas tienen coeficientes de emitancia reducidos, mientras que las superficies rugosas los tienen elevados.

Por lo que si disponemos de una superficie dotada de una elevada absorbanca destinada a captar energía solar, al incidir la radiación esta se calentará y, como consecuencia de este calentamiento emitirá radiación en forma proporcional a su emitancia.

De aquí se hace evidente que si deseamos obtener temperaturas elevadas necesitaremos que esta superficie tenga una alta absorbanca, y una emitancia reducida.

Finalmente debemos aclarar que los valores de **absorbancia, transmitancia, reflejancia y emitancia** dependen mucho de la longitud de onda de la radiación que incide sobre el material. Una superficie puede presentar propiedades muy diferentes, por ejemplo, para el rango visible y otras para el infrarrojo, como veremos a continuación en el tema de superficies selectivas.

3.5 SUPERFICIES SELECTIVAS

La propiedad de que los coeficientes de absorción y emisión dependan de la longitud de onda es el fundamento de las superficies selectivas.

En efecto, la superficie absorbe energía solar que procede de un cuerpo (el sol) a 5500 °C. Dicha superficie, en cambio, emite energía que corresponde con la temperatura a la que ésta se encuentra, por ejemplo unos 80 °C, como se observa la diferencia es enorme.

En la figura 3-0 observamos las curvas de las energías radiantes, la del Sol y la de la superficie en cuestión. De la curva del Sol (la radiación que el astro emite) ,vemos que a la superficie le llega la radiación visible e infrarroja próxima. Recordando que llamamos infrarrojo próximo a la radiación infrarroja de longitud de onda inferior a 3µm por el hecho de estar próxima al rojo. Por otra parte de la curva de radiación emitida por la superficie, ésta es solo radiación infrarroja lejana (es decir de más de 3µm de longitud de onda).

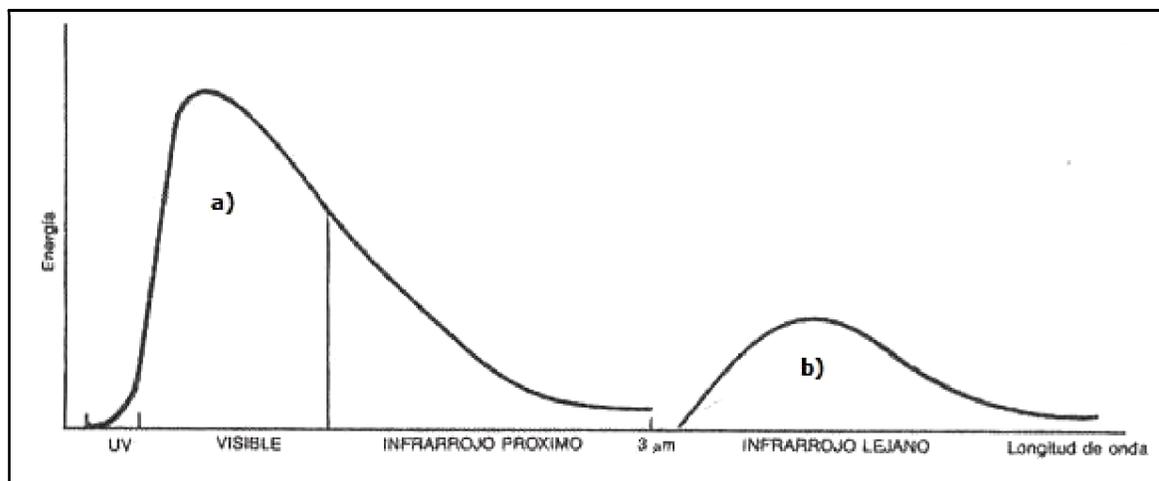


FIGURA 3-0. a) Radiación emitida por el Sol b) Radiación emitida por una superficie a 80° C

Una superficie ideal captadora de energía solar sería aquella que presentase una elevada absorbancia para el visible e infrarrojo (como vemos en la figura 3-0 es donde se halla la mayor cantidad de energía térmica disponible), así como también una reducida emitancia para el infrarrojo lejano. Esta superficie se calentaría intensamente bajo el efecto de la radiación solar, pero no podría perder mucho calor debido al reducido valor de su emitancia. Este tipo de superficies existen y se llaman **superficies selectivas**.

Se llama selectividad de una superficie, al cociente entre la absorbanza y la emitancia:

$$\text{Selectividad} = \frac{\alpha}{\epsilon} \quad (5-5)$$

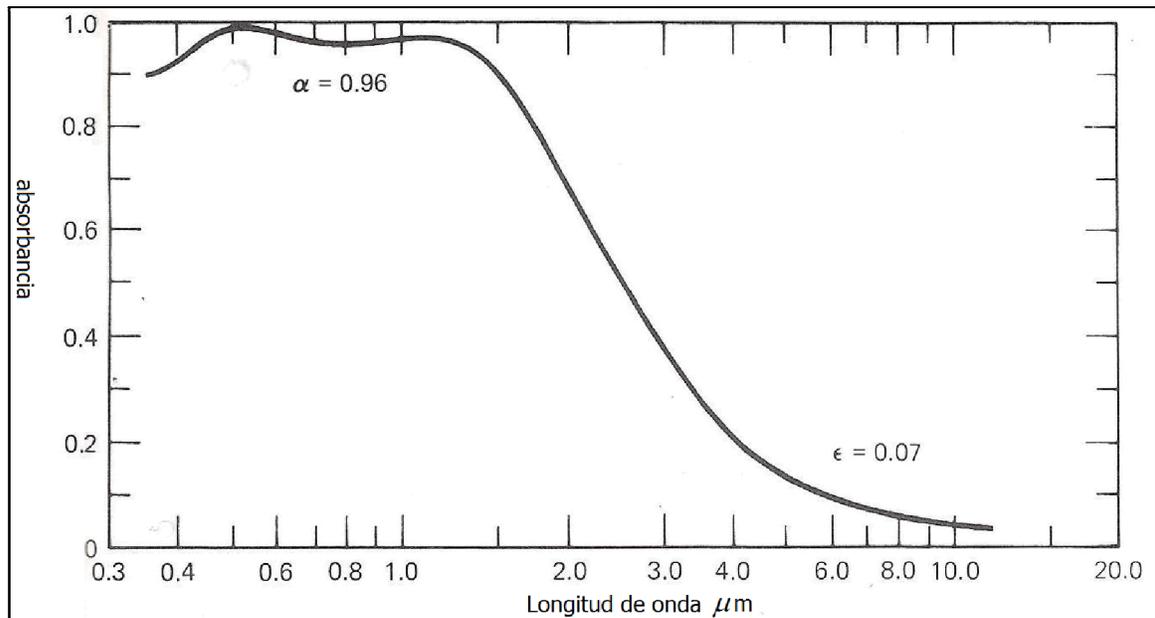


FIGURA 3-1 absorbanza Vs Longitud de onda Comportamiento de una superficie selectiva

Si una superficie presentara una absorbanza de 0.9 y una emitancia del 0.07, su selectividad seria de:

$$S = \frac{0.96}{0.07} = 13.71$$

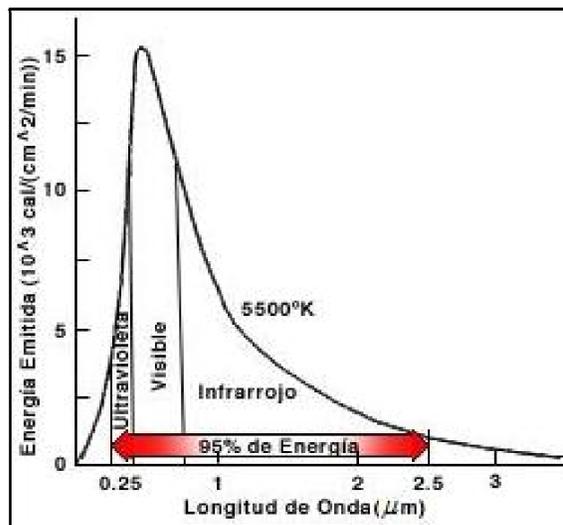


FIGURA 3-2 Rango de longitudes de onda con mayor energía térmica aprovechable.

Tal selectividad corresponde a la superficie, cuya gráfica de absorbanza espectral, se muestra en la figura 3-1. Es posible observar que tal superficie presenta una alta absorbanza para las longitudes de onda donde se tiene la mayor cantidad energía proveniente del sol, tal como lo muestra la figura 3-2.

A su vez la misma superficie presenta una baja absorbanza y también emitancia para longitudes de onda mayores a 3μm.

Analizando el caso de una superficie opaca con los conceptos anteriormente descritos de absorbanza, reflejanza y transmitancia tendremos que:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (5-6)$$

Donde por ser opaca la transmitancia $\tau = 0$, acomodando términos:

$$\alpha = 1 - \rho \quad (5-6a)$$

Con lo anterior, y refiriéndonos nuevamente a la figura 3-1 veremos que para aquellas longitudes de onda menores a $3\mu\text{m}$ la reflejancia ρ de la ec. 5-6a debe ser muy cercana al 0, siendo exactos de 0.04, para que la absorbancia dé el valor de 0.96.

Por el contrario a longitudes de onda mayores $3\mu\text{m}$, de la figura 3-1, vemos que el valor de absorbancia cae abruptamente, con lo que ahora ρ en la ec. 5-6a tomará valores más cercanos a la unidad.

Con lo anterior concluimos que la superficie selectiva deberá tener una baja reflectividad para las longitudes de onda menores $3\mu\text{m}$, y una alta reflectividad para aquellas longitudes de onda que estén por encima $3\mu\text{m}$, es decir el infrarrojo lejano.

Dicho comportamiento se ilustra de mejor manera la siguiente figura:

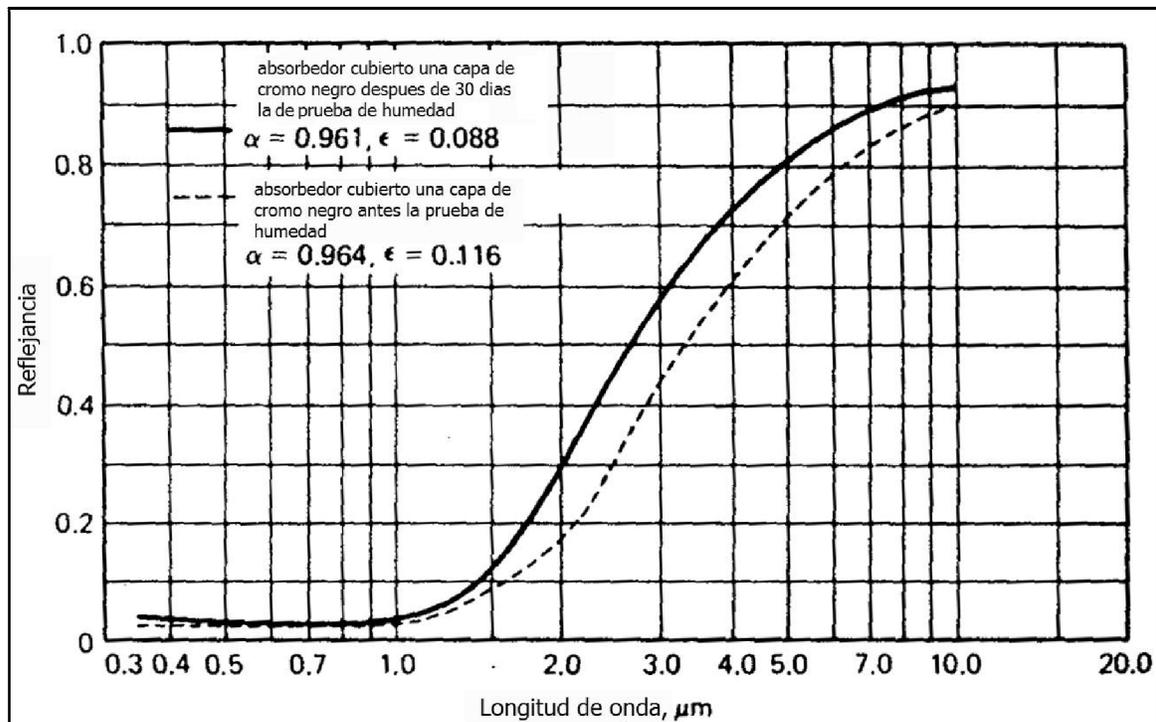


FIGURA 3-3. reflejancia Vs Longitud de onda Comportamiento de una superficie selectiva

Ahora bien, ¿cómo es posible lograr este comportamiento simultáneo en una misma superficie?

Tal como se mencionó en el apartado de la emitancia, ésta será baja para metales muy brillantes y pulidos, los cuales sin embargo presentan también una

elevada reflexión, y para lograr que esta reflexión sólo se dé para aquellas longitudes de onda mayores a $3\mu\text{m}$, es necesario hacer un recubrimiento con una capa delgada de algún compuesto absorbente de la radiación, como óxidos de cobre, níquel o cromo. Del espesor que se le dé a la capa de material absorbente dependerá la longitud de onda a la que la característica absorbente cambie.

He aquí entonces, una superficie brillante y/o pulida que gracias al recubrimiento de un material absorbente, presenta una baja reflexión (alta absorbencia, figura 3-1) para longitudes de onda menores a $3\mu\text{m}$, y a su vez una alta reflexión (baja absorbencia) para longitudes de onda mayores a $3\mu\text{m}$, tal como lo demuestra el comportamiento de la superficie selectiva en la grafica de la figura 3-3.

3.6 EFECTO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA SOBRE LA TRANSMITANCIA

Al referirnos al valor de la transmitancia, inmediatamente sabemos que se trata de una superficie que deja pasar la radiación a través de ella, tratándose por lo tanto de un vidrio.

El efecto del ángulo de incidencia sobre la transmitancia es pequeña y prácticamente constante hasta que dicho ángulo alcance un valor de 60° . A partir de este valor la transmitancia disminuye rápidamente, hasta valer 0 para un ángulo de 90° (figura 3-4).

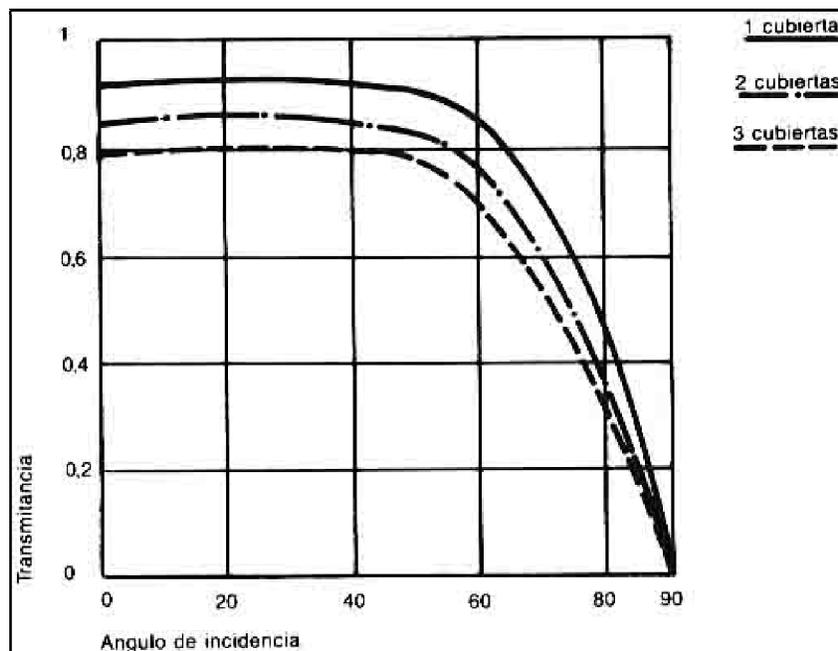


FIGURA 3-4. Efecto del ángulo de incidencia sobre la transmitancia del vidrio de un colector de 1, 2 y 3 cubiertas.

Lo anterior nos indica que, en caso de usar colectores planos con cubierta de vidrio (que es lo más frecuente), el vidrio dejará pasar eficientemente la radiación solar que provenga de un cono de 120° de abertura, tal como nos lo indica la siguiente figura:

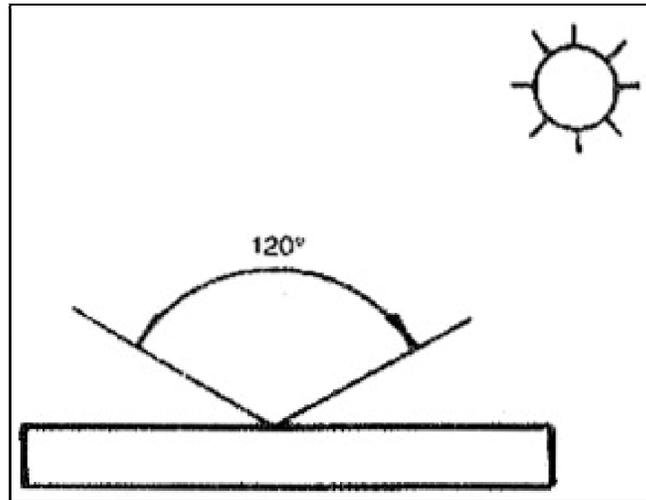


FIGURA 3-5. Abertura angular donde se tiene el mejor aprovechamiento de la radiación incidente

4.- EL COLECTOR SOLAR TÉRMICO



4.1 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía solar térmica es la obtenida a través de colectores solares de distintos tipos los cuales convierten la radiación solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo. El calor se usa entonces para calentar edificios, agua, mover turbinas para generar electricidad, secar granos, etc. Los Colectores Térmicos Solares se dividen en tres categorías:

4.2 CLASES DE COLECTORES SOLARES

- **Colectores de baja temperatura.** Proveen calor útil a temperaturas menores de 65°C mediante absorbedores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas aplicaciones en las que el calor del proceso no es mayor a 60° C, por ejemplo la pasteurización, el lavado textil, etc.
- **Colectores de temperatura media.** Son los 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. Tienen 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 en 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; en algunos países estos sistemas son operados por productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotas.

El tipo de colector de objeto de estudio del presente trabajo se centra exclusivamente en su aplicación a baja temperatura.

4.3 COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA

El colector solar plano es el aparato más representativo de la tecnología solar fototérmica. Su principal aplicación es en el calentamiento de agua para baño y albercas, aunque también se utiliza para secar productos agropecuarios mediante el calentamiento de aire y para destilar agua en comunidades rurales principalmente.

Está constituido básicamente por:

- 1.- Cubierta de vidrio.
- 2.- Placa absorbedora.
- 3.- Tubería de circulación del fluido de trabajo.
- 4.- Cabezales de alimentación y descarga de agua.
- 5.- Aislante térmico.
- 6.- Caja del colector.
- 7.- Marco de aluminio.

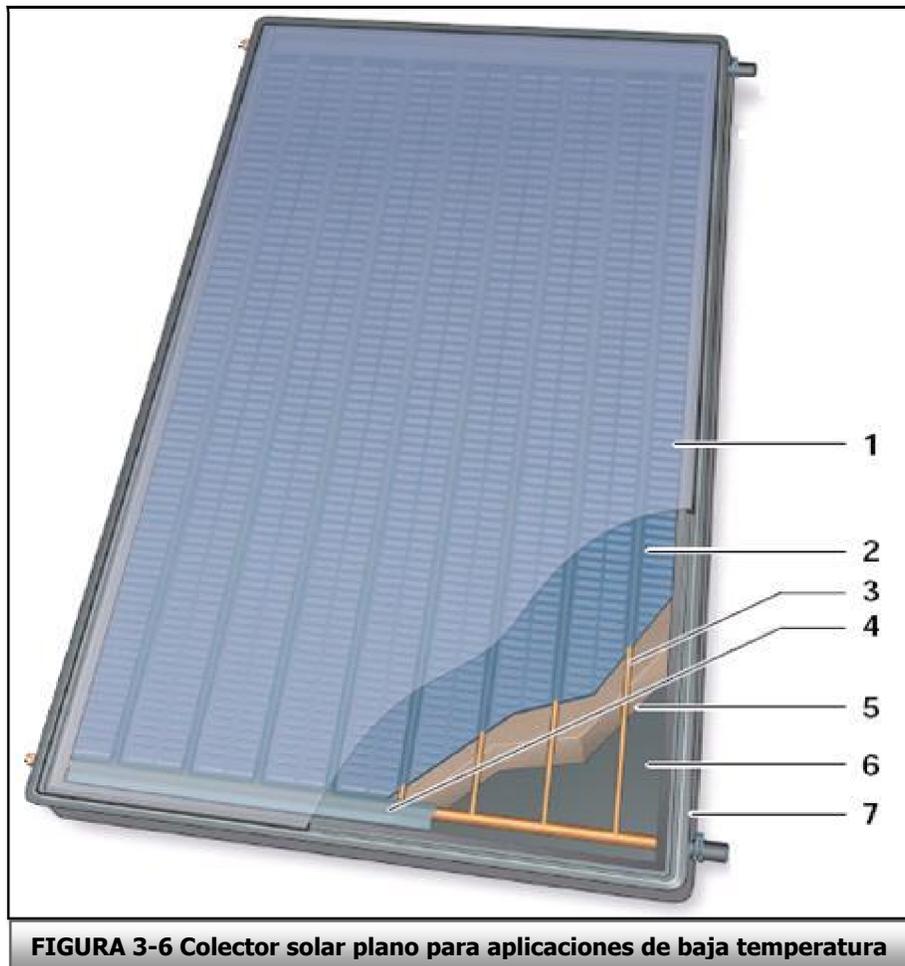


FIGURA 3-6 Colector solar plano para aplicaciones de baja temperatura

4.4 FUNCIONAMIENTO POR TERMOSIFÓN

Las unidades domesticas funcionan gracias a que los colectores solares captan la energía térmica de la luz solar y la transfieren al agua fría o fluido de trabajo que circula a través de ellos. A medida que el agua aumenta su temperatura, su densidad disminuye y asciende a la parte superior del tanque térmico de almacenamiento. El agua caliente en ascenso (menos densa) desplaza al agua fría (más densa) obligándola a circular a través de los colectores (figura 3-7).

En su movimiento a través de los colectores el agua desplazada aumenta de temperatura y asciende nuevamente al tanque. El ciclo se repite indefinidamente siempre y cuando exista radiación suficiente para calentar el líquido en el colector. Este proceso de circulación natural se llama **termosifón**, y es necesario que el termotanque de almacenamiento se localice todo el tiempo por encima del colector, cuando por diferentes razones no es posible lo anterior entonces se recurre a los sistemas de colectores con circulación forzada.

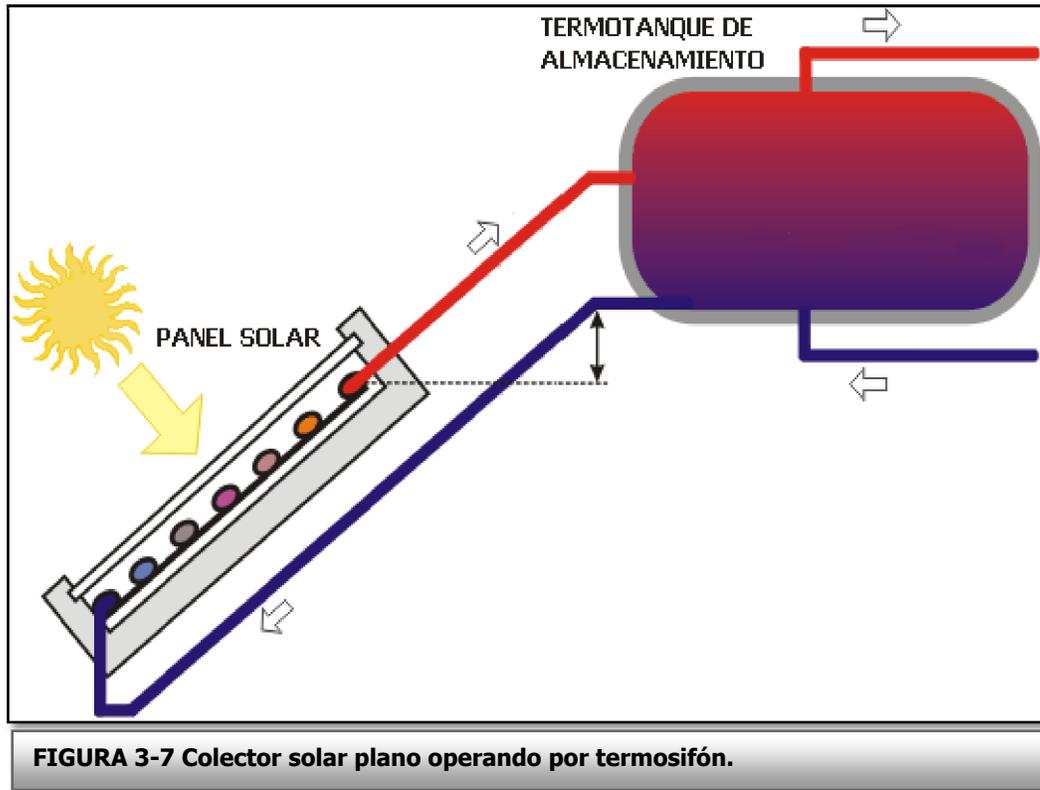


FIGURA 3-7 Colector solar plano operando por termosifón.

4.5 FUNCIONAMIENTO POR CIRCULACIÓN FORZADA

Por razones arquitectónicas o de diseño, el tanque no siempre puede ubicarse por encima del nivel superior de los colectores. En este caso el agua debe ser forzada a circular a través de estos por medio de una bomba. La circulación debe llevarse a cabo únicamente si la temperatura de los colectores es mayor a la temperatura del agua en el tanque. Termostatos detectan electrónicamente esta diferencia y accionan la bomba. Este sistema se conoce como **circulación forzada** (Figura 3-8).

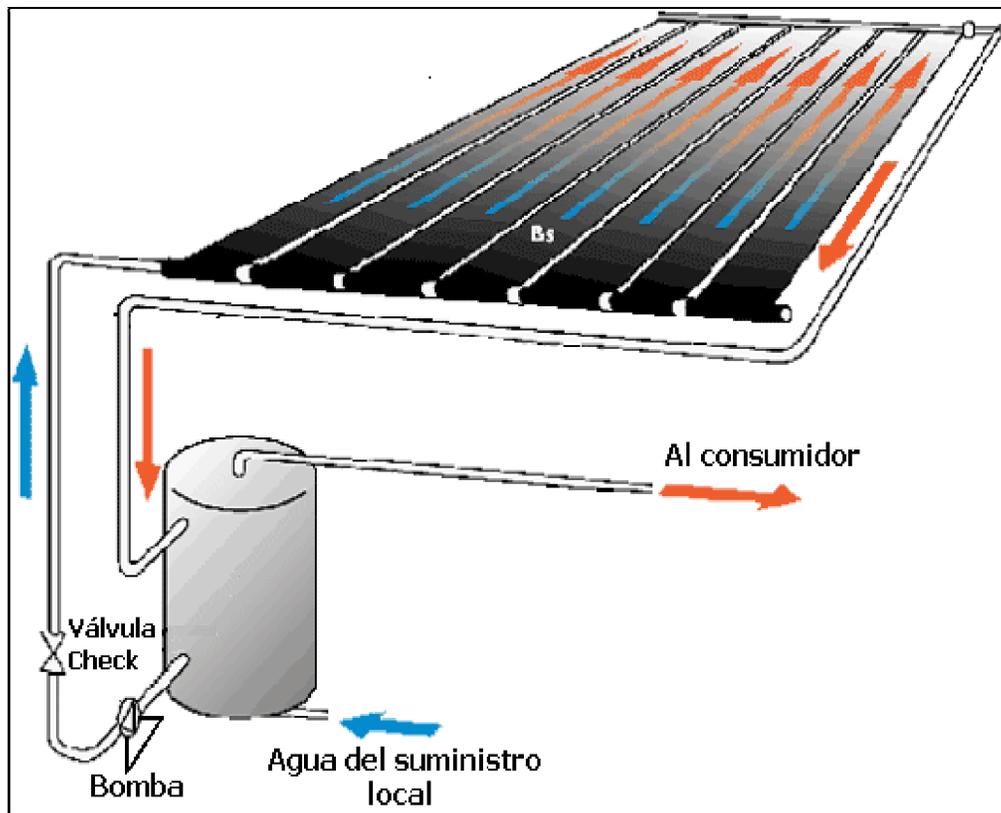


FIGURA 3-8 Colector solar plano operando por circulación forzada.

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 m² de superficie, conectado a un termotanque de almacenamiento de 150 a 200 litros de capacidad o mayores (Figura 3-9).



FIGURA 3-9 Colectores solares para regaderas, Cortesía de la UDLA Puebla

4.6 IMPORTANCIA DEL COLECTOR SOLAR EN MÉXICO

En México el principal mercado del colector solar plano se ubica en las grandes ciudades, ya que en ellas el problema de la contaminación ambiental es realmente complejo. Numerosos estudios han identificado con bastante precisión las principales fuentes contaminadoras, algunas de ellas no tan evidentes como lo son los procesos de combustión de los automotores y de las plantas industriales, pero que son igualmente dañinas y que aportan en gran escala agentes para la formación de ozono. Blake y Sherwood⁶ (1995) reportan que en 180 muestras de aire tomadas en 5 sitios diferentes de la Ciudad de México, entre febrero de 1993 y mayo de 1995, se encuentran presentes altas concentraciones de hidrocarburos reactivos derivados del gas L.P., principal fuente de energía de los hogares mexicanos para cocinar y calentar agua. Estas concentraciones son causadas principalmente por fugas de gas L.P., las cuales se reflejan a una escala masiva en la atmósfera. Estos hidrocarburos reactivos, junto con los componentes de la combustión incompleta del gas L.P., juegan el rol dominante en la producción de ozono en el Valle de México.

El problema antes mencionado puede ser atacado mediante un amplio espectro de posibilidades tecnológicas termosolares, probadas todas ellas, en las que se puede confiar para reducir el impacto ambiental en las grandes ciudades de la república.

⁶ Donald R. Blake y F. Sherwood Rowland, investigadores del departamento de Química de la Universidad de California.

5.1 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN COLECTOR SOLAR PLANO DE BAJA TEMPERATURA

Partiendo de los conceptos antes planteados, será necesario seleccionar los materiales del colector solar en base a sus propiedades físicas, pues además de cumplir con la función de captar la mayor cantidad de energía solar radiante y transferir ésta al fluido de trabajo, deben soportar las variadas condiciones atmosféricas y de operación a las que estarán expuestas por el resto de su vida útil.

A continuación describiremos cada una de las partes del colector solar, sus fundamentación teóricos, así como la selección óptima del tipo material según su función; sabemos que un colector solar está constituido por:

- 1.- Marco de aluminio.
- 2.- Cubierta de vidrio.
- 3.- Placa absorbedora.
- 4.- Cabezales de alimentación y descarga de agua.
- 5.- Aislante térmico.
- 6.- Caja del colector.

5.2 MARCO DE ALUMINIO ANODIZADO

Básicamente el marco de la estructura puede estar hecha de aluminio convencional para cancelería (figura 4-0), sin embargo dada la exposición prolongada a la intemperie y por lo tanto a los mecanismos de corrosión, se recomienda que se haga uso de aluminio anodizado



FIGURA 4-0 Marco de aluminio anodizado (resaltado en rojo)

El anodizado es un proceso electroquímico, de oxidación forzada, en el cual se logra formar una capa protectora de óxido de aluminio (alúmina Al_2O_3) sobre la superficie del aluminio base. La vida útil de este acabado es proporcional al espesor de la capa anódica obtenida.

El óxido de aluminio puede alcanzar una gran dureza al mismo tiempo es muy estable y resistente a los agentes corrosivos del medio ambiente, de ahí su condición de protector del metal base.

La capa crece desde el aluminio debido al proceso electroquímico o sea que está integrada al metal, por lo que no puede ser escamada o pelada.

5.3 CUBIERTA DE VIDRIO

La configuración de la cubierta de vidrio en paneles de 2 x 1m, suelen de ser de dos vidrios, uno que cubre la parte inferior y otro para la superior. En paneles más pequeños puede haber un solo vidrio. Un panel de 2 x 1m o mayor con un solo vidrio no es aconsejable, pues este vidrio, aunque suele ser de mayor espesor, está más expuesto a romperse por dilataciones, pedriscos, vientos fuertes, etc (fig 4-1).

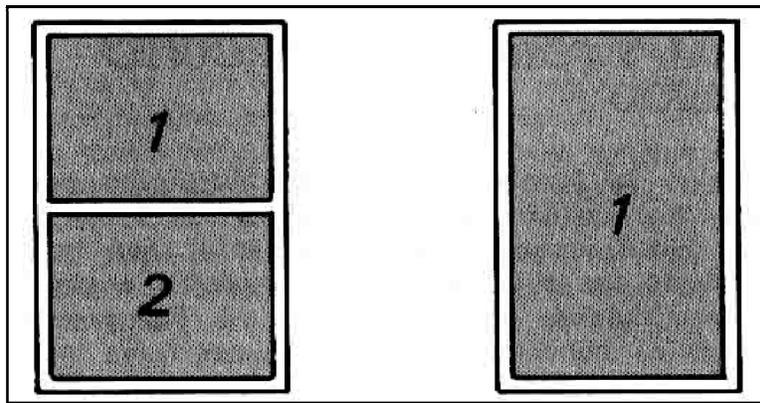
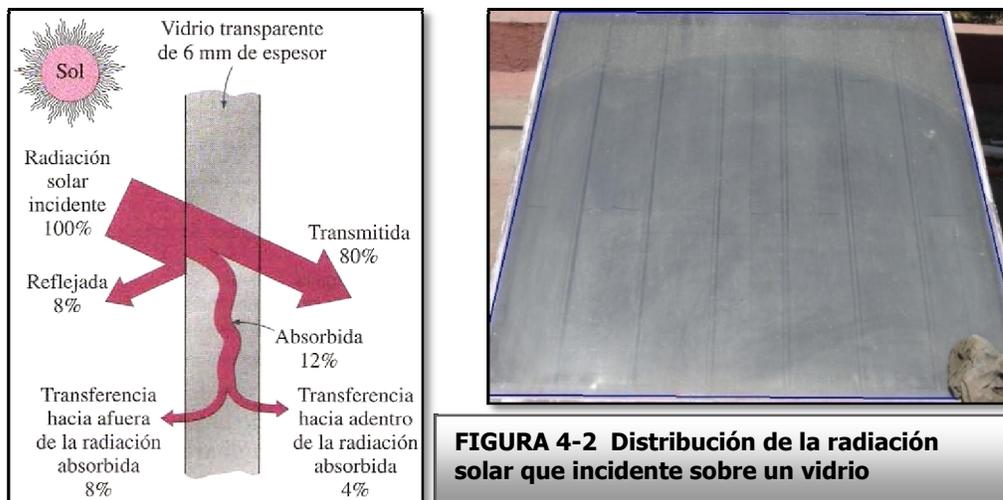


FIGURA 4-1 Configuración de las cubiertas

Cuando la radiación solar choca contra una superficie de vidrio, parte de ella (alrededor de 8% para un vidrio transparente sin recubrimiento) es reflejada de regreso al exterior, otra parte (del 5 a 50%, dependiendo de la composición y el espesor) es absorbida dentro del vidrio y el resto es transmitida hacia el interior, como se muestra en la figura 4-2.



Como se discutió en apartados anteriores, la transmitancia de un vidrio decrece drásticamente para aquellos ángulos de incidencia mayores a 60°, sin embargo se sabe que los cambios en la reflejancia del vidrio debido a la variación de dicho ángulo son pequeños, por lo tanto, lo que en realidad hace que la transmitancia

decaiga en su valor, es el correspondiente aumento de la absorbancia del vidrio en proporción directa con el ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie plana del colector.

En efecto, entre más grande sea el ángulo de incidencia del rayo solar sobre la superficie de cristal del colector, mayor será la longitud de vidrio que tendrá que atravesar la radiación (figura 4-3), y por lo tanto mayor será la cantidad de radiación absorbida por el cristal.

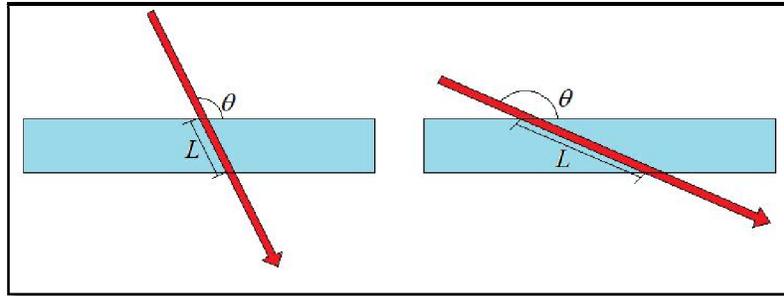


FIGURA 4-3 Variación de la longitud L en función del ángulo de incidencia θ .

Este hecho puede llegar a ser de importancia en colectores planos, no sólo porque estos captan parte de la radiación total muy temprano en la mañana y en la tarde, sino también porque en días nublados recordemos que la mayor cantidad de radiación colectada es de tipo difuso, radiación llegada desde todas direcciones y ángulos.

Además de lo anterior, el aumento de la absorción de la radiación en un material transparente depende de:

- El espesor del vidrio.
- Las características del material transparente (presencia de impurezas).
- La longitud de onda de la radiación incidente.

Este último hecho lo podemos comprobar fácilmente, interponiendo un vidrio entre el Sol y nosotros, pues es perfectamente sensible sobre nuestra piel la radiación infrarroja próxima que emite el Sol. En cambio, si intentamos realizar este mismo experimento con el calor producido por una estufa eléctrica o una plancha, comprobaremos que el vidrio ahora es opaco a la radiación infrarroja lejana. Este fenómeno es propio del vidrio ordinario y también en mayor o menor medida de otros tipos de materiales transparentes, constituyendo el fundamento del llamado **efecto invernadero**.

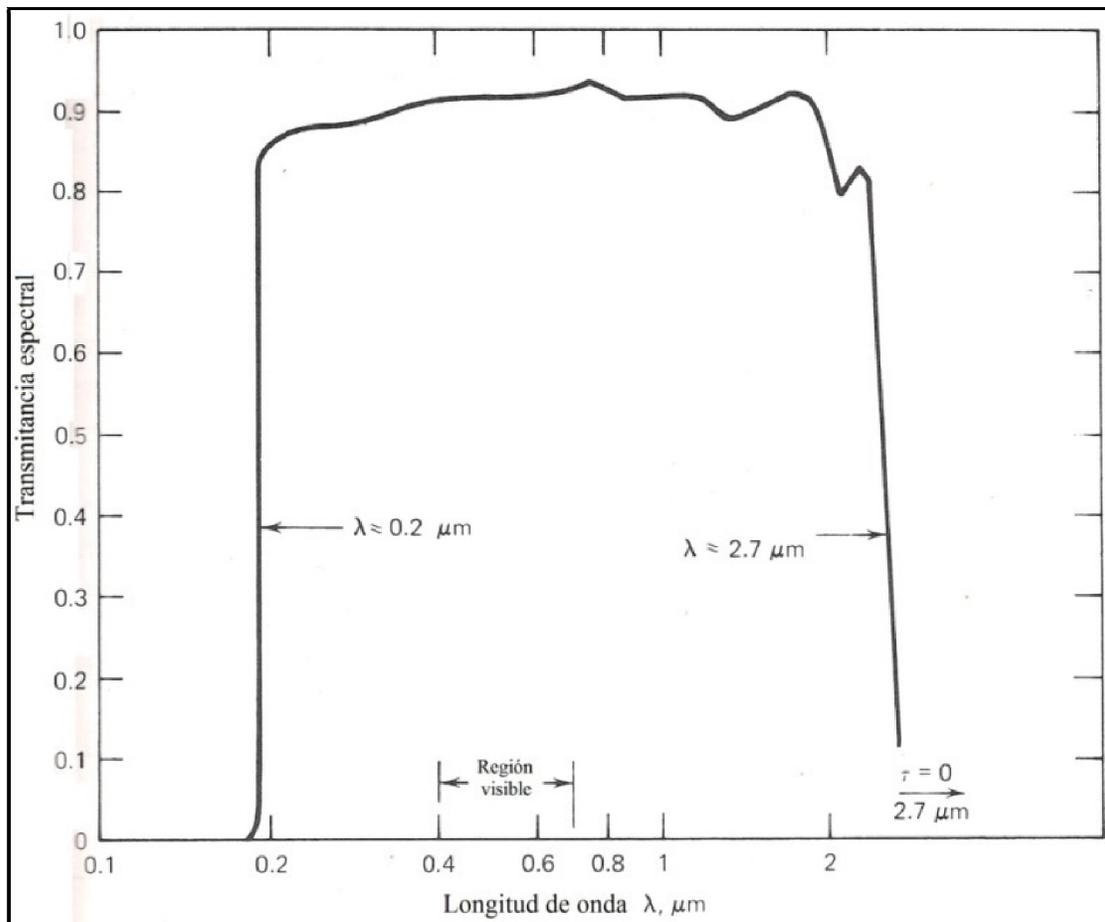


FIGURA 4-4 Transmitancia para el vidrio común con bajo contenido de impurezas..

La figura 4-4 nos muestra la transmitancia para el vidrio común con bajo contenido de impurezas para diferentes longitudes de onda de radiación incidente, en donde podemos observar que la transmitancia se mantiene satisfactoriamente alta para aquellas longitudes de onda que incluyen la luz ultravioleta de al menos $0.2\mu\text{m}$, pasando por el rango visible, hasta llegar al infrarrojo cercano menor a $2.7\mu\text{m}$, en donde inmediatamente después la transmitancia cae considerablemente.

5.3.1 Efecto de las impurezas en el vidrio.- La absorción de la radiación a través de un vidrio dependerá del contenido de ciertas sustancias, y en particular de la presencia de óxido de hierro. El óxido de hierro es el responsable de darle al vidrio ordinario un color verdoso cuando se le observa de perfil o en grandes espesores.

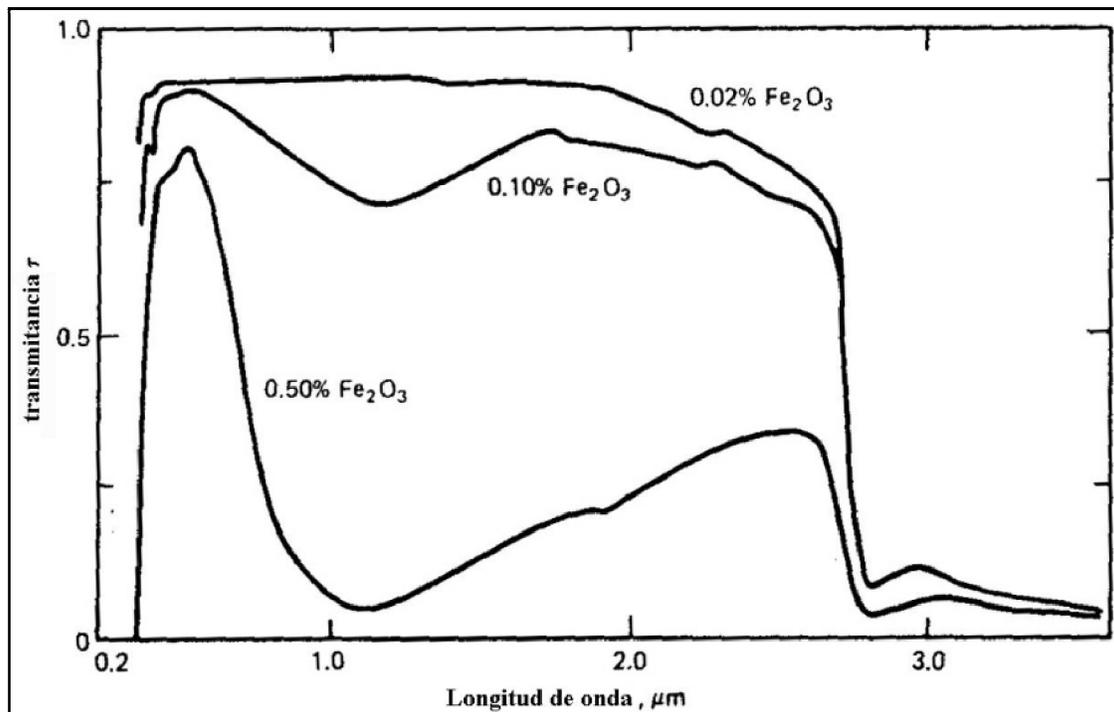


FIGURA 4-5 Transmitancia de vidrios con distintas concentraciones de óxido de hierro.

La figura 4-5 muestra una comparación de la transmitancia en 3 tipos de vidrios, cada uno con un porcentaje distinto en contenido de óxido de hierro. Destacando aquel cuyo porcentaje de óxido de hierro es de 0.02%, obviamente este tipo de vidrio tendría un mayor precio.

5.4 PLACA ABSORBEDORA

Hasta el momento los fenómenos térmicos se limitaban a la transferencia de calor por radiación, y ahora hablando de la función concreta de la placa absorbedora, tendremos que dicha placa habrá de absorber la fracción de radiación solar que haya logrado penetrar el cristal, y transferirla al fluido de trabajo, en este caso el agua, llevándose así los 3 mecanismos conocidos de transferencia de calor, por radiación, por conducción y convección.

Como se puede observar en la figura 4-6 (izquierda) la fracción de radiación solar transmitida, incide sobre las placas de cobre pintadas de color negro, calentándolas, y llevándose así el primer proceso de transferencia de calor por radiación; las placas de cobre a su vez transmitirán, por medio del fenómeno de conducción, su calor a la tubería de cobre la cual a través del mecanismo de convección de calor cederá su energía térmica al fluido en movimiento que pasa en su interior.

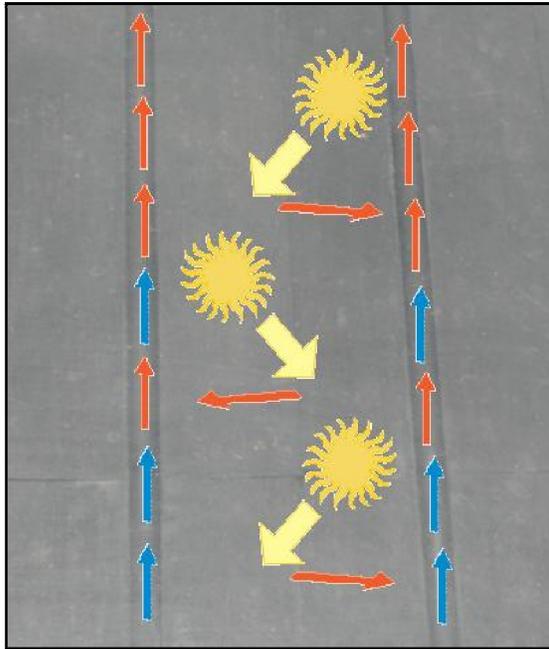


Figura 4-6. En las imágenes se esquematizan los 3 mecanismos de transferencia de calor (izquierda). Y una de las placas de cobre utilizadas para formar la totalidad de la placa absorbidora (arriba).

5.4.1 Placa Absorbedora-Removiendo el Calor.

Una vez que el calor solar ha sido absorbido, por la superficie de la placa absorbidora, éste debe ser removido y entregado para su uso o almacenamiento. Lo anterior se logra, como hemos dicho, haciendo circular un fluido para la transferencia de calor como aire o en nuestro caso agua.

Si el calor no fuese debidamente removido de la placa absorbidora, éste se acumularía provocando el incremento de la temperatura del colector hasta que fuese lo suficientemente alta como para que las pérdidas de calor al exterior y el escaso calor removido por fluido de trabajo, igualen la carga neta de calor recolectada por el colector, lo que lo haría sumamente ineficiente.

Una señal indiscutible de una remoción eficiente del calor absorbido por el colector, nos dice que la temperatura de su superficie debe ser tan baja como sea posible, es decir muy cercana a la temperatura de entrada del fluido de trabajo, señal de que efectivamente se está cediendo la mayoría energía calorífica captada al agua.

Razón de flujo. Se sabe que el fluido de trabajo se calienta al ir removiendo el calor del colector, si la razón de flujo es baja la temperatura del fluido aumentara apreciablemente en la remoción de una determinada cantidad de calor, con ello habrá un indeseable aumento de la temperatura promedio del colector incluso si la transferencia de calor es la ideal, es por esto que la razón o tasa de flujo al interior de la tubería del colector es un factor determinante en la eficiencia del mismo.

Transferencia de calor en un fluido. El mantener una adecuada razón de flujo no es la única consideración de importancia para la transferencia de calor en un fluido. El calor deber ser transferido a dicho fluido, lo cual resulta sencillo

si el flujo es rápido, pero si éste fuese un poco más lento la transferencia sería menor, ya que un flujo lento o en régimen *laminar* no remueven el calor de las paredes del ducto tan eficientemente como lo haría un fluido más rápido o en régimen *turbulento*. Por lo tanto la facilidad con la que es posible transferir calor a un fluido depende en gran medida del tipo de flujo *laminar* o *turbulento* que posea (figura 4.7). A medida que la velocidad del fluido aumenta, pequeñas irregularidades tienden a crear remolinos provocando con esto un mezclado intenso del fluido lo cual mejora la transferencia de calor y la cantidad de movimiento entre las partículas de ese fluido, así mismo incrementa la fuerza de fricción del fluido sobre las superficies y con ello la velocidad de transferencia de calor por convección.

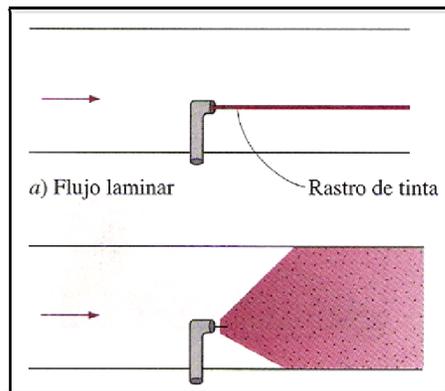


FIGURA 4-7 Comportamiento de un fluido coloreado inyectado en un flujo laminar y turbulento

Tanto el coeficiente de fricción como el de transferencia de calor alcanzan sus valores máximos cuando el flujo es totalmente turbulento, y es posible que sea necesario usar una bomba más grande para vencer las fuerzas de fricción más grandes que vienen acompañando, como se comentó, a la velocidad más alta de transferencia de calor.

Calor transferido por conducción.- El calor recolectado debe ser transferido de la superficie de la placa absorbidora a las paredes de los tubos o ductos que transportan al fluido de trabajo, en donde dicha superficie

funciona como una aleta para la tubería, por lo que el calor recolectado pasa a lo largo del área de sección transversal al plano desde la distancia media a cada par de tubos (figura 4-8). Por ello la conductividad y el espesor de la placa absorbidora son de suma importancia.

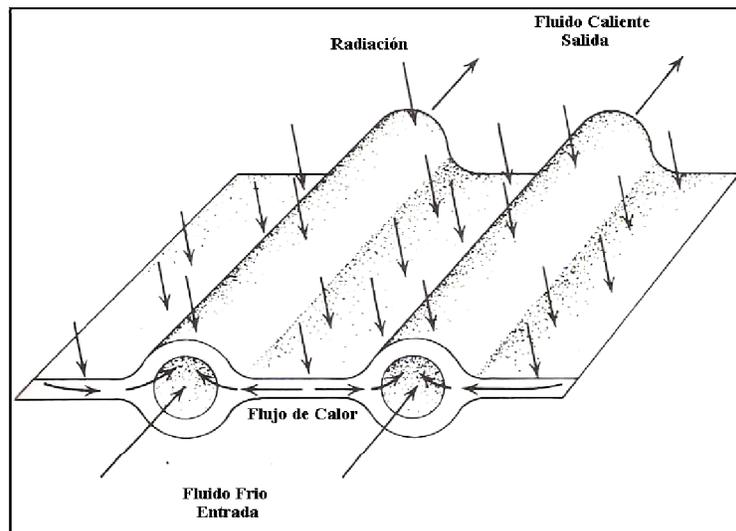


FIGURA 4-8 Transferencia del calor en una placa absorbidora

5.4.2 Diseño de la placa absorbidora

La figura 4-9 presenta varios diseños de absorbedores, mostrando las rutas que tomará el fluido al ir removiendo el calor recolectado.

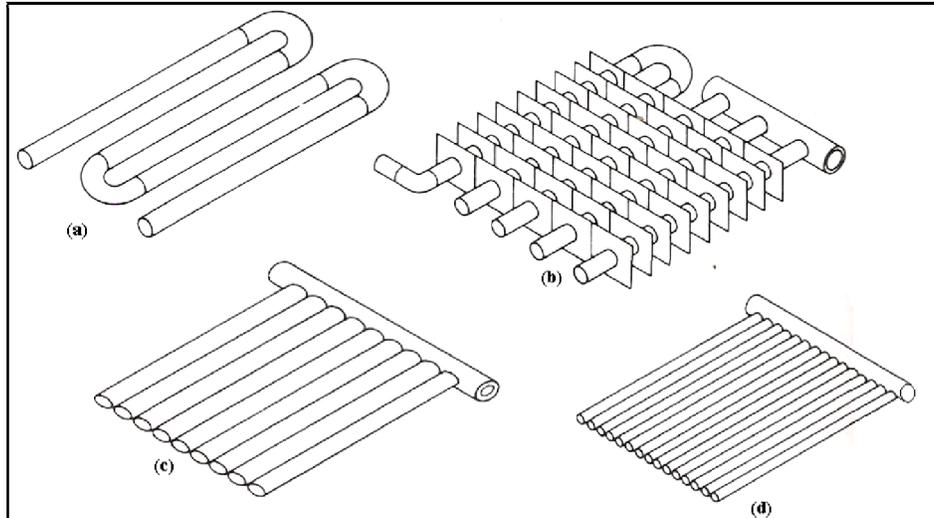


FIGURA 4-9 Diseños y configuraciones de placas absorbedoras

El diseño (a) en la figura es un simple serpentín de tubería y conexiones comercialmente disponibles y no tiene una placa absorbidora como tal. Este modelo presenta la desventaja de dejar pasar luz solar entre los tubos y por lo tanto ésta no es aprovechada. Las figuras 4-9b y 4-9c muestran dos maneras de mejorar esta situación. En el diseño (b) un arreglo de aletas colocadas de forma perpendicular a los tubos ha sido instalado, este arreglo interceptará toda la luz solar si las aletas son colocadas muy juntas unas de otras.

La configuración del flujo puede permanecer en serpentín, o también los tubos pueden ser conectados en paralelo a la entrada y a la salida del colector. Un colector así puede ser más simple de construir, en la figura 4-9c se muestra una configuración de tubos en paralelo unidos el uno al otro, en donde arreglos especiales de distribuidores o manifolds a la entrada y a la salida deberán ser soldados. Este diseño usa menos material que el diseño (b), sin embargo las velocidades de flujo serán posiblemente menores y como resultado la transferencia de calor será algo inferior. No obstante si los tubos son de menor diámetro, entonces el diseño (d) será más práctico, pues al ser así la tubería provocará una mejor transferencia de calor (régimen turbulento) y una menor caída de presión en comparación con una configuración de serpentín.

Materiales para la placa absorbidora.- La gama de materiales prácticos para la construcción de la placa absorbidora es reducida. El uso de metales está limitado por los costos del cobre, aluminio y el acero. El latón podría llegarse a usar si fuese más económico y su conductividad térmica más alta. La corrosión

es un gran problema con el acero y especialmente con el aluminio cuando estos se encuentran en contacto con un medio acuoso.

La aplicación de plásticos es limitada por el hecho de que dentro del colector temperaturas cercanas a los 150°C se alcanzan con facilidad si el calor no es debidamente removido. Esta situación podría ocurrir durante la instalación o durante una falla de potencia (paro de bombas), por lo que el máximo cuidado en opinión de la mayoría de las personas afines a estos temas, recomiendan que las temperaturas del interior del colector se mantengan por debajo de los 95°C, siendo este el límite máximo de rigidez en la mayoría de los plásticos.

5.4.3. Transfiriendo el calor al fluido

La consideración más importante en la transferencia de calor a un fluido es el tipo de régimen de flujo que se tenga, laminar o turbulento, y una caracterización precisa para conocerlo es por medio del parámetro adimensional conocido como el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5-7)$$

en donde μ es la viscosidad dinámica, ρ la densidad del fluido, V y D son la velocidad del flujo y el diámetro del conducto respectivamente.

Sabemos que el área del conducto y el flujo másico están dados respectivamente por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5-8) \quad \dot{m} = \rho V A \quad (5-9)$$

Multiplicando ambos lados de ec. 5-7 por el área del conducto se obtiene:

$$Re \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\rho V D}{\mu} A \quad (6-0)$$

Despejando Re y sustituyendo 5-9 en 6-0 obtenemos:

$$Re = \frac{\dot{m} D^4}{\mu \pi D^2}$$

y una vez reducida la expresión anterior:

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\mu \pi D} \quad (6-1)$$

En donde finalmente la expresión del número de Reynolds se deja en función del flujo másico \dot{m} y del diámetro del conducto.

Un procedimiento análogo al anterior puede realizarse para obtener el número de Reynolds en términos del caudal Q siendo:

$$Re = \frac{4Q}{v \pi D} \quad (6-2)$$

donde ν es la viscosidad cinemática. La expresión anterior es más práctica en el análisis de los regímenes de flujo, pues generalmente el dato que más se maneja en las instalaciones hidráulicas es precisamente el caudal que manejan las bombas instaladas.

Si se utiliza agua para enfriar un colector solar, desechar calor del radiador de un automóvil, o si aire caliente se usa para la calefacción de un hogar, siendo estos sistemas de flujo estacionario, el calor es transferido por convección forzada, y la ecuación básica para describir tal fenómeno es:

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (6-3)$$

donde \dot{m} es el flujo másico, c_p es el calor específico del fluido a presión constante y ΔT el incremento de la temperatura del fluido.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las propiedades físicas del agua y otros elementos de interés.

Tabla 1-8 Propiedades físicas de medios para la transferencia y almacenamiento de calor (Unidades en SI)

Fluid	Tem- perature, °C	Density, kg/m ³	Viscosity, m Pa·s [g/m·s]	Specific Heat kJ/kg·°C	Prandtl No. (c_p/k)	Thermal Conductivity W/°C·m
Water	38	993	0.684	4.166 ^a	5	0.628
	66	980	0.432	4.187 ^a	2.8	0.661
	93	963	0.305	4.208 ^a	1.8	0.680
Ethylene glycol–water 50% by weight (Dowtherm SR-1) ^b	38	1054 (1061) ^f	2.3	3.43	19.83	0.398
	66	1035 (1041) ^f	1.2	3.52	10.16	0.415
	93	1016 (1024) ^f	0.76	3.64	6.39	0.433
Propylene glycol–water 50% by weight (Dowfrost) ^b	38	1025 (1027) ^f	3.1	3.64	29.0	0.389
	66	1004 (1008) ^f	1.5	3.73	14.6	0.384
	93	985 (988) ^f	0.9	3.83	9.06	0.381
Silicone oil (Dow-Corning Syltherm 444) ^c	38	935	14.98	1.55	162	0.144
	66	913	9.13	1.59	103	0.141
	93	889	6.40	1.63	75.5	0.138
Synthetic oil H-30 ^d (to 175 °C)	38	835	25.1	2.39	461	0.130
	66	820	9.0	2.47	175	0.127
	93	805	4.4	2.55	90	0.125
Mobiltherm light ^e (maximum service temperature 205 °C)	38	966	4.4	1.83	67.1	0.120
	66	950	2.5	1.93	40.9	0.118
	93	935	1.6	2.02	27.9	0.116
Mobiltherm 603 ^e (maximum service temperature 315 °C)	38	855	17.1	1.89	241.7	0.134
	66	838	7.54	1.99	112.8	0.133
	93	820	4.02	2.09	63.9	0.132
Air (50% rh at 70 °F)	21	1.187	0.018	1.01	0.71	0.0260
	66	1.033	0.021	1.02	0.70	0.0292
Rock (any common kind)		1600 (as packed)		0.837		
Concrete (dense)		2043		0.837		1.731
Copper		8902		0.393		377
Aluminum		2722		0.921		206
Steel (not stainless steel)		7860		0.448		45
Stainless steel (300 series, typical)		8005		0.502		16

Ejemplo 1-9

Un colector solar de 1.22m de ancho por 2.44m de altura tiene en su interior agua fluyendo a una temperatura promedio de 65.55°C. La irradiación total sobre la superficie de la placa absorbadora es de 788 W/m², el colector opera con una eficiencia de 48% siendo la temperatura del ambiente de 10°C.

(a) ¿Cuál es el aumento en la temperatura del agua si esta fluye a razón de 25.2µm³/s?

De la tabla 1-8 se pueden conocer los valores de las propiedades físicas del agua a aproximadamente 65.55°C

Calculando la energía neta transmitida al fluido de trabajo y el flujo másico:

$$q = 788 \text{ W/m}^2 \times 0.48 = 378 \text{ W/m}^2$$
$$\dot{m} = \frac{25.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{\text{s}} \times \frac{980 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 0.0247 \text{ kg/s}$$

Obteniendo de la tabla 1-8 el calor específico, y calculando el área tenemos:

$$c_p = \frac{4.19 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$
$$A = 1.22 \text{ m} \times 2.44 \text{ m} = 2.98 \text{ m}^2$$

De la ec. 6-3 despejando ΔT se calcula el incremento en la temperatura del líquido.

$$\Delta T = \frac{Q}{\dot{m}c} = \frac{378 \text{ W/m}^2 \times 2.98 \text{ m}^2}{0.0247 \text{ kg/s} \times \left(\frac{4.19 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times \frac{10^3}{\text{k}} \right)} = 10.88^\circ\text{C}$$

Por lo que el aumento en la temperatura de salida del agua fue:

$$\Delta T = T_s - T_E$$
$$10.88^\circ\text{C} = T_s - 65.55^\circ\text{C}$$
$$T_s = 76.43^\circ\text{C}$$

(b) ¿Cuál es el número de Reynolds si el agua fluye a través del colector, con una configuración en paralelo a lo largo de 8 tubos de 6.35mm (1/4 in) de diámetro interno?

Dividiendo el flujo másico entre las ocho tuberías en las que se dividirá:

$$\dot{m} = \frac{0.0247 \text{ kg}}{\text{s}} \times \frac{1}{8} = 0.00309 \text{ kg/s}$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{4 \times 0.00309 \text{ kg/s}}{\left(0.432 \frac{\text{gr}}{\text{m} \cdot \text{s}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right) \times \pi 6.35 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1434$$

(c) ¿Cual seria el número de Reynolds si el agua pasara por los mismos tubos pero en una configuración en serie (en serpentin)?

$$N_{\text{Re}} = \frac{4 \times 0.0247 \text{ kg/s}}{\left(0.432 \frac{\text{gr}}{\text{m} \cdot \text{s}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right) \times \pi 6.35 \times 10^{-3} \text{ m}} = 11464$$

Como lo indican los resultados, la configuración de flujo en serie arroja valores de Reynolds más altos que aquella en paralelo, sin embargo inherente a esto valores de Reynolds mayores acarrearán mayores pérdidas por fricción y caídas de presión.

5.5 CABEZALES DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA.

Respecto a las conexiones de alimentación y descarga de agua, los paneles pueden presentarlas en tres tipos distintos:

- Por el lateral (derecho y/o izquierdo)
- Por el lateral inferior o superior
- Por la parte posterior (figura 5-0)

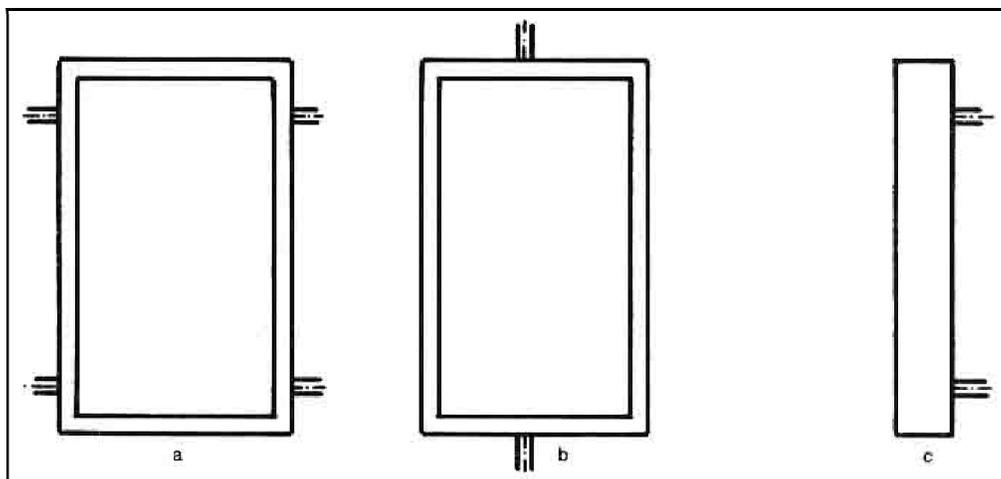


FIGURA 5-0 Configuraciones de conexión

Las conexiones del tipo a) son más comunes, puesto que permiten el montaje de varios colectores funcionando en paralelo, ocupando un espacio reducido. Generalmente este tipo de conexión consiste en cuatro tubos con rosca que aparecen en los extremos de los laterales derecho e izquierdo, y que permiten un acoplamiento rígido y compacto de varios paneles en paralelo, uno al lado de otro. Los dos extremos sobrantes, una vez completada la fila, se taponan con un tapón roscado.

La conexión por la parte inferior y superior b) exige la presencia de dos tubos colectores, donde se acoplarán éstos. Este tipo de conexión es menos rígida que la anterior, e incluso en algunos casos se emplea un tubo flexible de caucho especial para este fin.

Finalmente, la conexión c) posterior ofrece la posibilidad de conseguir la distribución de paneles lo más compacta posible, pues no hay espacios inútiles y los paneles pueden estar tocándose lateralmente entre sí. No obstante, este sistemas a menudo presenta problemas de formación de burbujas que quedan atrapadas en el codo de salida superior del colector solar (rama caliente).

5.6 AISLANTE TÉRMICO

Enseguida de la placa colectora encontramos el aislante térmico. Aquí debemos comprobar la presencia del reflector, siendo éste una hoja de aluminio brillante, pegada encima del aislante en la parte que mira a la placa colectora. El reflector, como su nombre lo indica, es un espejo térmico que refleja otra vez hacia la placa la radiación que ésta emite por debajo, por lo que su presencia aumenta el rendimiento energético de un colector solar con respecto a otro idéntico sin ella (figura 5-1).

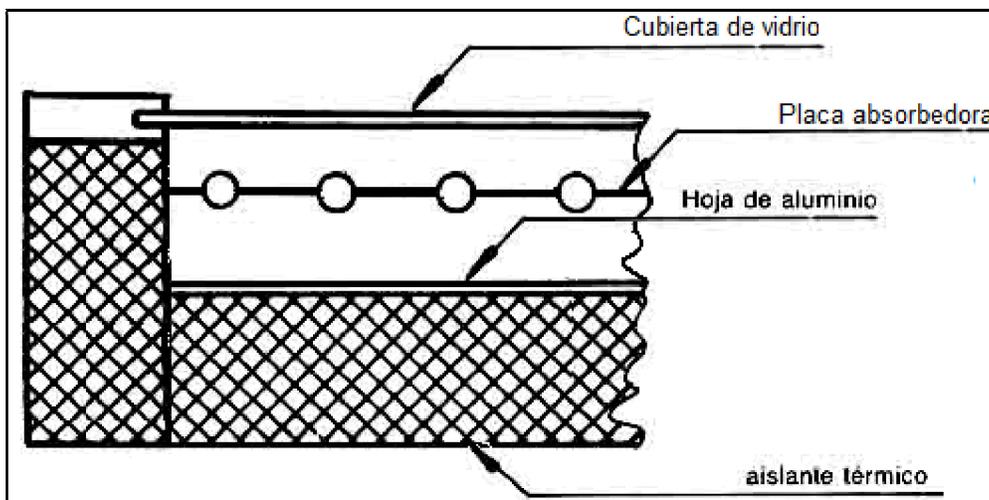


FIGURA 5-1 Reflector de hoja de aluminio

El aislante debe tener un grosor apropiado, nunca inferior a 3cm y preferentemente de 5cm o más. Cuanto mayor es el espesor del aislante, tanto mejor, pues las pérdidas del colector serán reducidas. Un dato importante y que se suele pasar por alto es comprobar que el aislante también debe colocarse en las cuatro paredes laterales del colector, y no únicamente en su costado.

El tipo de aislante a utilizar es muy importante, ya que los aislantes son materiales fibrosos que tienden a absorber humedad.

La humedad puede infiltrarse en un panel a partir del aire atmosférico o por entrada directa de agua. Los aislantes húmedos pierden sus propiedades aislantes y se vuelven buenos conductores del calor. Una buena opción de aislante lo es el *poliestireno expandido*, o mejor conocido como **unicel**. El unicel tiene muy buenas propiedades térmicas, pero sobre todo una alta resistencia a la humedad, sin embargo suele degradarse a la exposición de radiación UV, por tal motivo debe protegerse, por ejemplo con la capa reflectora de aluminio antes vista.

5.7 CAJA DEL COLECTOR

Todo lo anteriormente descrito se introduce en una caja, la cual puede ser de una sola pieza o bien compuesta de un marco y de una placa de fondo independiente, que generalmente es una plancha de acero galvanizado.



FIGURA 5-2 Caja de colector de una sola pieza de acero galvanizado.

**RADIACION TRANSMITIDA A TRAVES DE UN
VIDRIO**

RADIACIÓN ABSORBIDA



6.1 INTRODUCCIÓN

La transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar para cada una de las partes que componen al colector solar, son importantes para la determinación del funcionamiento óptimo del colector.

La transmitancia, la reflejancia y la absorbancia, son función de la longitud de onda, del ángulo de incidencia de la radiación, del índice de refracción n y del coeficiente de extinción k del material.

Tanto n como k son función de la longitud de onda de la radiación, pero para las aplicaciones en energía solar se pueden considerar independientes de ella.

6.2 POLARIZACIÓN

La polarización electromagnética es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, como la luz, por el cual el campo eléctrico oscila en un plano determinado, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección. En una onda electromagnética sin polarizar, al igual que en cualquier otro tipo de onda transversal sin polarizar, las oscilaciones se producen en todas las direcciones normales a la dirección de propagación de la onda

Lo anterior se entiende mejor observando la figura siguiente:

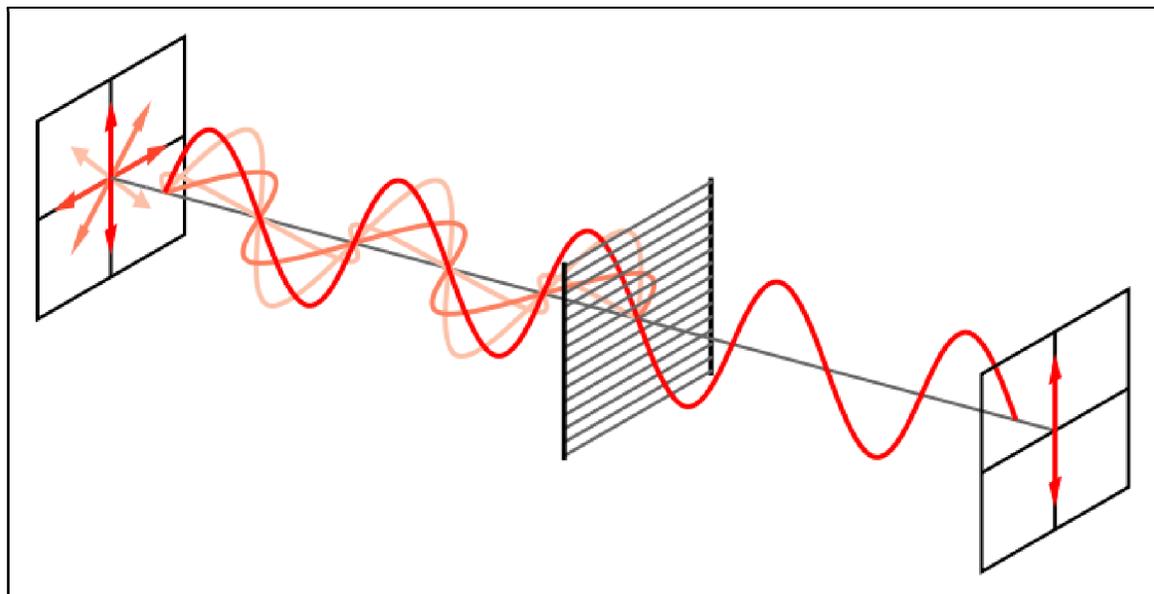


FIGURA 5-3 Polarización de una onda electromagnética

En donde en un principio la onda electromagnética oscilaba en n direcciones normales a la dirección de la propagación, y al pasar por una placa polarizadora,

la onda queda polarizada, es decir, ahora oscila en un plano determinado, para el caso de la figura 5-3, el plano vertical.

6.3 POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN

Cuando la luz natural incide sobre una superficie plana de separación entre dos medios, por ejemplo, el aire y el vidrio de la cubierta de un colector solar, experimenta un fenómeno conjugado de **reflexión** y **refracción**⁷ parciales. El rayo reflejado por esa superficie está linealmente polarizado, y su plano de polarización es un plano perpendicular al plano de incidencia (el cual contiene al haz incidente, al haz reflejado y a la normal a la superficie). Esto es, el campo eléctrico del haz reflejado oscila paralelamente a la superficie reflectante. En los casos en que el rayo reflejado en esta superficie y el refractado tengan direcciones perpendiculares entre sí, la luz reflejada se polariza en su totalidad en la dirección perpendicular al plano de incidencia.

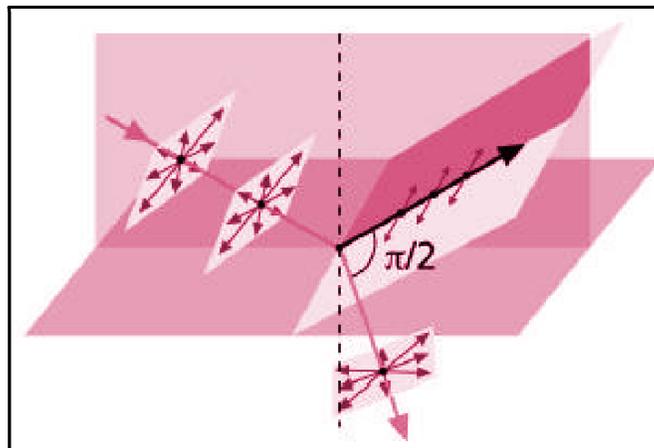


FIGURA 5-4 Polarización por reflexión de una onda electromagnética

6.4 REFLEXIÓN DE LA RADIACIÓN

La fórmula de Fresnel proporciona una relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente, figura 5-4, al pasar de un medio de índice de refracción n_1 a otro medio de índice de refracción n_2 , en la forma:

$$\rho = \frac{I_{ref}}{I} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (6-4)$$

Donde r_{\perp} y r_{\parallel} son las componentes de polarización perpendicular y paralela de la radiación, referidas al plano definido por el rayo incidente y reflejado, así como la

⁷ Cambio de dirección de una onda al pasar de un medio a otro.

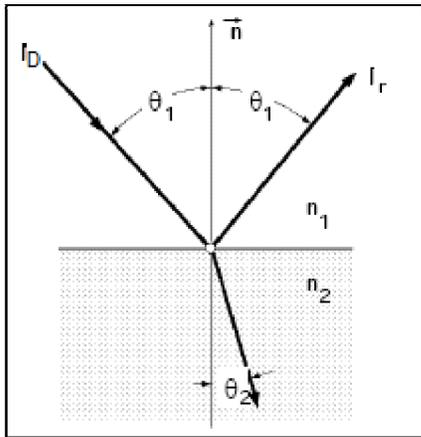


FIGURA 5-5 Ángulos de incidencia y reflexión

normal a la superficie. Siendo estas iguales a:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (6-5) \quad r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (6-6)$$

Los ángulos θ_1 y θ_2 se relacionan con los índices de refracción mediante la ley de Snell (figura 5-5):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

Si es posible conocer el ángulo de incidencia θ_1 y los índices de refracción de n_1 y n_2 de ambos medios, entonces sólo será necesario ocupar de la ec 6-4 a la 6-7 para conocer la reflejancia ρ de una sola cubierta o interface.

Para aquellos casos donde el ángulo de incidencia de la radiación sea de 90° , es decir normal a la superficie, θ_1 y θ_2 son igual a cero, y las ecuaciones 6-4 y 6-7 pueden ser combinadas para obtener:

$$\rho = \frac{I_{ref}}{I} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (6-8)$$

Si uno de los medios es aire (cuyo índice de refracción es muy cercano a la unidad), la ec. 6-8 se hace:

$$\rho = \frac{I_{ref}}{I} = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (6-9)$$

Ejemplo 2-0

Calcular las reflejancias de una superficie de vidrio para los ángulos de incidencia de 90° y 60° . Se sabe el índice de refracción del vidrio es de 1.526.

Para $\theta_1 = 90^\circ$, usando la ec. 6-9 la reflejancia es:

$$\rho = \left(\frac{1.526 - 1}{1.526 + 1} \right)^2 = 0.0434$$

A un ángulo de incidencia de 60° , la ec. 6-7 nos indica el ángulo de refracción θ_2

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin 60}{1.526} \right) = 34.58^\circ$$

De la ec. 6-4 la reflejancia es:

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(-25.42)}{\sin^2(94.58)} + \frac{\tan^2(-25.42)}{\tan^2(94.58)} \right) = \frac{1}{2} (0.185 + 0.001) = 0.093$$

6.5 TRANSMITANCIA A TRAVÉS DE LA CUBIERTA

En aplicaciones de energía solar, la transmisión de la radiación se da a través de delgadas capas o películas adheridas al material de la cubierta, por esta razón en un caso como este, se tienen dos interfaces por cubierta causando pérdidas por reflexión.

Si la cubierta es transparente y despreciando por el momento la absorción, $\alpha=0$, la fracción $(1 - \rho)$ del haz incidente llega a la segunda superficie interfacial; de ésta fracción, $(1 - \rho)^2$ la atraviesa y $\rho(1 - \rho)$ se refleja hacia la primera y así sucesivamente como se indica en la Figura 5-6.

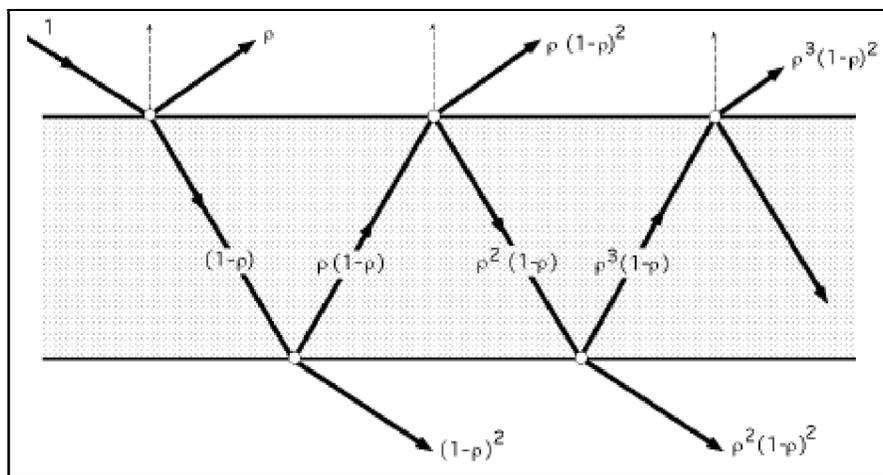


FIGURA 5-6 Transmisión a través de una sola cubierta

Por lo tanto la transmitancia para la reflexión τ_r para una sola cubierta, con absorbancia nula, $\alpha = 0$, es:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (7-0)$$

En la ecuación anterior el subíndice r nos recuerda que sólo están siendo consideradas las pérdidas de reflexión.

Para colectores con N numero de cubiertas del mismo material, el mismo análisis nos arroja:

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} \right) \quad (7-1)$$

Ejemplo 2-1

Calcule la transmitancia de dos cubiertas de vidrio no absorbente a los ángulos de incidencia de 90° y 60° respectivamente.

A un alguno de incidencia normal al colector, la reflejancia de una sola interface del ejemplo 2-0 es 0.0434. De la ec 7-1 con ambas componentes de polarización iguales, la transmitancia es:

$$\tau_{r(90^{\circ})} = \frac{1 - 0.434}{1 + (2(2) - 1)0.434} = 0.85$$

Y del mismo ejemplo anterior, pero a un ángulo de incidencia de 60°, las reflectancias para cada uno de los componentes de polarización son $r_{\perp} = 0.185$ y $r_{\parallel} = 0.001$. De la ec. 7-1, la transmitancia es igual a:

$$\tau_{r(60^{\circ})} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 0.185}{1 + 3(0.185)} + \frac{1 - 0.001}{1 + 3(0.001)} \right) = 0.76$$

La transmitancia solar del vidrio no absorbente, teniendo en promedio un índice de refracción de 1.526 dentro del espectro solar, ha sido calculada para una gran variedad de ángulos, de la misma manera como se elaboraron los ejemplos 2-0 y 2-1, y los resultados desde una hasta cuatro cubiertas se muestran en la siguiente figura:

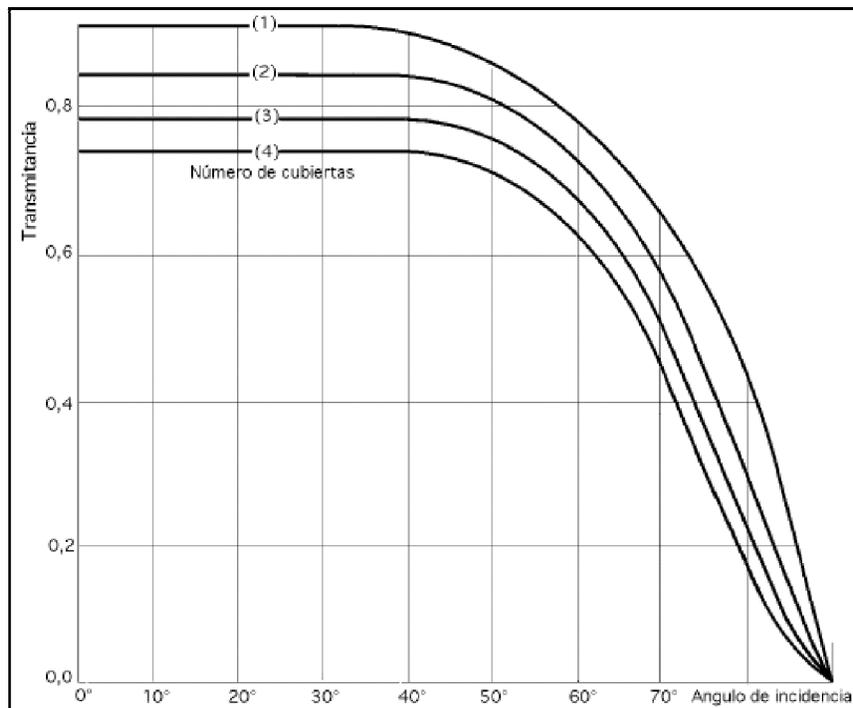


FIGURA 5-7 Transmitancia debida a la reflexión (se desprecia la absorción), correspondiente a 1, 2, 3 y 4 cubiertas.

6.6 ABSORCIÓN DEL VIDRIO

La absorción de la radiación en un medio parcialmente transparente se basa en la ley de Bouguer, según la cual, la radiación absorbida en una distancia dx del camino óptico recorrido en el medio es proporcional a la intensidad local I en dicha zona y a la distancia recorrida por la radiación en el mismo (figura 5-8), de la forma:

$$dI = IKdx \quad (7-2)$$

Integrando la ecuación anterior a lo largo del camino recorrido a través del cristal (desde 0 hasta $L/\cos\theta_2$) tenemos

$$\tau_a = \frac{I_{trans}}{I} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (7-3)$$

Donde el subíndice a nos recuerda que solo serán tomadas en cuenta las pérdidas por absorción para la estimación de la transmitancia

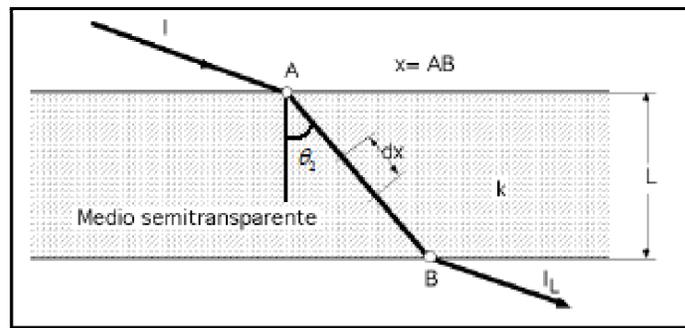


FIGURA 5-8 Camino de la radiación a través de la cubierta.

Para el vidrio, el valor del coeficiente de extinción K varía aproximadamente de 4m^{-1} para vidrio tipo agua blanca (es cual es blanco cuando se le mira de perfil) hasta 32m^{-1} para el vidrio de características pobres (cuyo canto se ve de color verde).

Finalmente Multiplicando los dos factores de transmitancia, para la absorción y para la reflexión, se obtiene la transmitancia total τ del sistema de cubiertas, de la forma:

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (7-4)$$

De la ecuación anterior podemos partir para encontrar los valores de la absorbancia y la reflejancia totales:

$$\alpha = 1 - \tau_a \quad (7-5)$$

$$\rho = \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \quad (7-6)$$

Ejemplo 2-2

Calcule la transmitancia, reflejancia y absorbancia totales de una solar cubierta de vidrio de 2.3mm de espesor a un ángulo de 60° . El coeficiente de extinción K para el vidrio es de 32m^{-1} .

A un ángulo de incidencia de 60° , el camino óptico de la radiación a través del vidrio es de:

$$\frac{KL}{\cos \theta_2} = 32 \times \frac{0.0023}{\cos 34.58} = 0.0894$$

Donde 34.58 es el ángulo de refracción calculado en el ejemplo 2-0, la transmitancia τ_a es entonces de la ec. 7-3:

$$\tau_a = \exp(-0.0894) = 0.915$$

Calculando la transmitancia total de las ecuaciones 7-1 y 7-4 tenemos:

$$\tau_{(60^\circ)} = \frac{0.915}{2} \left(\frac{1 - 0.185}{1 + (0.185)} + \frac{1 - 0.001}{1 + (0.001)} \right) = 0.771$$

La absorbancia total de la ec. 7-5:

$$\alpha = 1 - 0.915 = 0.085$$

Finalmente la reflejancia total se obtiene con la ec. 7-6:

$$\rho = 0.915 - 0.771 = 0.144$$

6.7 TRANSMITANCIA PARA LA RADIACIÓN DIFUSA

Los métodos de análisis anteriores, sólo correspondían para la componente directa de la radiación solar, sin embargo un colector solar también recibe energía procedente de radiación incidiendo desde varias direcciones, tanto del cielo como de los alrededores en los que se encuentre el colector, y ésta es la radiación difusa.

En principio, la cantidad de radiación difusa que pasa a través de la cubierta, puede ser calculada integrando la radiación transmitida desde todos los ángulos. Sin embargo, la distribución angular de esta radiación es generalmente desconocida.

Lo anterior puede simplificarse definiendo un ángulo equivalente de la radiación directa, que dé la misma transmitancia para la radiación difusa. Dentro de una amplia gama de condiciones encontradas en aplicaciones de colectores solares, este ángulo equivalente es esencialmente de 60°. En otras palabras, la radiación directa incidente a 60° tiene la misma transmitancia que la radiación difusa isotrópica.

Sin embargo, si la radiación difusa proveniente del cielo y la reflejada por los alrededores son ambas isotrópicas⁸, entonces la transmitancia de las cubiertas puede estimarse mediante la integración de la radiación transmitida desde todas las direcciones angulares. Dicha integración fue realizada por Brandemuehl y Beckman (1980); los resultados están presentados en la figura 5-9 en términos de un único ángulo de incidencia efectivo. Por lo tanto toda la radiación difusa puede ser manejada con un solo ángulo de incidencia equivalente.

⁸ Consideración ampliamente aceptada para el análisis de este modelo.

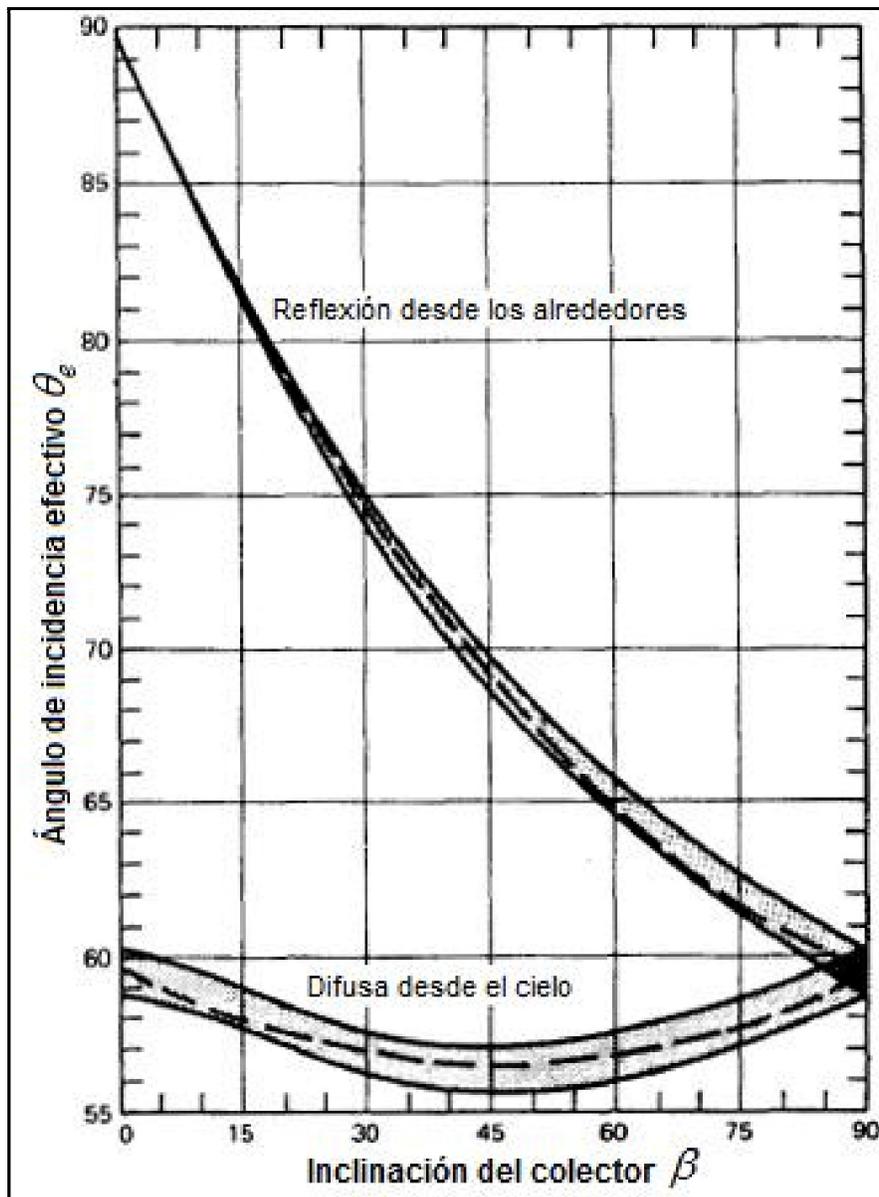


FIGURA 5-9 Ángulo de incidencia efectivo de radiación difusa isotrópica y reflexión de los alrededores isotrópica.

Donde las líneas punteadas de la figura 5-9 para la radiación proveniente de los alrededores está dada por:

$$\theta_e = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (7-7)$$

y para la radiación difusa del cielo:

$$\theta_e = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (7-8)$$

6.8 PRODUCTO TRANSMITANCIA-ABSORBANCIA

De toda la radiación que atraviesa el sistema de cubiertas translúcidas y que llega a la placa metálica absorbente, una fracción es reflejada por dicha placa hacia el sistema de cubiertas, que a su vez es reflejada por las cubiertas otra vez hacia la placa y así sucesivamente, por lo que tan sólo una cantidad muy pequeña de la energía que inicialmente incide sobre la placa se devuelve al medio exterior.

La situación la hemos representado en la Fig 6-0 en la que τ es la transmitancia del sistema de cubiertas y α es la absorbancia de la placa de absorbente. La fracción de energía que en principio se absorbe por la placa es el producto de $\tau\alpha$, y la reflejada por la placa hacia el sistema de cubiertas es $(1 - \alpha) \tau$.

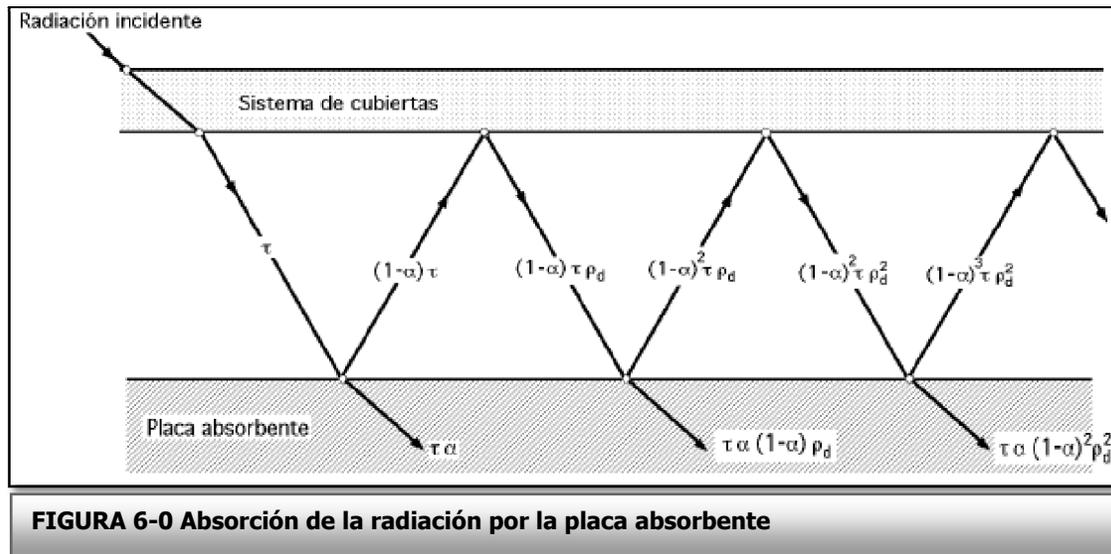


FIGURA 6-0 Absorción de la radiación por la placa absorbente

La reflexión en la placa de absorción es más difusa que especular, por lo que la fracción $(1 - \alpha) \tau$ que llega a la cubierta es radiación difusa, mientras que la que se refleja de nuevo hacia la placa de absorción (que puede estar parcialmente polarizada debido a las reflexiones que ha experimentado al atravesar el sistema de cubiertas) es, $(1 - \alpha) \tau\rho_d$, en la que ρ_d es la reflejancia de la cubierta para la radiación incidente de tipo difusa que llega rebotada desde la placa absorbente (fig. 6-0).

Es posible estimar ρ_d a partir de la ecuación 7-6 como la diferencia entre τ_a y τ un ángulo de incidencia de 60° .

Después de las continuas reflexiones múltiples de la radiación difusa en la placa y cubiertas, la energía absorbida finalmente por la placa es:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha_n}{1 - (1 - \alpha_n)\rho_d} \quad (7-9)$$

Donde α_n es la absorbancia de la placa del colector.

Ejemplo 2-3

Para un colector del ejemplo anterior ($KL = 0.0736$) calcule el producto transmitancia-absorbancia $\tau\alpha$ a un ángulo de incidencia de 50%, si se sabe que la absorbancia de la placa del colector es $\alpha_n = 0.90$.

De la ec. 6-7 se obtiene θ_2 , con $n_1 = 1$, $n_2 = 1.526$ y $\theta_1 = 50$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1}; \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \text{sen} \theta_1}{n_2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1 \text{sen} 50}{1.526} \right) = 30.13^\circ$$

La transmitancia por absorción τ_a es de la ec. 7-3:

$$\tau_a = \exp \left(- \frac{0.0736}{\cos 30.13} \right) = 0.918$$

La transmitancia total se obtiene de las ec. 7-1 y 7-4, siendo:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(-19.87)}{\sin^2(80.13)} = 0.119 \quad r_{\parallel} = \frac{\tan^2(-19.87)}{\tan^2(80.13)} = 0.003$$

$$\tau = \tau_a \tau_r$$

$$\tau_{(50^\circ)} = \frac{0.918}{2} \left(\frac{1 - 0.119}{1 + (0.119)} + \frac{1 - 0.003}{1 + (0.003)} \right) = \frac{0.918}{2} (0.7873 + 0.994) = 0.817$$

La reflejancia de la cubierta ρ_d para la radiación incidente desde la placa colectora se obtiene por la ec. 7-6, recordando que por ser de tipo difusa se toma el valor de τ calculándolo con un ángulo de radiación difusa equivalente de 60° , este valor fue ya obtenido en el ejemplo 2-2, siendo $\tau = 0.771$.

$$\rho_d = \tau_a - \tau = 0.918 - 0.771 = 0.147$$

Finalmente utilizando la ec. 7-9:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha_n}{1 - (1 - \alpha_n)\rho_d} = \frac{(0.817)(0.9)}{1 - (1 - 0.9)0.147} = 0.746$$

Comentario final del ejemplo: Es importante el cálculo de $\tau\alpha$, ya que como se verá más adelante, será necesario para contabilizar la cantidad de radiación solar absorbida por la placa absorbedora del colector.

El valor del producto $\tau\alpha$ en el ejemplo anterior se aproxima demasiado a multiplicar 1.01 veces $\tau\alpha$. Hacer esto es ampliamente aceptado para la mayoría de los colectores solares prácticos. Entonces,

$$(\tau\alpha) \cong 1.01\tau\alpha \quad (8-0)$$

puede ser usado como una estimación de $(\tau\alpha)$ en lugar de la ec. 7-9.

6.9 DEPENDENCIA ANGULAR DEL PRODUCTO TRANSMITANCIA-ABSORBANCIA ($\tau\alpha$)

La dependencia angular de dicho producto es con relación al ángulo θ , siendo éste el de incidencia de la luz solar con respecto a la normal a la superficie del colector. Tal como se muestra en la siguiente figura:

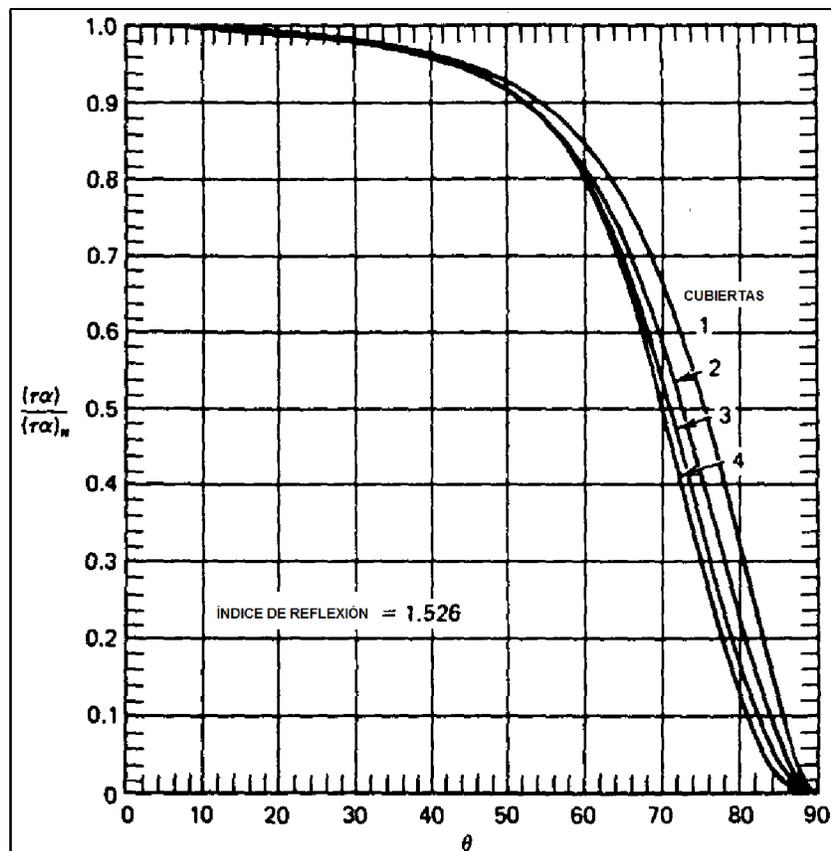


FIGURA 6-1 Dependencia angular transmitancia-absorbancia ($\tau\alpha$)

En la figura 6-1 se muestra la relación $\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$ donde el producto $(\tau\alpha)_n$ es el calculado con la absorbancia de la placa colectora (dato) y la transmitancia de la cubierta (vidrio) al ángulo de incidencia para la radiación directa. El producto

$(\tau\alpha)$ nos refleja finalmente la cantidad de energía absorbida ya sea, según el caso, de radiación directa, difusa y reflejada desde los alrededores.

6.10 RADIACIÓN TOTAL ABSORBIDA POR EL COLECTOR

Para la predicción del funcionamiento del colector se requiere la información de la cantidad de energía solar absorbida por la placa absorbidora del mismo. La cantidad de energía solar incidente sobre un colector inclinado puede ser calculada por los métodos descritos en el capítulo 3. Como se comentó, esta radiación incidente tiene tres diferentes distribuciones espaciales: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada desde los alrededores; y cada una debe ser tratada por separado.

6.10.1 Radiación absorbida horaria

Para efectos de conocer la cantidad de radiación absorbida por el colector, de la ec. 4-0 despejemos el término de la radiación total incidente sobre una superficie inclinada \bar{I} :

$$\bar{I}_T = \bar{H}_{Tb} \bar{R}_b + \bar{H}_{Td} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H}_T \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

O en su defecto la ec. 5-1 nos da el mismo valor de radiación total incidente sobre una superficie inclinada pero ahora en forma horaria i_T :

$$i_T = \bar{h}_{Tb} \bar{R}_b + \bar{h}_{Td} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{h}_T \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Si tomamos la ecuación anterior, y la modificamos para que nos de la cantidad de radiación absorbida por el colector S , sólo es necesario multiplicar cada término por el correspondiente producto transmitancia-absorbancia:

$$S = \bar{h}_{Tb} \bar{R}_b (\tau\alpha)_b + \bar{h}_{Td} (\tau\alpha)_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \bar{h}_T (\tau\alpha)_\rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (8-1)$$

Alternativamente, $(\tau\alpha)_n$ puede calcularse a partir de las propiedades de la cubierta de vidrio y la placa absorbidora; de la figura 6.1 utilizándose con los ángulos de incidencia de cada tipo de radiación, se podrán obtener los tres productos transmitancia-absorbancia necesarios $((\tau\sigma)_b, (\tau\sigma)_d, (\tau\sigma)_\rho)$.

Lo anterior se puede resumir mejor con el siguiente ejemplo:

Ejemplo 2-4

Para un día despejado de invierno se sabe que de las 11 a las 12 AM se registraron $\bar{h}_r = 1.79 \text{ MJ/m}^2$ de los cuales la componente directa marcó $\bar{h}_b = 1.39 \text{ MJ/m}^2$ y la difusa $\bar{h}_d = 0.41 \text{ MJ/m}^2$. La reflejancia del suelo es $\rho = 0.6$, para el horario especificado el ángulo para la radiación directa es $\theta = 17^\circ$, y $R_b = 2.11$. El colector tiene una sola cubierta de vidrio, se encuentra orientado al sur y está inclinado 60° con respecto a la horizontal. La cubierta de vidrio tiene un $KL = 0.0370$ y la absorbancia de la placa del colector a la incidencia normal a la superficie del mismo es, $\alpha = 0.93$. Calcular la radiación absorbida por unidad de área del colector.

De la figura 5-9 o de las ecuaciones 7-7 y 7-8 se obtienen los ángulos θ equivalentes para la radiación difusa y proveniente de los alrededores, siendo estos de 57° y 65° respectivamente.

En seguida se calcula la transmitancia τ_n de la cubierta para un ángulo de incidencia θ de la radiación directa, siendo éste de 17° . Dicho cálculo se puede realizar por los métodos realizados en los ejemplos anteriores, o bien utilizar la siguiente figura:

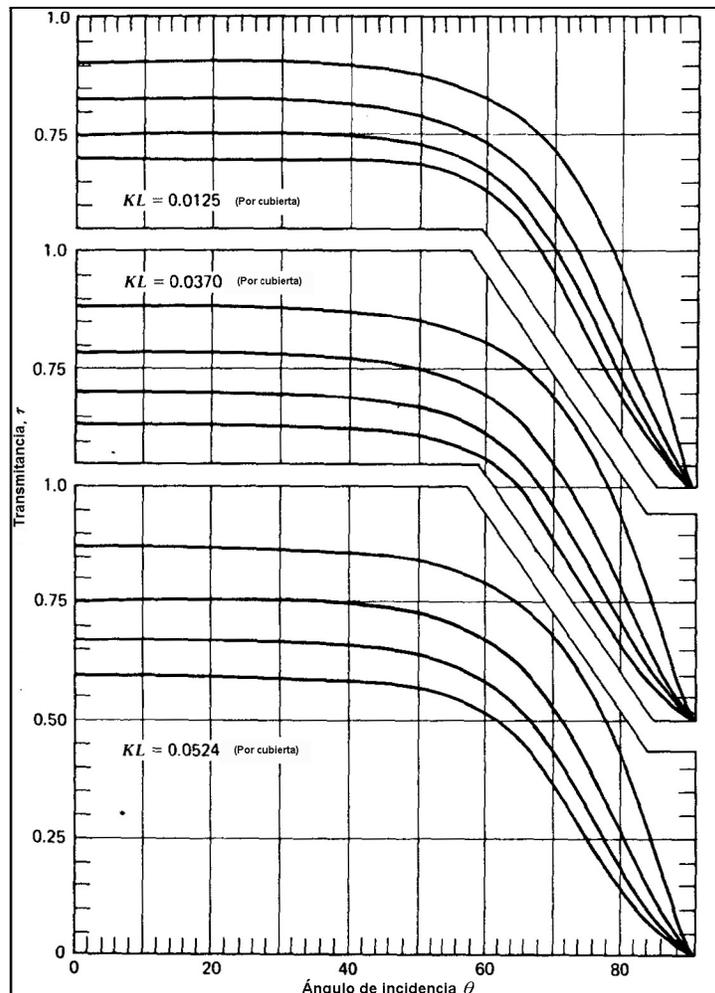


FIGURA 6-2 Transmittancia para distintos tipos de vidrios (KL)

De la figura 6-2 con $\theta = 17^\circ$ y el $KL = 0.0370$, la transmitancia $\tau_n = 0.88$, se sabe que $\alpha_n = 0.93$, por lo tanto de la ec. 8-0:

$$(\tau\alpha)_n = 1.01 \times 0.88 \times 0.93 = 0.83$$

De la figura 6-1 con la componente directa de la radiación a un ángulo $\theta = 17^\circ$, $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ es 0.99, y:

$$(\tau\alpha)_b = 0.83 \times 0.99 = 0.82$$

Igualmente de la figura 6-1 ahora con la componente difusa de la radiación a un ángulo $\theta = 57^\circ$, $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ es 0.87, y:

$$(\tau\alpha)_d = 0.83 \times 0.87 = 0.72$$

De la figura 6-1 con la componente de la radiación reflejada de los alrededores a un ángulo $\theta = 65^\circ$, $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ es 0.76, y:

$$(\tau\alpha)_p = 0.83 \times 0.76 = 0.63$$

Finalmente de la ec. 8-1 calculamos S :

$$S = 1.39(2.11)(0.82) + 0.41(0.72) \frac{1 + \cos 60}{2} + 1.79(0.6)(0.63) \frac{1 - \cos 60}{2}$$

$$S = 2.39 + 0.22 + 0.17 = 2.78 \text{ MJ/m}^2$$

6.10.2 Promedio mensual de radiación absorbida

El ejemplo anterior ilustra como calcular la radiación absorbida durante una hora. Este cálculo puede repetirse para cada hora de cada día durante un mes, del cual se obtendría el promedio mensual de radiación absorbida \bar{S} .

Se define de igual manera un producto transmitancia-absorbancia mensual promedio, del cual al ser multiplicado por la radiación mensual promedio incidente \bar{I}_T obtenemos el promedio mensual de radiación absorbida \bar{S} .

$$(\bar{\tau\alpha}) = \frac{\bar{S}}{\bar{I}_T} = \frac{\bar{S}}{\bar{H}_T R} \quad (8-2)$$

El siguiente método, análogo al utilizado para la evaluación horaria de S , puede ser usado para encontrar \bar{S} .

Por lo tanto la ecuación 4-0 se convierte en:

$$\bar{S} = \bar{H}_{Tb} \bar{R}_b (\bar{\tau\alpha})_b + \bar{H}_{Td} (\bar{\tau\alpha})_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \bar{H}_T (\bar{\tau\alpha})_p \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (8-3)$$

El cálculo de \bar{S} es ilustrado en siguiente ejemplo:

Ejemplo 2-5

Se tiene un colector solar inclinado 90° sobre su horizontal, orientado hacia el sur, y localizado a 40° de latitud norte. El colector consiste de dos cubiertas de vidrio con un $KL = 0.0125$ cada una. El promedio mensual de radiación diaria sobre la superficie del terreno es de 6.63 MJ/m^2 . La reflejancia de los alrededores se puede considerar de 0.3. La absorbancia de la placa del colector a la incidencia normal a la superficie del mismo $\alpha = 0.90$. Calcule para el mes de enero el promedio mensual de radiación incidente sobre el colector \bar{I}_T , la fracción mensual absorbida \bar{S} y el promedio mensual del producto $(\bar{\tau\alpha})$.

De la figura 6.2 la transmitancia, al ángulo de incidencia normal al colector, para dos cubiertas de vidrio $KL = 0.0125$ es de 0.83. Con la absorbancia incidente normal al colector de 0.90:

$$(\tau\alpha)_n = 1.01 \times 0.83 \times 0.90 = 0.754$$

De la figura 5-9 vemos que el ángulo efectivo de ambas componentes de radiación difusa y reflejada de los alrededores, para el colector en vertical es de 59° , por lo tanto de la figura 6-1 con la componente difusa a un ángulo $\theta = 59^\circ$, $(\bar{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$ es 0.83, y:

$$(\bar{\tau\alpha})_d = (\bar{\tau\alpha})_g = 0.83 \times 0.754 = 0.626$$

Estos valores son validos para todos los meses del año.

Para el mes de enero, con una latitud de 40° y una inclinación del colector de 90° , $\bar{\theta}_b = 41^\circ$ por ello de la figura 6-1 $(\bar{\tau\alpha})_b/(\tau\alpha)_n = 0.96$ para ambas cubiertas de vidrio. Por lo tanto:

$$(\bar{\tau\alpha})_b = 0.96 \times 0.754 = 0.724$$

Para el mes de enero la irradiación extraterrestre promedio diario-mensual sobre una superficie horizontal $\bar{H}_{or} = 15.21 \text{ MJ/m}^2$, entonces $\bar{K}_T = 6.66/15.21 = 0.436$

Utilizando la ec. 3-0 de Page tenemos $\bar{H}_{Td} / \bar{H}_T = 0.507$ con lo que la componente difusa y directa de la radiación incidente durante el mes de enero son:

$$\bar{H}_{Td} = 0.507 \times 6.63 = 3.36 \text{ MJ/m}^2$$

$$\bar{H}_{Tb} = 6.63 - 3.36 = 3.27 \text{ MJ/m}^2$$

Usando la ecuación 3-5^a se calcula \bar{R}_b , resultando igual a 2.32

Ahora ya podemos calcular \bar{I}_T con la ec. 4-0:

$$\bar{I}_T = 3.27 \times 2.32 + 3.36 \left(\frac{1 + \cos 90}{2} \right) + 0.3 \times 6.63 \left(\frac{1 - \cos 90}{2} \right)$$

$$\bar{I}_T = 7.58 + 1.68 + 0.99 = \underline{10.25 \text{ MJ/m}^2}$$

Usando la ec. 8.3 la radiación absorbida \bar{S} es:

$$\bar{S} = 3.27 \times 2.32 \times 0.724 + 3.04 \times 0.626 \left(\frac{1 + \cos 90}{2} \right) + 0.3 \times 6.63 \times 0.626 \left(\frac{1 - \cos 90}{2} \right)$$

$$\bar{S} = 5.49 + 0.95 + 0.62 = \underline{7.06 \text{ MJ/m}^2}$$

Por último el promedio del producto transmitancia-absorbancia para el mes de enero es:

$$(\bar{\tau\alpha}) = \frac{\bar{S}}{\bar{I}_T} = \frac{7.06}{10.25} = \underline{0.68}$$

7.- TERMODINÁMICA DEL COLECTOR



7.1 BALANCE DE ENERGÍA PARA UN COLECTOR SOLAR PLANO

El funcionamiento de un colector solar plano bajo suposiciones de régimen estable, es descrito a través de un balance de energía, el cual indique la distribución de energía solar convertida en calor aprovechable Q_u , siendo este la diferencia entre el calor absorbido por el colector Q_a y las pérdidas térmicas y ópticas Q_p .

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad (8-4)$$

La radiación solar absorbida por el colector por unidad de área S , es igual a la diferencia entre la radiación solar incidente y las pérdidas ópticas, tal como lo define la ecuación 8-3, por lo tanto:

$$Q_a = SA_c \quad (8-5)$$

Las pérdidas de energía térmica del colector hacia los alrededores por conducción, convección y radiación infrarroja pueden representarse mediante la multiplicación del coeficiente de transferencia de calor total U_L y el diferencial de temperaturas entre la placa de absorción T_{pm} y la temperatura ambiente T_a .

$$Q_p = U_L A_c (T_{pm} - T_a) \quad (8-6)$$

En régimen estable de trabajo, la salida de calor útil del colector de área A_c es la diferencia entre la radiación solar absorbida y las pérdidas térmicas, esto es:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (8-7)$$

El problema con la ecuación anterior es que la temperatura de la placa de absorción T_{pm} es difícil de calcular o medir, ya que depende del diseño del colector, de la radiación solar incidente y las condiciones de flujo del fluido que entra al colector. Por lo que nos veremos en la necesidad de reformular la ecuación 8-4 para dejar la ganancia de calor útil en función de la temperatura del fluido de entrada y otro parámetro llamado *factor de remoción de calor*.

7.2 COEFICIENTE TOTAL DE PÉRDIDAS DE CALOR

Para la descripción de dicho coeficiente se tiene en la figura 6-3 un colector solar de doble cubierta y en la figura 6-4 su respectiva representación en circuito térmico de resistencias.

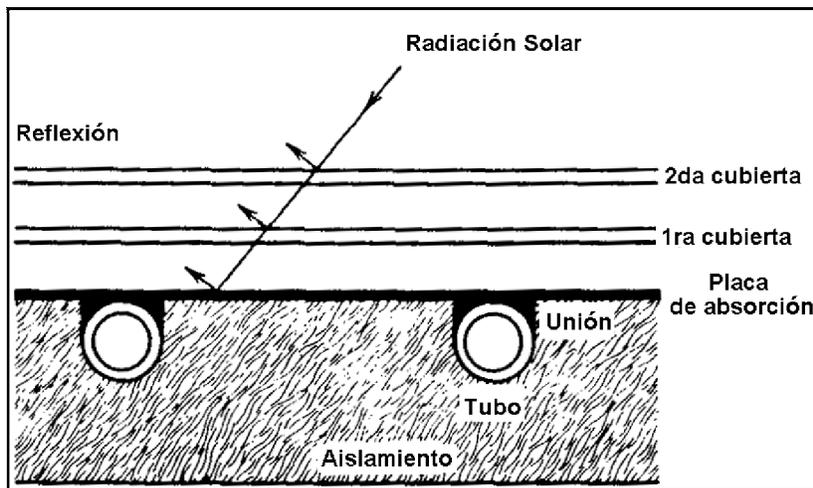


FIGURA 6-3 Cubiertas y tubería de un colector solar

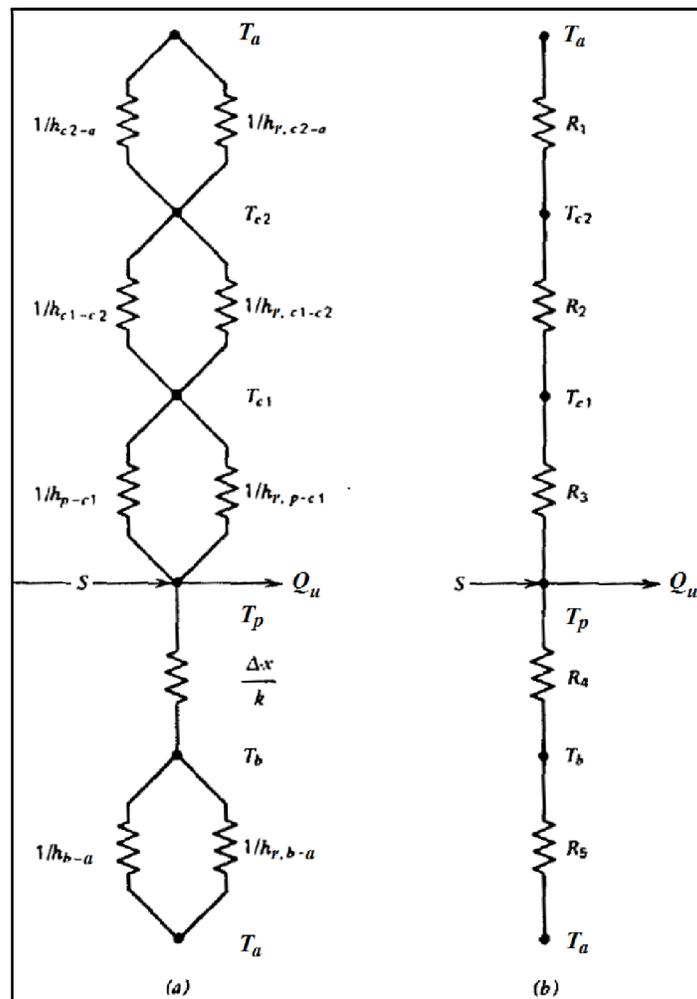


FIGURA 6-4 Circuito térmico de la figura 6-3 (a) en términos de resistencias convectivas, conductivas y radiativas (b) en términos de resistencias simplificadas

Donde de la figura 6-3 y 6-4:

- $h_{c,p-c1}$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa de absorción y la primera cubierta
- $h_{r,p-c1}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa de absorción y la primera cubierta.
- $h_{c,p-c1}$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa de absorción y la primera cubierta.
- h_{c1-c2} es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la 1ra cubierta y la 2da cubierta.
- $h_{r,c1-c2}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la 1ra cubierta y la 2da cubierta.
- h_{c2-a} es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la 2da cubierta y aire de los alrededores.
- $h_{r,c2-a}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la 2da cubierta y los alrededores.

El propósito es convertir el circuito térmico de la figura 6-4 al circuito de la figura 6-5, por lo que es necesario calcular U_L el cual es, en efecto, el coeficiente total de pérdidas de calor del colector.

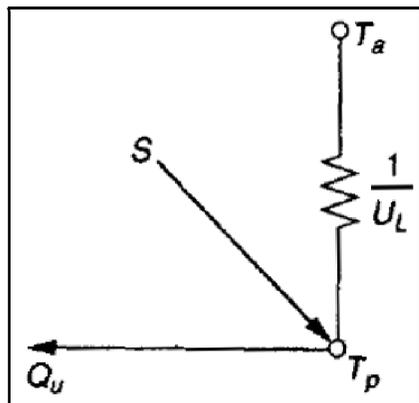


FIGURA 6-5 Circuito equivalente del colector solar

De la figura 6-4 (b) vemos que el circuito ha sido simplificado al sumar los pares de resistencias (convección y radiación) en paralelo, dándonos una sola resistencia equivalente para cada parte del colector (R_1 , R_2 y R_3) desde la placa de absorción hasta la 2da cubierta.

Tales resistencias constituyen únicamente el coeficiente de pérdidas por la parte frontal del colector U_f siendo:

$$U_f = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (8-8)$$

Se tiene disponible una ecuación empírica que facilita enormemente el cálculo de U_f :

$$U_f = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} - T_a) (T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591 N h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (8-9)$$

Donde

N = numero de cubiertas de vidrio

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$ para $0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$. para $70 \leq \beta \leq 90$, use $\beta = 70^\circ$

$$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$$

σ = Constante de Stefan-boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$)

β = inclinación del colector

ε_g = emitancia del vidrio (0.88)

ε_p = emitancia de la placa de absorción

T_a = temperatura ambiente (K)

T_{pm} = temperatura de la placa de absorción (K)

h_w = coeficiente de transferencia de calor del viento ($\text{W/m}^2 \times ^\circ\text{C}$)

Ejemplo 2-6

Determine el coeficiente de perdidas por la parte frontal U_f y el calor cedido al ambiente por unidad de área q_p , de un colector que cuenta con una cubierta de vidrio, y las siguientes especificaciones:

Emitancia de la placa de absorción	0.95
Temperatura de la placa de absorción	100°C
Temperatura ambiente	10 °C
Inclinación del colector	45°
Coeficiente de transferencia de calor del viento	10 W/m ² °C

De las definiciones de f , C y e de la ec. 8-9

$$f = (1 + 0.089(10) - 0.1166(10)(0.95))(1 + 0.07866) = 0.846$$

$$C = 520(1 - 0.000051(45)^2) = 0.466$$

$$e = 0.430(1 - 100/373) = 0.315$$

Utilizando la ec. 8-9:

$$U_f = \left[\frac{1}{\frac{0.466}{373} \left[\frac{373 - 283}{(1 + 0.846)} \right]^{0.315} + \frac{1}{10}} \right]^{-1} + \frac{5.67 \times 10^{-8} (373 - 283)(373^2 + 283^2)}{(0.95 + 0.00591 \times 10)^{-1} + \frac{2 + 0.846 - 1 + 0.133(0.95)}{0.88} - 1}$$

$$U_f = 2.98 + 3.65 = 6.6 \text{ W/m}^2 \times ^\circ\text{C}$$

Finalmente de la ec. 8-6 el calor desechado a la atmosfera es:

$$q_p = (6.6)(100 - 10) = 594 \text{ W/m}^2$$

En el problema anterior se incluye al coeficiente de transferencia de calor por convección del viento h_w , el cual incide en contra de los colectores, y fue calculado con la siguiente ecuación:

$$h_w = 2.8 + 3.0V \quad (9-0)$$

De donde V es la velocidad del viento de la localidad.

Las pérdidas de energía a través de la parte posterior del colector son representadas en la figura 6-4b mediante las resistencias R_4 y R_5 , siendo la resistencia del aislamiento y la resistencia de la lámina de acero del colector. Es una práctica usual considerar la resistencia R_5 igual a cero, dándose por lo tanto la única resistencia al flujo de calor por parte del aislamiento.

Por lo tanto se define U_b como el coeficiente de pérdidas de calor a través de la base del colector, el cual es:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (9-1)$$

Donde k y L son el coeficiente de conductividad térmica del aislante y su espesor, respectivamente.

También es recomendable estimar y tomar en cuenta las pérdidas que se dan a través de las paredes laterales y superiores del colector. Tales pérdidas deben estar referidas al área del colector, si el producto coeficiente total de pérdidas-área de los lados es $(UA)_e$, entonces el coeficiente de pérdidas por los lados del colector con referencia al área es:

$$U_e = \frac{(UA)_e}{A_c} \quad (9-2)$$

Finalmente el coeficiente total de pérdidas de calor del colector U_L será la suma de los coeficientes de pérdidas de calor del frente, la base y los lados del colector, esto es:

$$U_L = U_f + U_b + U_e \quad (9-3)$$

Ejemplo 2-7

Para el colector del problema 2-6, con un coeficiente frontal de pérdidas $U_f = 6.6 \text{ W/m}^2\text{°C}$, calcule el coeficiente de pérdidas total en base a las siguientes especificaciones:

Espesor del aislamiento

50mm

Conductividad del aislamiento	0.045 W/m°C
Altura del colector	2m
Ancho del colector	1m
Grosor del colector	75mm
Espesor del aislamiento en los costados de colector	25mm

De la ec. 9-1, el coeficiente de pérdidas a través de la parte posterior es:

$$U_b = \frac{0.045}{0.050} = 0.9 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

De la ec. 9-2, el coeficiente de pérdidas a través de los costados del colector es:

$$U_e = \frac{((0.045 / 0.025)(6)(0.075))_e}{2} = 0.405$$

Finalmente de la ec. 9-3 el coeficiente total de pérdidas del colector es:

$$U_L = 6.6 + 0.9 + 0.405 = 7.905 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

7.3 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA ENTRE TUBOS Y EL FACTOR DE EFICIENCIA DEL COLECTOR

La placa de absorción, como sabemos, es un arreglo de tubos paralelos unidos entre sí mediante una lámina metálica, ésta no es más que una extensión de la superficie del tubo, y tiene la finalidad de favorecer la transferencia de calor desde la placa de absorción hasta el fluido que atraviesa por dentro de los tubos. Dicha extensión en la superficie del tubo corresponde a una aleta, y bajo tales consideraciones se realizará su análisis.

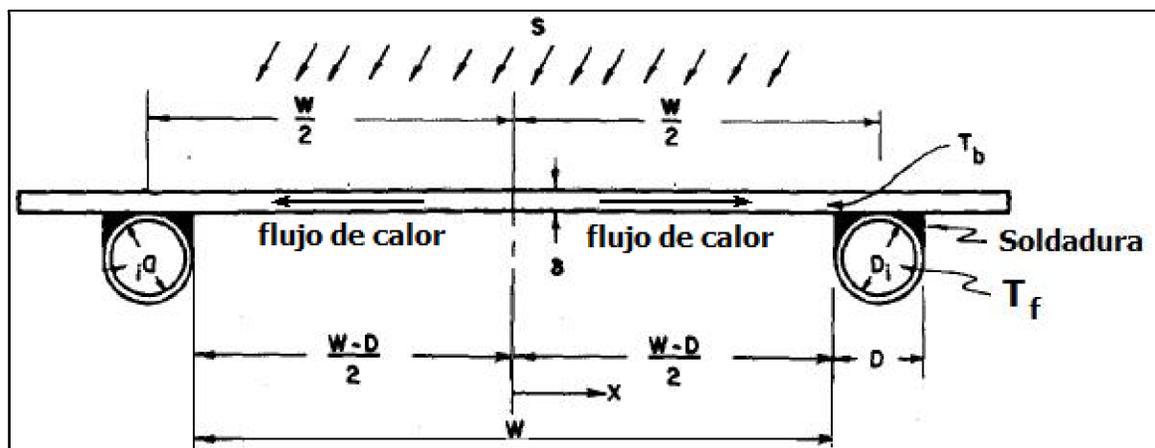


FIGURA 6-6 Dimensiones de placa y tubos

En la figura anterior la radiación absorbida por el colector S incide uniformemente sobre la aleta y es conducida hacia el tubo. Para poder conducir el calor a lo largo de la aleta, las temperaturas deben de aumentar a medida que

se incrementa la distancia hacia el tubo, ocurriendo la temperatura máxima en el punto intermedio entre dos tuberías.

La ecuación que establece la ganancia de calor útil del tubo y la aleta por unidad de longitud en la dirección del flujo del líquido es:

$$q'_u = [(W - D)F + D](S - U_L(T_b - T_a)) \quad (9-4)$$

Donde T_b es una la temperatura base de la placa del colector, F es la eficiencia de la aleta siendo:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (9-5)$$

$$\text{Siendo } m = \sqrt{U_L/k\delta} \quad (9-5a)$$

Sin embargo para la ecuación 9-4 es deseable eliminar T_b y obtener una expresión de la ganancia de calor útil en términos de dimensiones físicas conocidas, como lo es la temperatura del fluido de transferencia T_f de calor:

$$q'_u = WF'(S - U_L(T_f - T_a)) \quad (9-6)$$

Donde F' es factor de eficiencia del colector, siendo:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (9-7)$$

De donde C_b es la conductancia de la soldadura, la cual está en función de la conductividad de la soldadura k_b , el promedio del espesor y longitud de la soldadura b .

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (9-8)$$

Una interpretación física de F' es que para un punto en específico, representa el cociente de la ganancia actual de calor útil sobre la ganancia de calor útil si la superficie de la placa de absorción estuviese a la temperatura del fluido de entrada. Recordando que cuando lo anterior se cumple se minimizan las pérdidas energéticas del colector, puesto el calor ganado por el colector va siendo removido y absorbido por el fluido de transferencia de calor (agua) evitando así que la temperatura del colector se eleve a una temperatura mayor que la ambiente y existan pérdidas por transferencia de calor con los alrededores.

Ejemplo 2-8

Calcule el factor de eficiencia del colector para las siguientes especificaciones:

Coeficiente de pérdidas totales	8.0 W/m ² °C
Separación entre tubos	150 mm
Diámetro del tubo (interior)	10 mm
Espesor de lamina de la placa de absorción	0.5 mm
Conductividad termica de la placa (cobre)	385 W/m°C
Coeficiente de transferencia de calor al interior de los tubos	300 W/m°C

El factor de eficiencia de la aleta F , de la ec. 9-5 y 9-5a, es:

$$m = \left(\frac{8}{385 \cdot 5 \times 10^{-4}} \right)^{1/2} = 6.45$$
$$F = \frac{\tanh \left[\frac{6.45(0.15 - 0.01)}{2} \right]}{6.45(0.15 - 0.01)/2} = 0.937$$

El factor de eficiencia del colector F' se obtiene mediante la ec. 9-7:

$$F' = \frac{1/8}{0.15 \left[\frac{1}{8 \left[0.01 + (0.15 - 0.01)0.937 \right]} + \frac{1}{\pi(0.01)(300)} \right]} = 0.841$$

7.4 FACTOR DE REMOCIÓN DE CALOR Y FACTOR DE FLUJO DEL COLECTOR

Es conveniente definir una cantidad que relacione la ganancia real de calor útil de un colector con la ganancia de calor útil si el colector en conjunto estuviese a la temperatura del fluido de entrada. Esta cantidad es conocida como el factor de remoción de calor del colector F_R , y su ecuación es:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c \left[S - U_L(T_{fi} - T_a) \right]} \quad (9-9)$$

Donde T_{fi} y T_{fo} es la temperatura de entrada y salida del fluido de transferencia de calor respectivamente.

El factor de remoción de calor del colector F_R representa la efectividad de un intercambiador de calor convencional, el cual se define como la razón de la ganancia real de transferencia calor entre la ganancia máxima posible de calor transferible.

Expresando la ec. 9-9 en función del factor de eficiencia del colector:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (10-0)$$

Es conveniente definir el factor de flujo del colector como el cociente entre F_R y F' . Esto es:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (10-1)$$

Finalmente se deduce que el factor de remoción de calor F_R multiplicado por la cantidad máxima de calor útil recolectable es igual a la ganancia real de energía útil recolectada Q_u :

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (10-2)$$

Esta última es una ecuación extremadamente útil y se utiliza prácticamente en todos los tipos de colectores planos. Con ella, la energía útil recolectada es calculada en función de la temperatura de entrada del líquido de transferencia de calor al colector. El efecto del multiplicador F_R en la ecuación es la de reducir la ganancia de calor, de aquella que hubiese tenido si el colector entero hallarase a la temperatura de entrada del fluido de trabajo, con la cual actualmente se encuentra.

Ejemplo 2-9

Calcule la ganancia diaria de calor útil y la eficiencia de un arreglo de 10 colectores instalados en Boulder, Colorado; los colectores cuentan con una inclinación de 60° y están orientados al sur. La radiación horaria sobre el plano del colector \bar{i}_T , la radiación horaria absorbida por el colector \bar{s} y la temperatura horaria se encuentran tabuladas en la siguiente tabla:

TABLA 1-9 Datos horarios			
Hora	T_a C	I_T MJ/m ²	S MJ/m ²
7-8	-11	0.02	-
8-9	-8	0.43	0.35
9-10	-2	0.99	0.82
10-11	2	3.92	3.29
11-12	3	3.36	2.84
12-1	6	4.01	3.39
1-2	7	3.84	3.21
2-3	8	1.96	1.63
3-4	9	1.21	0.99
4-5	7	0.05	-
Suma		19.79	

Asumir que el coeficiente total de transferencia de calor U_L es de $8.0 \text{ W/m}^2 \text{ C}$ y el factor de eficiencia del colector de 0.841 (El del ejemplo anterior). El flujo másico en cada uno de los colectores de $2 \times 1 \text{ m}$ es de 0.03 Kg/s y la temperatura de entrada del líquido, se mantiene constante en 40°C .

De la ec. 10-1 el factor de flujo del colector es:

$$F'' = \frac{0.03 \times 4190}{2 \times 8 \times 0.841} \left[1 - \exp\left(\frac{2 \times 8 \times 0.841}{0.03 \times 4190}\right) \right] = 0.948$$

Y de por lo tanto el factor de remoción de calor es:

$$F_R = F' F'' = 0.841 \times 0.948 = 0.797$$

Las pérdidas en el horario de 10 a 11 A.M., basándose en la temperatura de entrada del líquido al colector de 40°, son:

$$U_L (T_i - T_a) = 8(40 - 2) \times 3600 = 1.09 \text{ MJ/m}^2$$

En la operación anterior se debió multiplicar el producto $U_L (T_i - T_a)$ por 3600 s/hr para obtener los valores numéricos del calor útil ganado en J/hr.

Utilizando la ec. 10-2 para obtener la ganancia de energía útil por unidad de área del colector:

$$q_u = \frac{Q_u}{A_c} = 0.797 [3.29 \times 10^6 - 1.09 \times 10^6] = 1.76 \text{ MJ/m}^2$$

El concepto de eficiencia se define como la razón entre la energía aprovechada, entre la disponible, siendo de la tabla 1-9 I_T la energía disponible del sol sobre el colector y S la energía aprovechada por el mismo, por lo tanto:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} = \frac{q_u}{I_T} = \frac{1.76}{3.92} = 0.45$$

7.5 EFICIENCIA DEL COLECTOR

La definición de la eficiencia instantánea, combinada con la ec. 10-2, es:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{F_R [G_T (\tau\alpha) - U_L (T_{fi} - T_a)]}{G_T}$$

Donde G_T es la irradiación total horizontal en W/m^2

En la ec. 10-3 podemos observar que $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$ son parámetros que nos describen como opera el colector. $F_R(\tau\alpha)$ nos indica cuanta energía es absorbida y $F_R U_L$ es un indicador de cuanta energía se pierde hacia los alrededores.

Otra ecuación igualmente válida para conocer la eficiencia instantánea del colector, es aquella que relaciona las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo del colector, así como la razón de flujo:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c G_T}$$

7.6 RECTA DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR

Si en la ecuación 10-3 consideramos constantes los valores de F_R y U_L , al representar el rendimiento obtendremos una recta.

Los valores de la ec. 10-3 se pueden expresar directamente en una gráfica de *eficiencia Vs punto de operación del colector*, o en otras palabras:

$$\eta_c \text{ Vs } \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T}$$

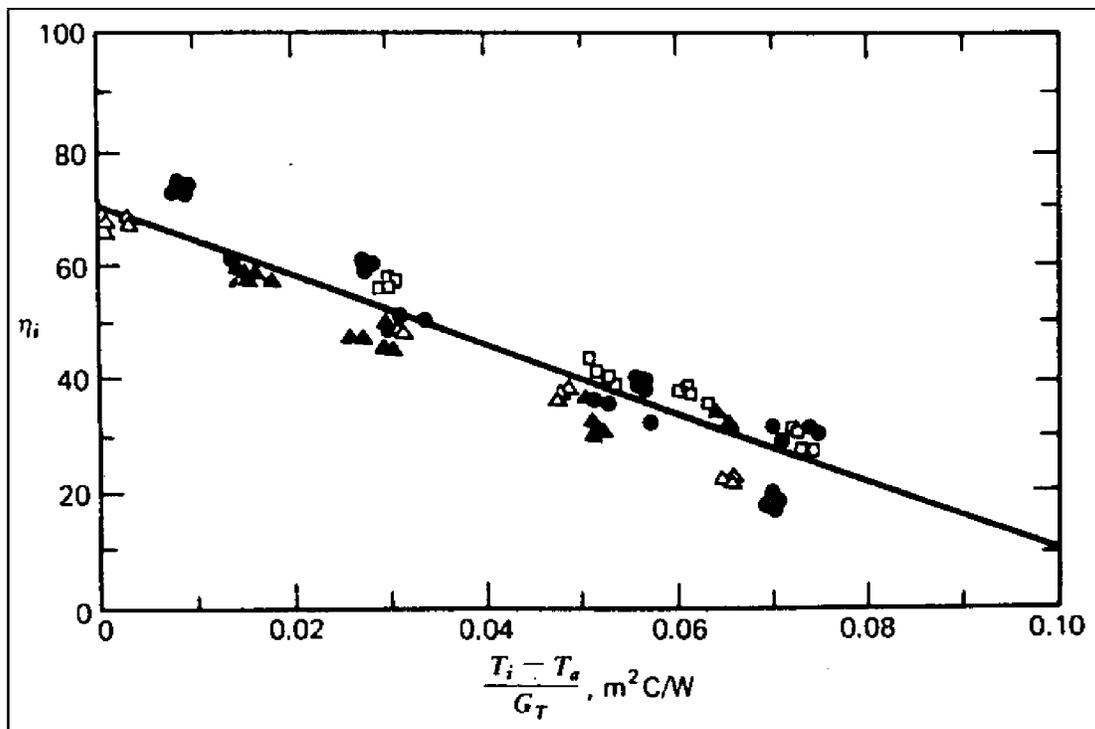


FIGURA 6-7 Recta de rendimientos trazada a partir de mediciones experimentales en un colector solar plano.

En la gráfica de la figura 6-7 la pendiente de la recta ($\tan \Phi$) coincide con el valor de $-F_R U_L$ y el punto en donde la recta intercepta al eje vertical (de las eficiencias) es igual a $F_R(\tau\alpha)$.

Por lo tanto, cuando una recta de eficiencia es dada, el desempeño del colector puede conocerse con tan solo pocos parámetros fáciles de obtener, como lo son la temperatura del agua a la entrada del colector, temperatura ambiente y la irradiación horizontal total de la localidad.

Ejemplo 3-0

Un colector solar plano con un área de 4.10m² fue sometido a pruebas de eficiencia arrojando los siguientes resultados:

Q_u	G_T	T_i	T_a
9.05 MJ/hr	864 W/m ²	18.2 C	10.0 C
1.98	894	84.1	10.0

Calcule los productos $F_R(T_a)$ y $F_R U_L$ para dicho colector

Para el primer grupo de resultados:

$$\eta_c = \frac{9.05 \times 10^6}{864 \times 4.10 \times 3600} = 0.71$$

y

$$\frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} = \frac{18.2 - 10}{864} = 0.0095 \text{ m}^2\text{C/W}$$

Para el segundo grupo de resultados, $\eta = 0.15$ y $(T_{fi} - T_a)/G_T = 0.083 \text{ m}^2\text{C/W}$. Graficando estos dos puntos tenemos:

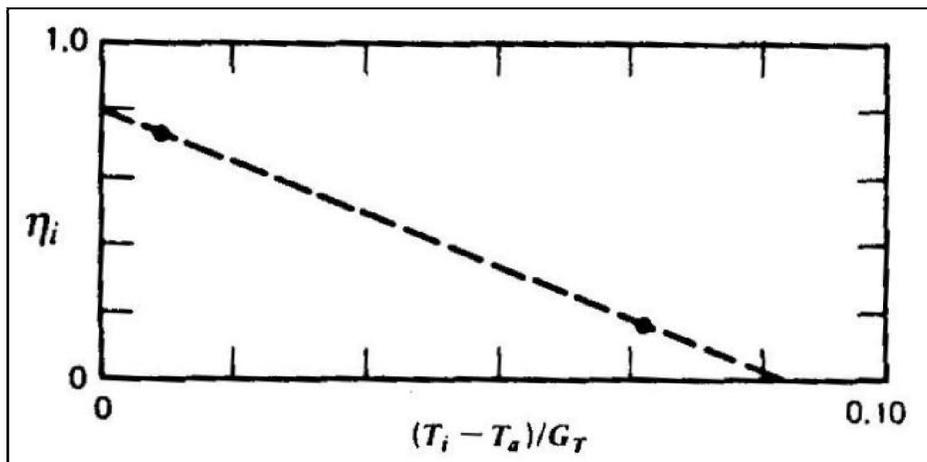


FIGURA 6-8 Gráfica de una recta de rendimientos trazada a partir de 2 mediciones experimentales en un colector solar plano.

La pendiente es: $\frac{0.71 - 0.15}{0.0095 - 0.083} = -7.62 \text{ W/m}^2\text{C}$

Finalmente $F_R U_L = -\text{pendiente} = 7.62 \text{ W/m}^2\text{C}$. La intercepción de la recta sobre eje de la eficiencia se da a 0.78, el cual es igual a $F_R(\tau\alpha)$.

7.7 TEMPERATURAS PROMEDIO DEL FLUIDO Y PLACA DE ABSORCIÓN

Para evaluar el funcionamiento del colector, es necesario conocer el coeficiente total de pérdidas de calor, y los coeficientes internos de transferencia de calor. Sin embargo tanto U_L y h_{fi} son en cierto grado funciones de la temperatura. La temperatura promedio del fluido al interior de los tubos del colector puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (10-3)$$

El resultado que arroja la ecuación anterior nos proporciona un valor aceptable para con él analizar las propiedades del fluido.

La temperatura promedio de la placa de absorción siempre será mayor que la temperatura promedio del fluido debido a la resistencia de transferencia de calor entre la superficie absorbedora y el fluido. Esta diferencia de temperatura es usualmente pequeña para colectores cuyo fluido de transferencia de calor es un líquido.

La temperatura promedio de la placa de absorción puede ser usada para calcular la ganancia útil de calor del colector

$$Q_u = A_c \left[S - U_L (T_{pm} - T_a) \right] \quad (10-4)$$

Si igualamos la ec. 10-4 con la ec. 10-2 y despejamos T_{pm} , obtendremos:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (10-5)$$

8.- APLICACIONES



8.1 INTRODUCCIÓN

Hasta ahora, en todos los capítulos anteriores, habíase tratado con conceptos y leyes que determinaban la operación de los procesos y sistemas de captación solar. Por lo que ahora damos pie a la discusión de la amplia gama de aplicaciones posibles con el uso de la energía solar, siendo las más destacables aquellas destinadas al calentamiento de edificios, suministro de agua caliente, refrigeración, entre otras.

8.2 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Los elementos básicos de los calentadores solares de agua, pueden ser presentarse en diferentes configuraciones. Las más comunes de estas son las mostradas en la figura 6-9. La energía auxiliar adicionada es mostrada en tres diferentes formas; estas son intercambiables entre los cuatro métodos de transferencia de calor del colector al tanque de almacenamiento.

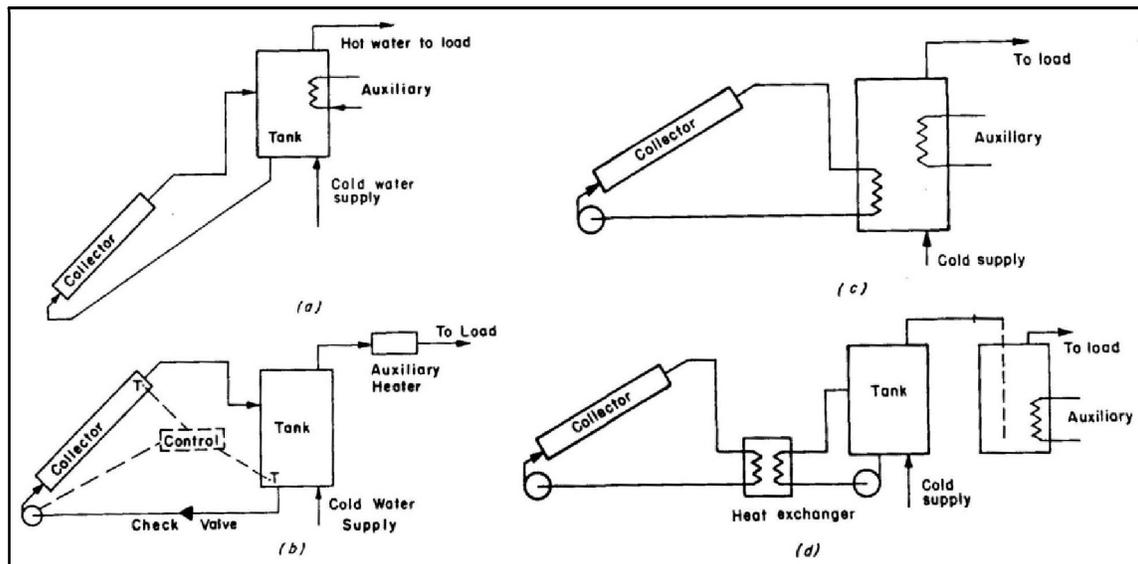


FIGURA 6-9 Esquemas de configuración de calentadores solares a) Sistema de circulación natural b) Sistema de circulación forzada de un tanque c) Sistema cerrado con anticongelante e intercambiador de calor interno d) Sistema cerrado con anticongelante e intercambiador de calor externo.

Un calentador de agua pasivo (sistema de circulación natural) es mostrado en la figura 6-9(a). El tanque de almacenamiento está localizado por encima del colector, y el agua circula por convección natural cada vez que la energía del sol provee energía al agua en el colector y establece una diferencia de densidades (ver pág. 47). Un dispositivo de energía auxiliar es mostrado dentro del tanque de almacenamiento, en la parte superior, para mantener siempre caliente el agua de suministro.

En climas donde son frecuentes temperaturas de congelamiento (0°C), el diseño anterior se modifica dando lugar a colectores que usan fluidos anticongelantes en su interior, estos son los mostrados en las figuras 6-9 (c) y (d).

El intercambiador de calor del colector puede ser interno o externo al tanque de almacenamiento. En la figura 6-9(c) la energía auxiliar se muestra adicionada al tanque mediante otro intercambiador de calor. El suministro de energía auxiliar puede estar provisto por resistencia eléctrica, o combustibles fósiles. En el caso de la figura 6-9(d) se muestra un sistema de dos tanques, en cuyo caso el segundo representa aquel que utiliza un calentador estándar.

8.2.1 CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN DOMESTICA

A continuación mostramos un caso de aplicación para calentamiento de agua caliente sanitaria en una zona residencial, cortesía de la familia Aceves Bernal y del investigador del instituto politécnico nacional M. en C. Francisco J. Aceves Hernández (figura 7-0).

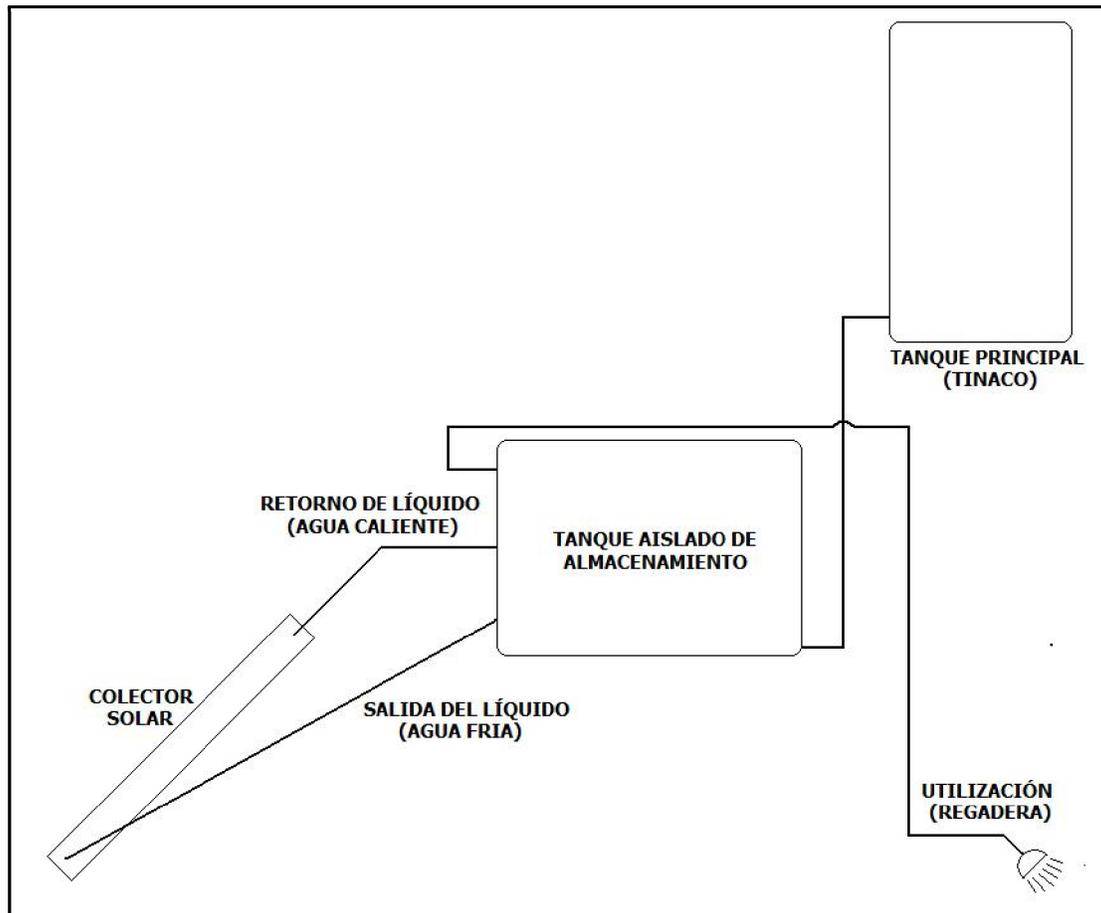


FIGURA 7-0 Diagrama básico de la instalación una instalación domestica residencial. Cortesía de la familia Aceves Bernal.

Tanque aislado de almacenamiento:

En la figura 7-1 se muestra el tanque aislado representado en el diagrama 7-0, el cual tiene una capacidad de 300 litros y da servicio durante todo el año la familia Aceves Bernal que consta de 6 miembros (únicamente regaderas). En la figura 7-2 podemos apreciar las temperaturas de operación del conjunto solar siendo de 47°C aquella que se dirige a las regaderas y 25°C la de retorno del colector.



FIGURA 7-1 Tanque aislado de almacenamiento. Volumen igual a 300 Litros. Cortesía de la familia Aceves Bernal



FIGURA 7-2 Temperaturas del estrato superior (izquierda) y estrato inferior del tanque de almacenamiento (derecha).

Colectores solares:



FIGURA 7-3 Colectores solares planos. Cortesía de la familia Aceves Bernal.

Sistema de energía auxiliar:



FIGURA 7-4 Tanque con resistencia eléctrica. Cortesía de la familia Aceves Bernal.

En la figura 7-4 se muestra un tanque en cuyo interior se encuentra una resistencia eléctrica. No se hizo mención de este aditamento en el diagrama de la

figura 7-0, dado que en la instalación real de la familia Aceves, se tiene instalado de forma independiente al sistema de calentamiento solar. Sin embargo de no ser independiente el diagrama luciría de la siguiente manera:

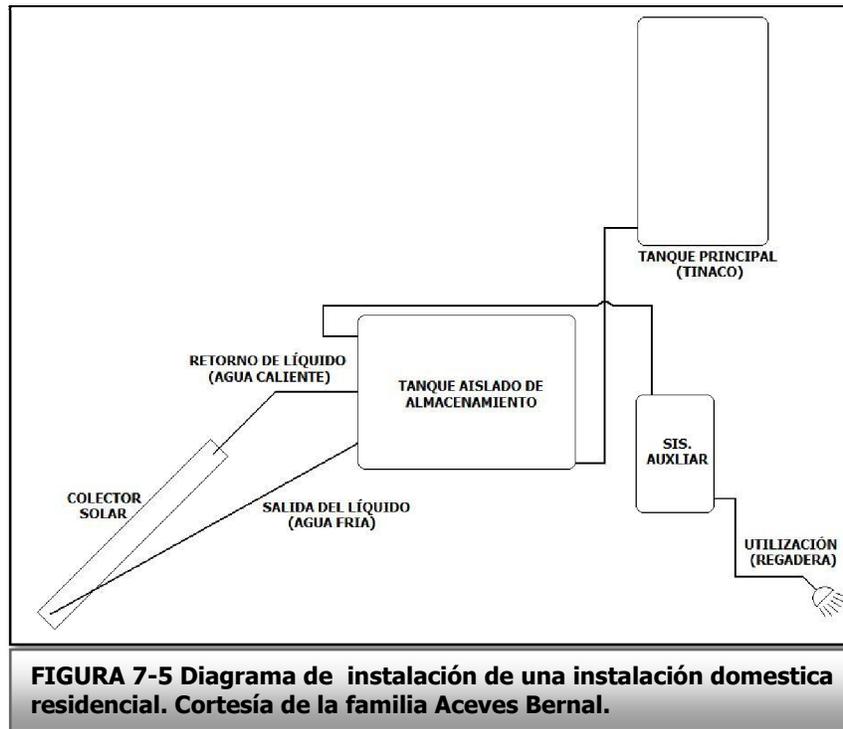


FIGURA 7-5 Diagrama de instalación de una instalación doméstica residencial. Cortesía de la familia Aceves Bernal.

Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento se pueden tomar en cuenta los siguientes criterios de consumo:

Los valores orientativos para consumo de ACS a una temperatura de 45 °C son:

- bajo: 40 lt. por persona y día
- medio: 50 lt. por persona y día (el valor habitual)
- alto: 75 lt. por persona y día

La regla general dice que el volumen del acumulador deberá ser, como mínimo, el doble del consumo diario.

8.2.2 CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN DEPORTIVO-RECREATIVA

El segundo caso práctico que encontramos durante la realización de esta tesis, fue en el estado de Puebla, en las instalaciones de la Universidad de las Américas (UDLA), ubicada en el municipio de Cholula. En donde se mantiene climatizada una alberca semiolímpica, caracterizada por encontrarse al aire libre con 620 mil litros de volumen, y a una temperatura promedio anual de 24°C. A continuación mostramos algunas imágenes cortesía de la UDLA.



FIGURA 7-6 Instalaciones deportivas. Cortesía UDLA

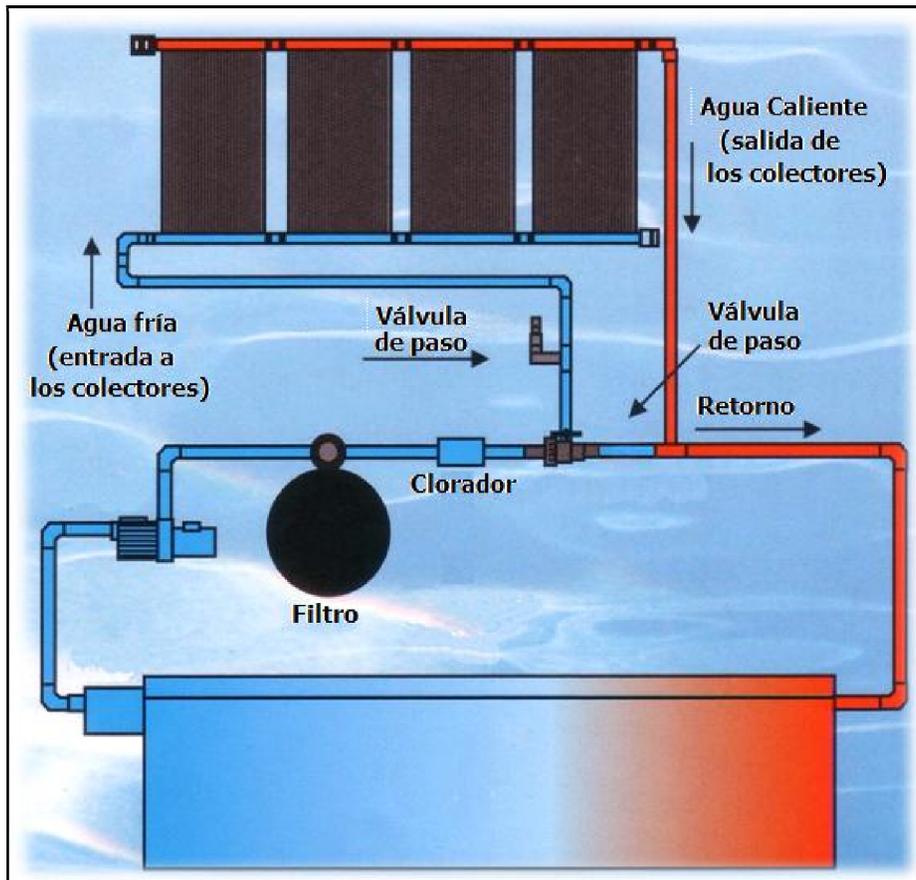


FIGURA 7-7 Diagrama de operación de la instalación solar de la alberca.

En la figura 7-7 vemos el diagrama de operación para el caso, en general, de la climatización de piscinas. En donde al ser bombeada el agua fría (en color azul) pasa a través del filtro y clorador llegando a la primera válvula de paso la cual una vez abierta deja pasar el líquido hacia 2 distintas tuberías, la primera que dirige parte del caudal (20%) hacia los colectores; y el resto se dirige nuevamente hacia la alberca.

El caudal que es dirigido hacia los colectores pasa una segunda válvula de paso la cual debe ser cerrada, es decir no bombear líquido hacia los colectores, durante las horas que no haya la suficiente irradiación (de noche o días muy nublados) pues se estaría perdiendo calor de la alberca hacia los alrededores en lugar de ganar. Una vez que el líquido pasa a través de los colectores es calentado (de 2 a 4°C por colector) y regresa a través de la tubería de retorno a la alberca. En la imagen de la figura 7-8 se aprecia la temperatura del retorno de los colectores a la alberca.



FIGURA 7-8. Temperatura de retorno de los colectores hacia la alberca. Cortesía UDLA.

8.3 REFRIGERACIÓN SOLAR POR ABSORCIÓN

En las máquinas de absorción, en lugar de un solo refrigerante, hay dos fluidos: el refrigerante y el absorbente. Los fluidos más usados son el amoníaco-agua y el agua-bromuro de litio. El funcionamiento de la máquina frigorífica por absorción es el siguiente:

En el generador se aporta alta temperatura mediante un foco calorífico, en el que se hace hervir la mezcla de amoníaco y agua. Debido a que el amoníaco es más volátil que el agua, éste se elimina en forma de vapor, mientras que el agua líquida permanece en el generador (figura 7-9).

El vapor de amoníaco a alta presión pasa a un condensador (foco caliente) donde libera calor, enfriándose y haciéndose líquido; este amoníaco líquido atraviesa una válvula reductora de presión, reduciendo bruscamente su temperatura y evaporándose cierto porcentaje, una vez dentro del evaporador al absorber calor del foco frío habrá de evaporarse completamente. Este vapor de amoníaco a baja presión pasa al absorbente, que es un recipiente en cual se mezcla con el agua procedente del generador. En el absorbente, se juntan otra vez el amoníaco y el agua formando una solución amoniacal.

Esta solución amoniacal se bombea de nuevo al generador para repetir el ciclo. En este bombeo, la presión aumenta hasta el valor de la presión del generador.

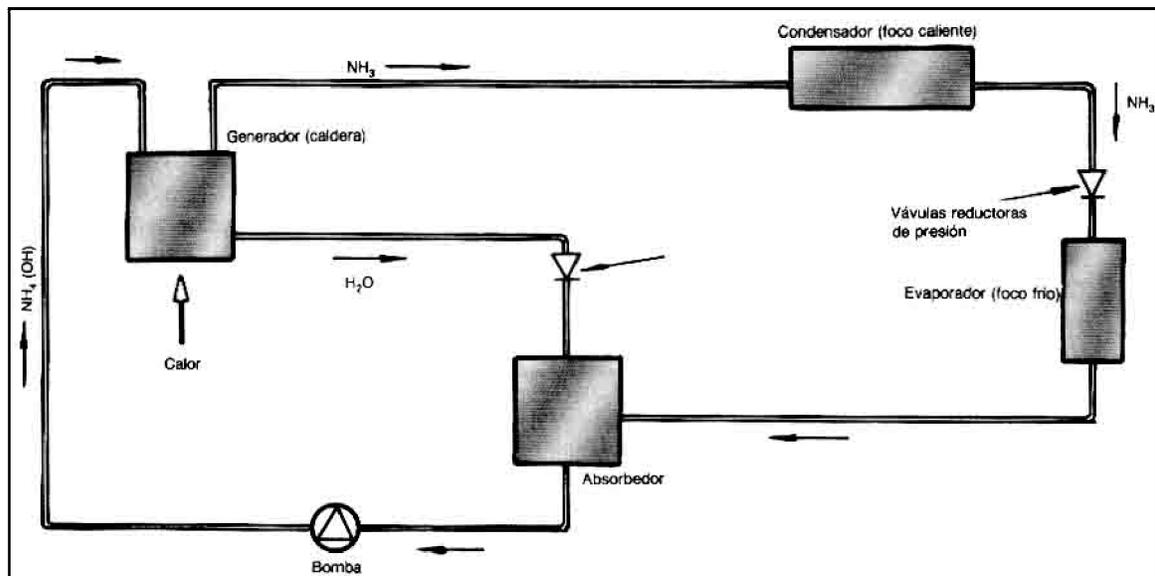


FIGURA 7-9. Ciclo de refrigeración por absorción

Por lo anterior para la aplicación del ciclo anterior se requiere la aplicación de una fuente de calor a alta temperatura en el generador; por lo que dicho calor bien puede ser suministrado por colectores solares.

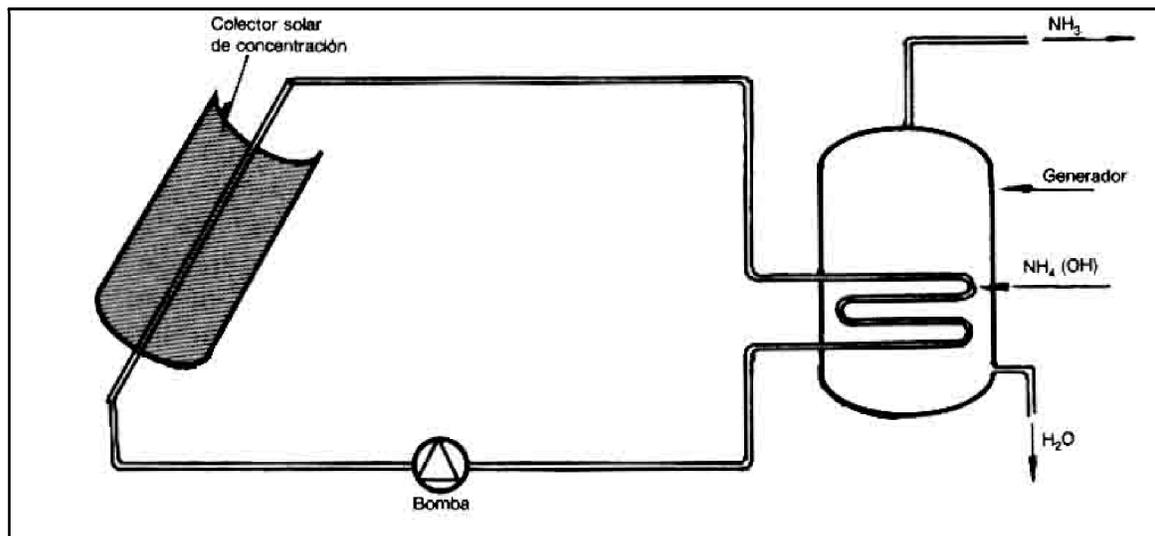


FIGURA 8-0. Ciclo de refrigeración por absorción con concentrador solar

Estas altas temperaturas (120°, como mínimo) en generador hacen que tales sistemas precisen colectores de concentración (capaces de proveer hasta 400°C), puesto que los planos son incapaces de conseguirlas o bien lo hacen con un rendimiento muy bajo (figura 8-0).

8.4 OTRAS APLICACIONES

A continuación se muestran de manera breve las aplicaciones en donde empieza a ser común encontrarse colectores solares.

Piscicultura:

Objetivo.- Mantener la temperatura del agua a la óptima necesaria para el crecimiento y reproducción de la especie de pez que se esté criando (figura 8-1).

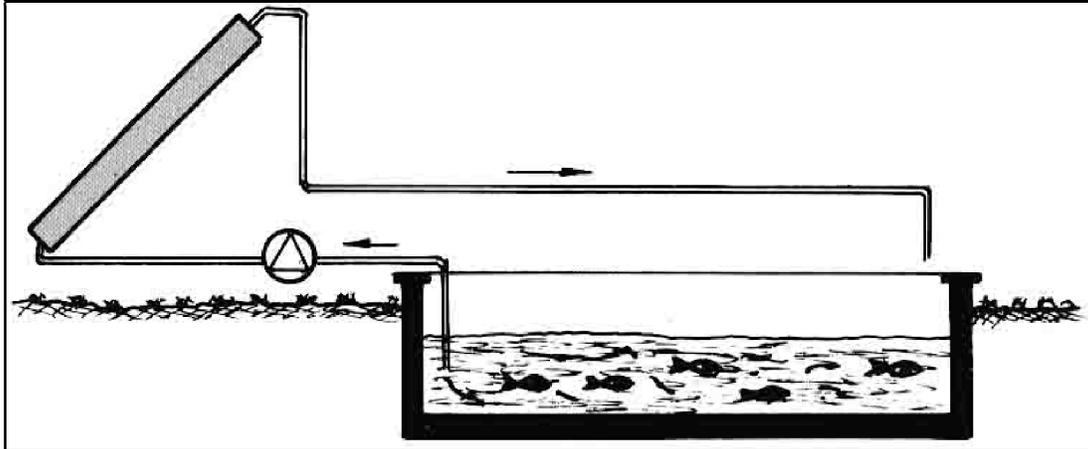


FIGURA 8-1. Colector solar plano aplicado a la cría de peces en cautiverio

Desalinización de agua de mar:

Objetivo.- Separar el contenido de sal del agua marina mediante la evaporación de esta última (figura 8-2).

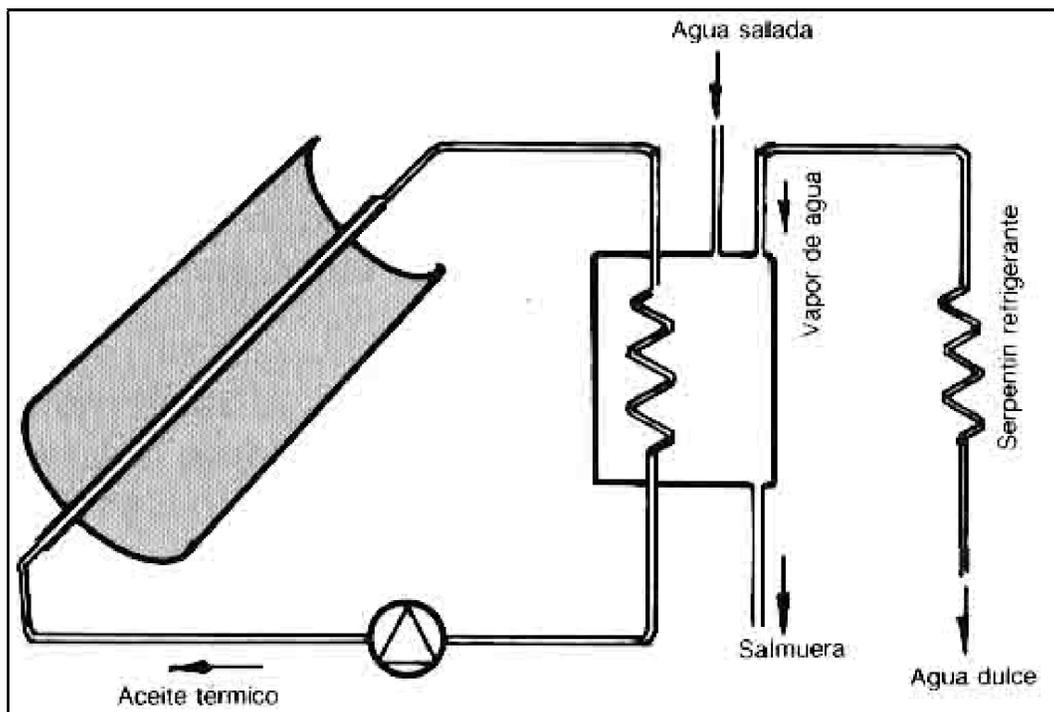


FIGURA 8-1. Desalinización de agua de mar

Generación de energía eléctrica:

Objetivo.- Generación de energía eléctrica a través del ciclo una de turbina de vapor.

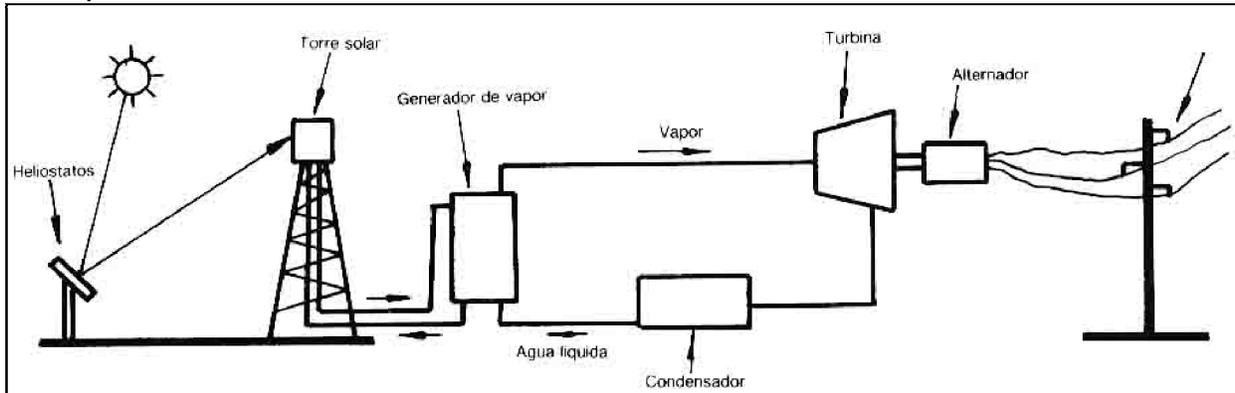


FIGURA 8-1. Generación de energía eléctrica usando una turbina de vapor

8.5 CONSIDERACIONES Y FACTORES PRÁCTICOS EN EL DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.

Lo básico a considerar y calcular para el diseño de un colector solar es:

- Radiación total horaria sobre la superficie del colector (Cap. 3, pag. 35)
- Coeficiente total de pérdidas de calor (Cap. 9, pag. 79)

Donde finalmente se obtendrá la **Ganancia real de energía útil recolectada** en función de las horas del día, recordando que por las características de la energía solar y su vulnerabilidad a los cambios de ésta a lo largo de un día, donde es preferible indicar los puntos anteriores en periodos por horas.

Consideraciones y factores prácticos en el diseño de un colector solar plano.- Existen muchas consideraciones prácticas en el diseño, manufactura, transporte, instalación y uso de los colectores solares planos. En esta sección describiremos brevemente algunas de estas consideraciones.

Las temperaturas máximas a las que puede llegar el colector durante periodos de alta irradiación en los cuales, por cualquier circunstancia, no se tenga un flujo de fluido a través del colector deben ser consideradas. El colector y sus materiales deben ser diseñados para soportar dichas temperaturas, pues es inevitable que en algún momento, por alguna falla eléctrica, problemas de control, servicio, o alguna otra causa, los colectores queden en condiciones de flujo nulo. La temperatura máxima de la placa de absorción puede ser estimada con la ecuación 10-4 con Q_u igual a cero.

Otro punto crucial a considerar son las cubiertas y las placas de absorción, pues sus propiedades definen $(\tau\alpha)$ y ρ respectivamente, y esto afecta directamente la operación térmica del colector. La degradación de alguna de estas propiedades afecta seriamente al colector, por lo que los materiales deben ser seleccionados

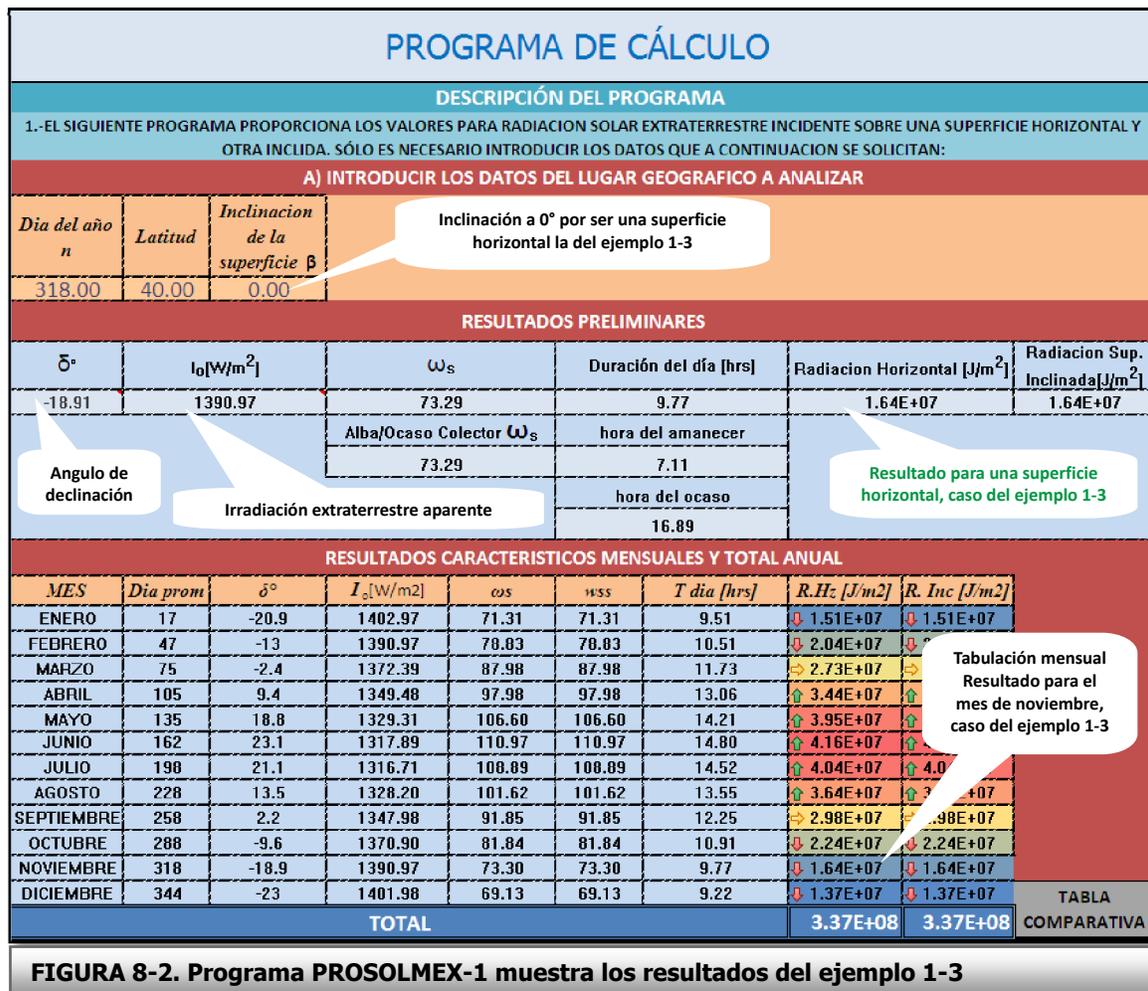
con propiedades estables a lo largo del tiempo. La condensación es otro problema que amenudeo ocurre por debajo de la cubierta, aumentando la reflejancia del vidrio, por lo que es necesario energía para evaporar el condensado durante el arranque de operación de los colectores haciendo que eficiencia disminuya. Por tal motivo es recomendable sellar lo mejor posible los espacios y aristas cercanas a la cubierta y en general en todo el colector.

8.6 PROSOLMEX 1

Con la finalidad de hacer más dinámicos y comprensibles los temas abordados durante el presente trabajo, realice un programa de hoja de cálculo bajo la interface gráfica de Microsoft Excel, en donde con tan sólo ingresar los datos solicitados es posible conocer y graficar los parámetros más representativos de, por ejemplo, el recurso solar aprovechable para cualquier ciudad dentro de la república mexicana, Estados Unidos y Canadá.

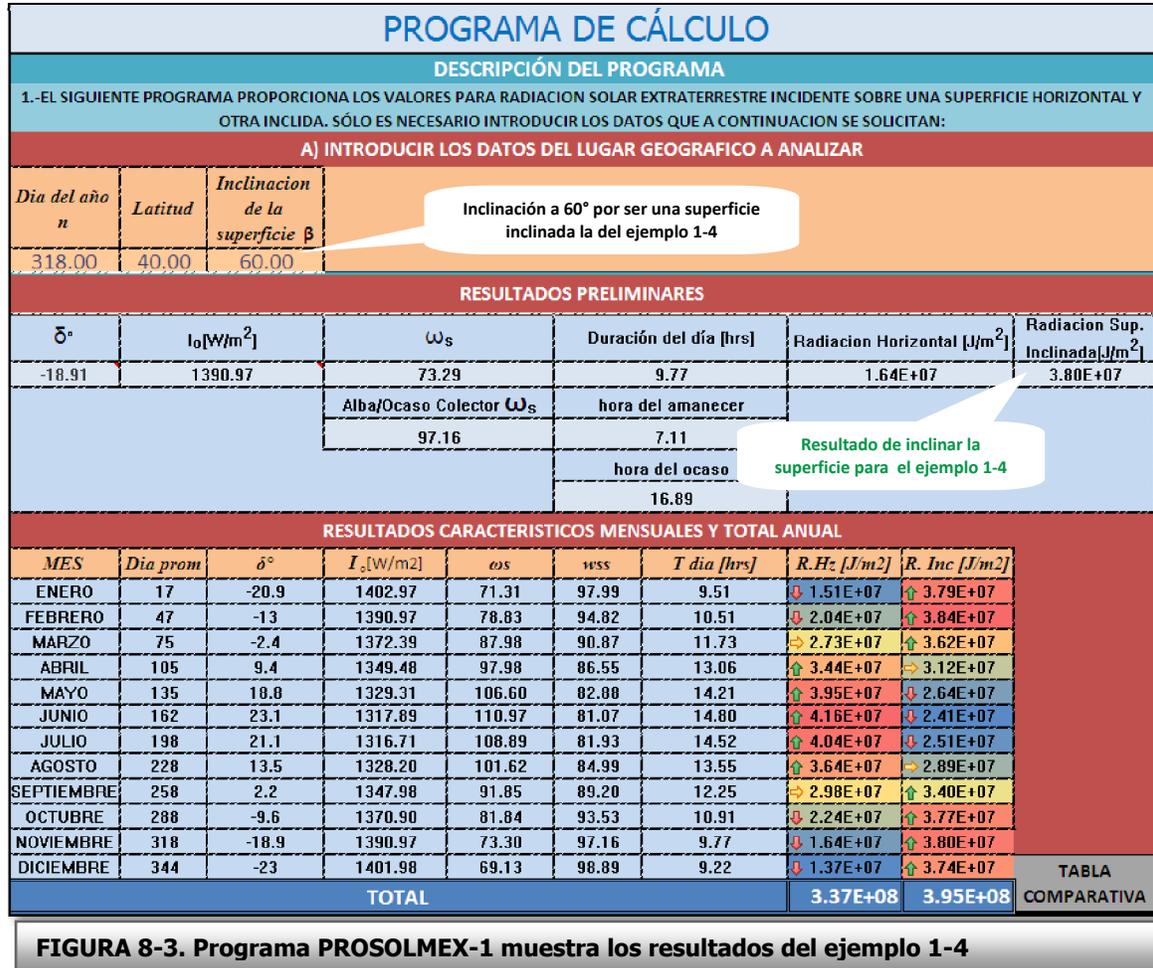
Realización del ejemplo 1-3 con PROSOLMEX-1

Para una latitud de 40°N durante el mes de noviembre encontrar el promedio diario mensual de irradiación extraterrestre en una superficie horizontal.



Realización del ejemplo 1-4 con PROSOLMEX-1

Para el ejemplo 1-3 supóngase ahora una inclinación de la superficie de 60° por arriba de la horizontal. Calcule el promedio diario durante el mismo mes de irradiación extraterrestre sobre dicha superficie.



Realización del ejemplo 1-5 y 1-6 con PROSOLMEX 1

Ejemplo 1-5

Considérese un colector plano de 0.8m de ancho por 1.2m de largo, con una inclinación de 35° sobre la horizontal y orientado hacia el sur. El colector será instalado en la ciudad de Monterrey que se encuentra a una latitud de 25°N.

Calcule el promedio diario-mensual de radiación difusa incidente durante el mes de enero.

Ejemplo 1-6

Para el ejercicio 1-5 calcule el total de radiación incidente sobre el plano del colector I_T .

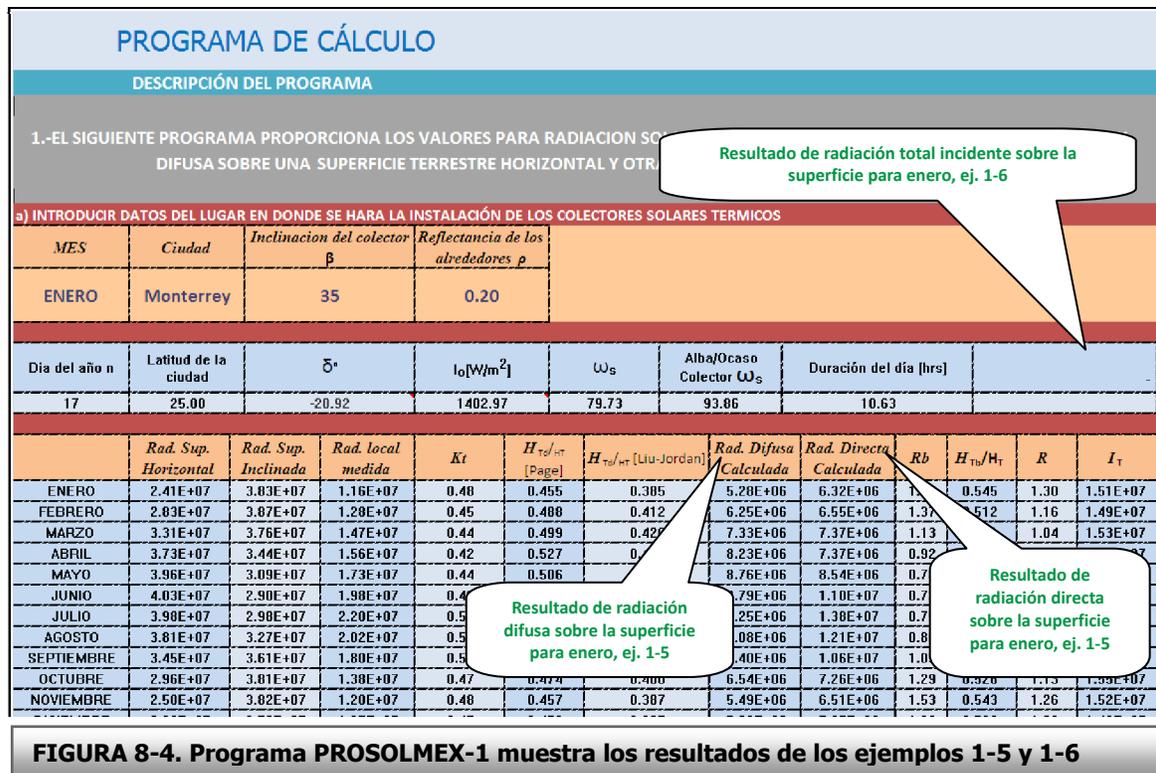


FIGURA 8-4. Programa PROSOLMEX-1 muestra los resultados de los ejemplos 1-5 y 1-6

Prosolmex-1 realiza, en cada una de las pestañas del programa Excel, cálculos individuales en donde se van plasmando los datos más representativos en cuanto al recurso solar disponible, ya sean estos por horas del día, por día o en valores mensuales y anuales; y se llega hasta el cálculo final de la cantidad de radiación absorbida por un colector solar tomando en cuenta el tipo y número de cubiertas de cristal (u otro material) y espesores de estas, su inclinación, su geolocalización, su orientación, el mes y/o día del año en consideración; los resultados del monto de radiación absorbida por el colector pueden ser obtenidos para una hora del día en especial o bien en un promedio diario y/o mensual. Todo esto con la finalidad de saber cuánta energía se obtendría por cada colector instalado, y sobre todo saber cuáles son los parámetros, cuya modificación involucraría mejoras notables sobre la cantidad de radiación absorbida.

Ejemplo de aplicación:

En el caso particular de un día típico del mes de agosto de las 12:00 a las 13:00 hrs, un colector instalado sobre la ciudad de México con una inclinación de 30° sobre la horizontal al suelo, orientado 15 grados hacia el oeste. Dicho colector tiene una sola cubierta de cristal de calidad estándar de 6mm de espesor, y la placa de lámina de cobre pintada con pintura negra de estándar con lo que en conjunto tendrían una absorbancia de la radiación incidente de 0.9.

¿Cuál es la cantidad de energía absorbida por el colector por metro cuadrado?

PROSOLMEX-1							
EN ESTA SECCION EL PROGRAMA CALCULA LA CANTIDAD DE RADIACION SOLAR ABSORBIDA POR EL COLECTOR							
A) INTRODUZCA LOS VALORES QUE ACONTINUACION SE SOLICITAN							
Ciudad	MES	Latitud	Inclinación del colector	Orientación del colector	Hora Solar	N cubiertas	Espesor del vidrio (m)
Ciudad de México	AGOSTO	19.32	30.0	15.0	12-13 hr	1	0.0060
Ind. De refracción de vidrio	Coefficiente K	Reflejancia de los alrededores	Absorbancia de la placa absorbidora				
1.526	32.0	0.5	0.90				
RESULTADOS PRELIMINARES							
Día promedio del mes	δ°	I_z [W/m ²]	Radiación Global Mensual Local [J/m ²]	Radiación Difusa Mensual Local [J/m ²]	ω_z	ω_{SS}	Duración del día [hrs]
228	13.45	1328.20	1.79E+07	8.21E+06	94.811	87.41	12.64
RESULTADOS FINALES							
RADIACION DISPONIBLE SOBRE EL COLECTOR				RADIACION ABSORBIDA POR EL COLECTOR			
Radiación directa [J/m ²]	Radiación difusa [J/m ²]	Radiación reflejada [J/m ²]	Total [J/m ²]	Radiación directa [J/m ²]	Radiación difusa [J/m ²]	Radiación reflejada [J/m ²]	Total [J/m ²]
8.07E+05	1.43E+06	8.03E+04	2.32E+06	5.48E+05	8.50E+05	2.66E+04	1.42E+06

FIGURA 8-5. Programa PROSOLMEX-1 muestra los resultados de radiación total disponible y absorbida por el colector

Prosolmex-1 despliega dos series de resultados (en verde y rojo), siendo el primero aquel que muestra la cantidad de radiación máxima que el colector solar podría ser capaz de absorber (radiación disponible sobre el colector). Se muestran las cantidades de energía aportada por cada componente de la radiación incidente (directo, difuso y reflejado), así como también la sumatoria total de las tres componentes. La radiación disponible sobre el colector durante esa hora (12:00-13:00) es de 2.32MJ/m² lo que en términos más representativos es la energía suficiente para aumentar idealmente 55° Celsius la temperatura de un volumen de 10 litros de agua por metro cuadrado de colector. Sin embargo la cantidad real de energía absorbida por el colector es tan sólo el 60% del total disponible, es decir 1.42MJ/m² con lo que el volumen anterior de 10 litros subiría su temperatura 33° por metro cuadrado de colector.⁹

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE PROSOLMEX-1

Para demostrar la validez de los valores obtenidos a través de PROSOLMEX-1, hice una comparación de este programa con otro software de distribución libre "RETscreen International", creado por el Ministerio de Recursos Naturales del gobierno de Canadá en colaboración con la "Administración Nacional de aeronáutica y del Espacio" (N.A.S.A.), entre otras organizaciones especializadas en lo que a recursos renovables respecta (figura 8-6). RETscreen International es un programa encaminado al desarrollo de proyectos en energía renovable, por lo que abarca una amplia gama de aplicaciones en temas diversos como es la energía eólica, mini hidráulica, energía solar térmica y fotovoltaica, energía de las mareas y de las olas, sistemas de biomasa, geotérmica, entre otras.

⁹ Se considera que el colector transmite el 100% de la energía absorbida al fluido de trabajo, es decir $\eta_c = 1$



FIGURA 8-6. Software para el estudio de energías renovables RETScreen Internacional

UTILIZANDO “RETSREEN INTERNATIONAL”

RETScreen es capaz de calcular la cantidad de radiación solar diaria total incidente I_T sobre una superficie inclinada en la ciudad de México.

Información del proyecto [Ver la base de datos del proyecto](#)

Nombre del Proyecto: Climatización alberca ESIME CULHUACAN
 Ubicación del Proyecto: MEXICO D.F.

Preparado para: IPN
 Preparado por: KISEV SALGADO CASTRO

Tipo de proyecto: Generación de calor
 Tecnología: Calentador solar de agua
 Tipo de análisis: Método 1
 Poder calorífico de referencia: Poder Calorífico Inferior (PCI)
 Mostrar parámetros:
 Idioma: Spanish - Español
 Manual de usuario: English - Anglais
 Moneda: México
 Unidades: Unidades métricas

Condiciones de referencia del sitio [Seleccionar ubicación de datos meteorológicos](#)

Ubicación de datos meteorológicos: Mexico City/Juarez
 Mostrar datos:

	Unidad	Ubicación de datos meteorológicos	Ubicación del Proyecto
Latitud	°N	19.4	19.4
Longitud	°E	-99.1	-99.1
Elevación	m	2,234	2,234
Temperatura de diseño de la calefacción	°C	5.8	
Temperatura de diseño del aire acondicionado	°C	27.9	
Amplitud de la temperatura del suelo	°C	17.3	

**FIGURA 8-7
Proyecto ESIME
México D.F.**

En la figura 8-7 vemos la parte introductoria al software en cuestión, en donde se ingresan los datos principales del proyecto, como la ubicación.

RETScreen cuenta con una amplia base de datos, con los valores locales irradiación total diaria-mensual horizontal de una gran cantidad de ciudades alrededor del globo terráqueo.

En la segunda parte del programa se definen las características principales de la instalación, como de tratarse de una alberca, los metros cuadrados de superficie de la misma, la temperatura deseada, alberca techada o al aire libre, uso de cubierta térmica, porcentaje del uso de la alberca por mes, entre otras.

Modelo de Energía RETScreen - Proyecto de calefacción

Proyecto de calefacción		Calefaccionador solar de agua	
Tecnología	Calefaccionador solar de agua		
Características de la carga	<input checked="" type="radio"/> Piscina <input type="radio"/> Agua caliente		
Aplicación			
	Unidad	Caso base	Caso propuesto
Tipo		Exterior	
Área	m ²	300.0	300.0
Uso de cubierta	h/d	14.0	14.0
Temperatura	°C	25.0	25.0
Agua de reemplazo	%/sem	10%	20%
Protección contra vientos - temporada de uso	%	15%	15%
Sombreado solar - temporada de uso	%	25%	25%
<input checked="" type="checkbox"/> Porcentaje del mes usado	Mes		
	Enero	50%	50%
	Febrero	100%	100%
	Marzo	100%	100%
	Abril	100%	100%
	Mayo	100%	100%
	Junio	100%	100%
	Julio	0%	0%
	Agosto	50%	50%
	Setiembre	100%	100%
	Octubre	100%	100%
	Noviembre	100%	100%
	Diciembre	0%	0%
Método de evaluación de la temperatura de suministro		Fórmula	
Temperatura del agua - mínima	°C	15.9	
Temperatura del agua - máxima	°C	17.7	
	Unidad	Caso base	Caso propuesto
Demanda de calor	MWh	213.5	230.9
			Energía ahorrada
			-8%
			Costos iniciales incrementales

FIGURA 8-8 Selección de los parámetros del proyecto.

Finalmente RETScreen proporciona un dato muy valioso para el dimensionamiento de una instalación solar térmica, este es finalmente la cantidad de irradiación solar diaria total incidente I_T sobre una superficie inclinada por metro cuadrado y en función del mes del año. Tal como se muestra a continuación.

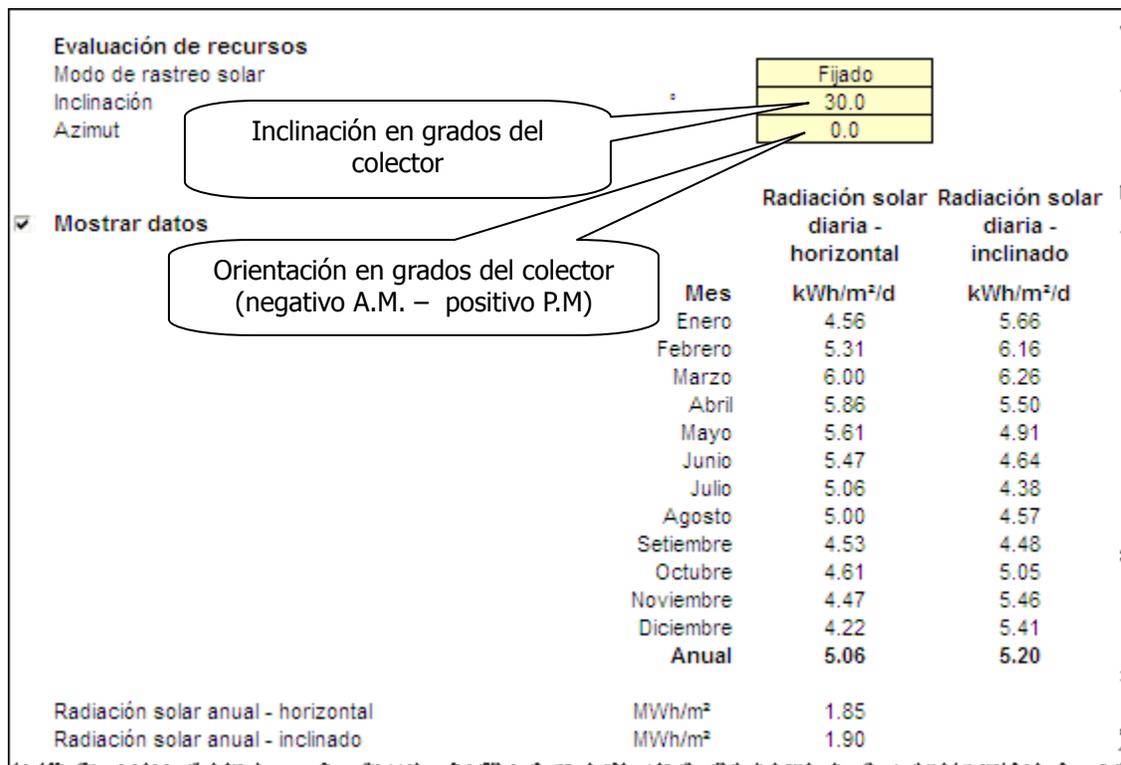


FIGURA 8-8 I_T total incidente – Resultados de RETScreen

Comparando los resultados anteriores con los que PROSOLMEX-1 maneja:

PROGRAMA DE CÁLCULO

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

1.-EL SIGUIENTE PROGRAMA PROPORCIONA LOS VALORES PARA RADIACION SOLAR TOTAL INCIDENTE I_T EN SUS COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA SOBRE UNA SUPERFICIE TERRESTRE HORIZONTAL Y OTRA INCLINADA PARA EL DIA REPRESENTATIVO DE CADA MES

a) INTRODUCIR DATOS DEL LUGAR EN DONDE SE HARA LA INSTALACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES TERMICOS

MES	Ciudad	Inclinacion del colector β	Reflectancia de los alrededores ρ	Latitud introducida por el usuario	Orientacion del colector γ
ENERO	Ciudad de México	30	0.30	N/A	0.00

Día del año n	Latitud de la ciudad	δ°	I ₀ [W/m ²]	Duración del día [hrs]	Radiacion Horizontal Extraterrestre [J/m ²]	Radiacion Sup. Inclinada Extraterrestre [J/m ²]
17	19.32	-20.92	1402.97	10.97	2.716E+07	3.88E+07

MES	Rad. Sup. Horizontal Extraterrestre (J/m ²)	Rad. Sup. Inclinada Extraterrestre (J/m ²)	Rad. local medida (J/m ²)	Rad. Difusa Calculada Terrestre (J/m ²)	Rad. Directa Calculada Terrestre (J/m ²)	I _T (J/m ²)	I _T (kWh/m ²)	MES
ENERO	2.72E+07	3.88E+07	1.642E+07	5.49E+06	1.09E+07	2.10E+07	5.85	ENERO
FEBRERO	3.08E+07	3.89E+07	1.912E+07	6.12E+06	1.30E+07	2.25E+07	6.25	FEBRERO
MARZO	3.48E+07	3.75E+07	2.160E+07	6.90E+06	1.47E+07	2.27E+07	6.31	MARZO
ABRIL	3.78E+07	3.42E+07	2.110E+07	7.91E+06	1.32E+07	1.98E+07	5.49	ABRIL
MAYO	3.90E+07	3.06E+07	2.020E+07	8.38E+06	1.18E+07	1.75E+07	4.86	MAYO
JUNIO	3.92E+07	2.87E+07	1.969E+07	8.52E+06	1.12E+07	1.65E+07	4.59	JUNIO
JULIO	3.89E+07	2.95E+07	1.822E+07	8.59E+06	9.63E+06	1.57E+07	4.35	JULIO
AGOSTO	3.81E+07	3.25E+07	1.800E+07	7.88E+06	9.62E+06	1.64E+07	4.55	AGOSTO
SEPTIEMBRE	3.57E+07	3.60E+07	1.631E+07	7.89E+06	8.42E+06	1.62E+07	4.49	SEPTIEMBRE
OCTUBRE	3.19E+07	3.82E+07	1.660E+07	6.83E+06	9.77E+06	1.84E+07	5.12	OCTUBRE
NOVIEMBRE	2.80E+07	3.86E+07	1.609E+07	5.79E+06	1.03E+07	2.00E+07	5.54	NOVIEMBRE
DICIEMBRE	2.60E+07	3.85E+07	1.519E+07	5.36E+06	9.83E+06	1.98E+07	5.51	DICIEMBRE

Comparando ambos resultados vemos que el porcentaje de variación no supera el 3.5% en el peor de los casos, tal como lo muestra la siguiente tabla.

TABLA 2-0 Resultados para la I_T de RETScreen Internacional y PROSOLMEX-1

Radiacion solar diaria- inclinado kWh/m ² /d	I_T (kWh/m ²)	% de variacion
5.66	5.85	3.22
6.16	6.25	1.43
6.26	6.31	0.79
5.50	5.49	0.17
4.91	4.86	0.85
4.64	4.59	0.99
4.38	4.35	0.71
4.57	4.55	0.44
4.48	4.49	0.37
5.05	5.12	1.30
5.46	5.54	1.45
5.41	5.51	1.78

CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó principalmente en dar a conocer las características básicas de la energía solar, la forma en que se contabiliza y es captada por el elemento de transferencia y transformación de la energía solar térmica, el colector solar térmico.

A lo largo de mi tesis aborde de manera detallada los temas claves y básicos que dan a conocer las cualidades y consideraciones necesarias para el diseño de un colector solar térmico, el cual es actualmente empleado para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) o sea el caso también en la climatización de albercas. Todo esto, si bien no constituye un tema nuevo, si lo es en la práctica; donde afortunadamente en muchas ciudades del país se ha empezado a popularizar el uso y aprovechamiento de los amplios recursos que en materia solar, la república mexicana es prodigiosa.

Sólo resta agradecer ampliamente la colaboración y ayuda de todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucradas en el presente trabajo, y manifestar que esta tesis resultaría infructuosa si no es compartida con la comunidad politécnica, de la cual espero adopte y dé continuidad al desarrollo e investigación de fuentes de energías limpias y renovables como lo es, sin duda, la que el astro rey nos brinda.

Kisiev Salgado Castro

APÉNDICE 1

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

MATERIALES	Densidad	Calor Esp.	Conduc.	Calor Esp.
A	Kg/m ³	J/Kg°C	W/m°C	Kcal/Kg°C
Acero	7850	480	58	0.11
Adobe	1780		0.85	
Agua (sin convección)	1000	4184	0.6	1.00
Aire (a 20°C, 1 Atm. sin convección)	1.2	1213	0.03	0.29
Alfombras y moquetas	1000	1350	0.05	0.32
Aluminio	2700	920	204	0.22
Arcilla	2100		0.93	
Arcilla expandida	300		0.09	
Arcilla expandida	450		0.11	
Arena con humedad natural	1700		1.4	
Arena seca	1500		0.58	
Asfalto	2100		0.7	
B	Kg/m ³	J/Kg°C	W/m°C	Kcal/Kg°C
Betún	1050		0.17	
Bronce	8500		64	
C	Kg/m ³	J/Kg°C	W/m°C	Kcal/Kg°C
Cartón-yeso	900		0.18	
Cascote de ladrillo	1300		0.41	
Cobre	8900		384	
Contrachapado	600		0.14	
Corcho aglomerado UNE.5690	110		0.04	
E	Kg/m ³	J/Kg°C	W/m°C	Kcal/Kg°C
Enlucido de yeso	800	880	0.3	0.21
Enlucido de yeso con perlita	570		0.18	
Escoria de carbón	1200		0.19	
Espuma elastomérica	60		0.34	
F	Kg/m ³	J/Kg°C	W/m°C	Kcal/Kg°C
Fábrica bloques hormigón celular a	800		0.44	
Fábrica bloques hormigón celular a	1000		0.56	
Fábrica bloques hormigón celular a	1200		0.7	
Fábrica bloques hormigón celular v	600		0.35	
Fábrica bloques hormigón celular v	800		0.41	
Fábrica bloques hormigón celular v	1000		0.47	
Fábrica bloques huecos hormigón L	1000		0.44	
Fábrica bloques huecos hormigón M	1200		0.49	
Fábrica bloques huecos hormigón P	1400		0.56	
Fábrica ladrillo cerámico macizo	1800	878	0.87	0.21
Fábrica ladrillo hueco	1200		0.49	
Fábrica ladrillo perforado	1600		0.76	
Fabrica ladrillo silico-calcáreo	1600		0.79	
Fibra de vidrio	91		0.04	

SUPERFICIES:	Absortancia α	Emitancia ϵ
Plástico blanco	0.05	0.92
Cal, yeso	0.08	0.95
Aluminio pulido	0.10	0.05
Papel	0.25	0.95
Pintura blanca reciente	0.10 a 0.15	0.90
Pintura colores claros	0.30 a 0.40	0.90
Acero inoxidable.	0.45	0.25
Mármol	0.40 a 0.50	0.95
Pintura colores medios y grises	0.50 a 0.70	0.90
Ladrillo rojo	0.65	0.93
Acero galvanizado nuevo.	0.65	0.20
Hormigón claro	0.60 a 0.70	0.88
Pinturas oscuras	0.80 a 0.90	0.90
Arena húmeda	0.90	0.95
Asfalto	0.95	0.95

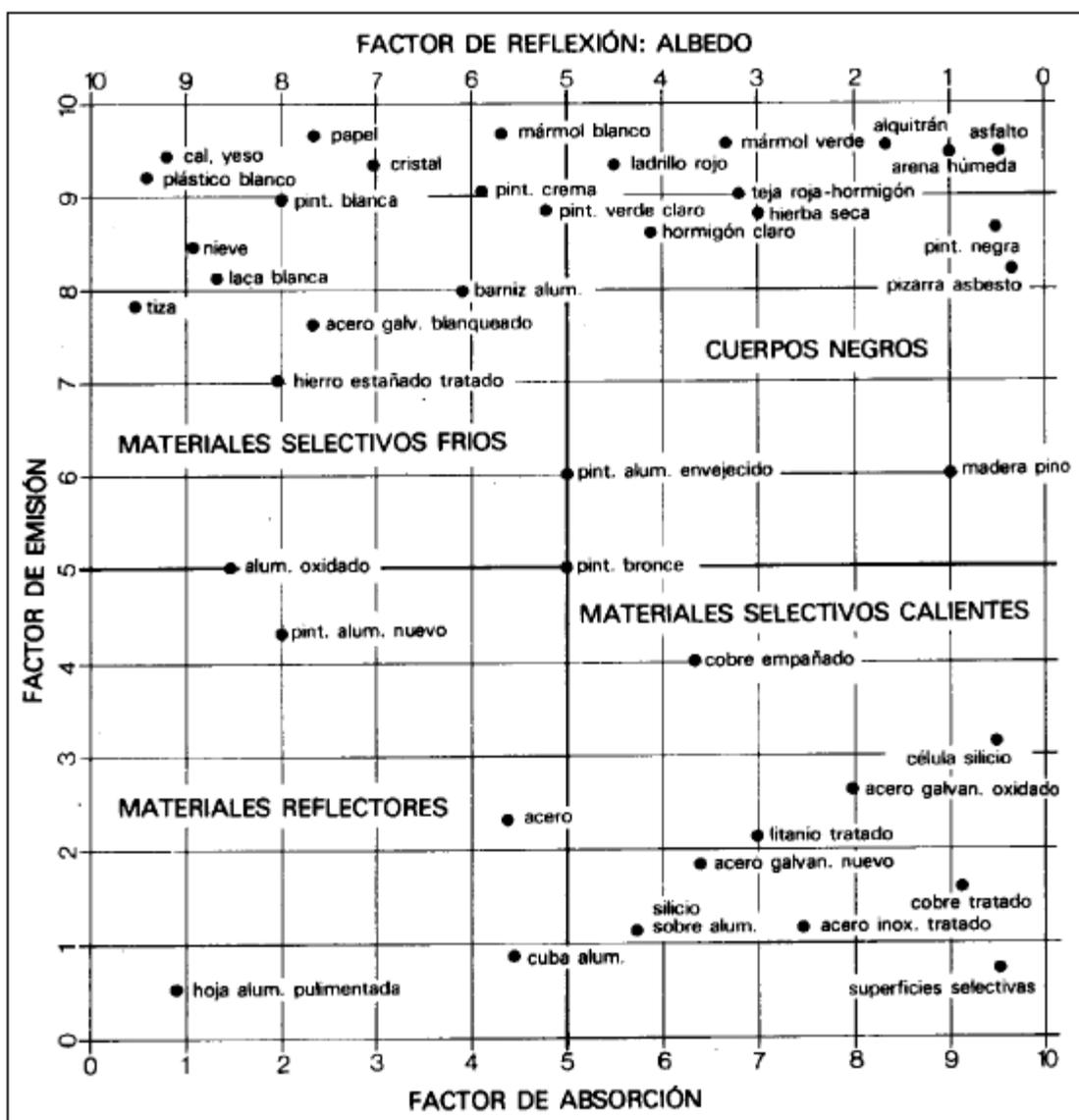


Diagrama de la propiedades radiantes de materiales corrientes de construcción

APENDICE 2



Mapas de radiación solar para la república mexicana

Mapas de radiación solar para la república mexicana

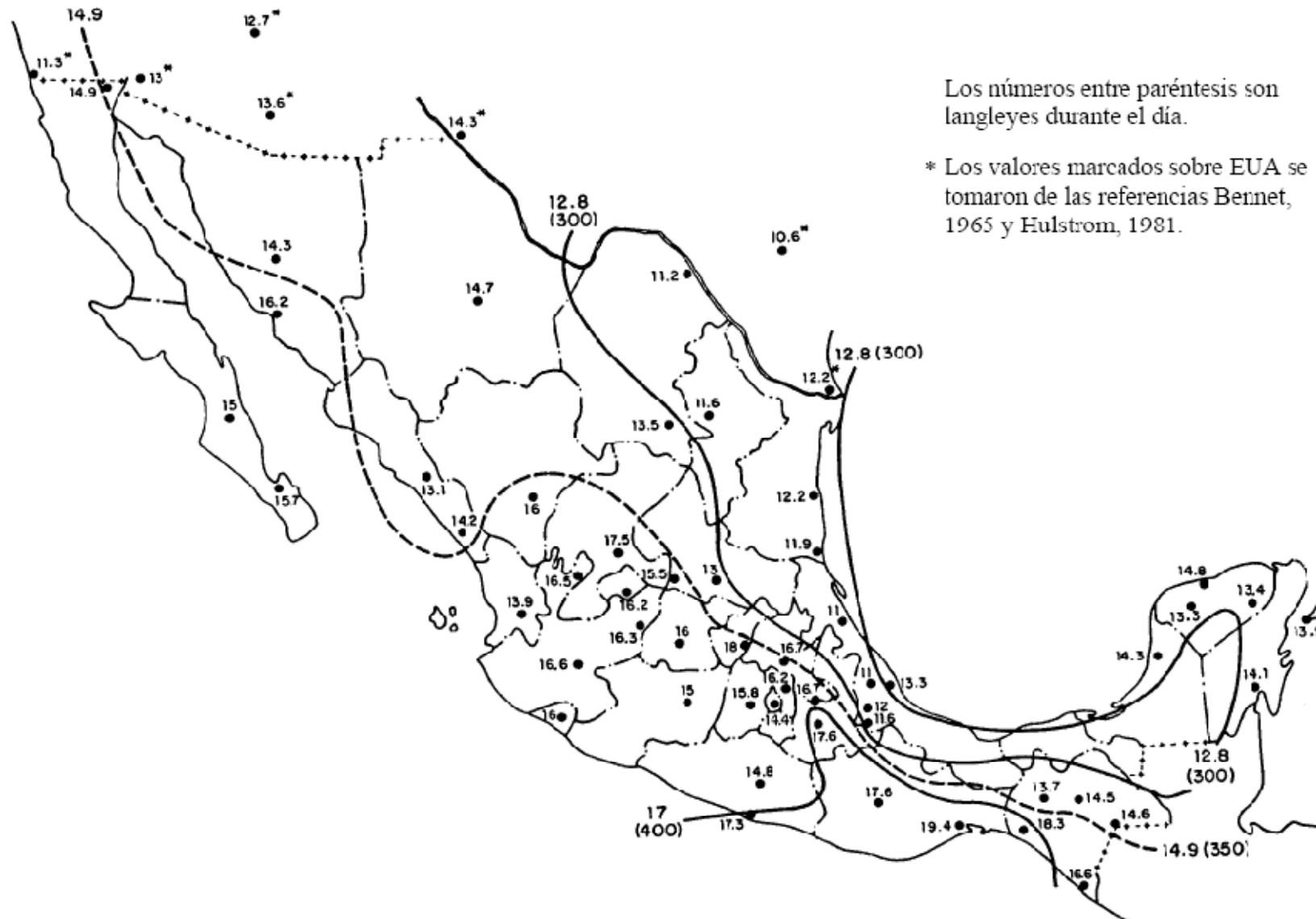
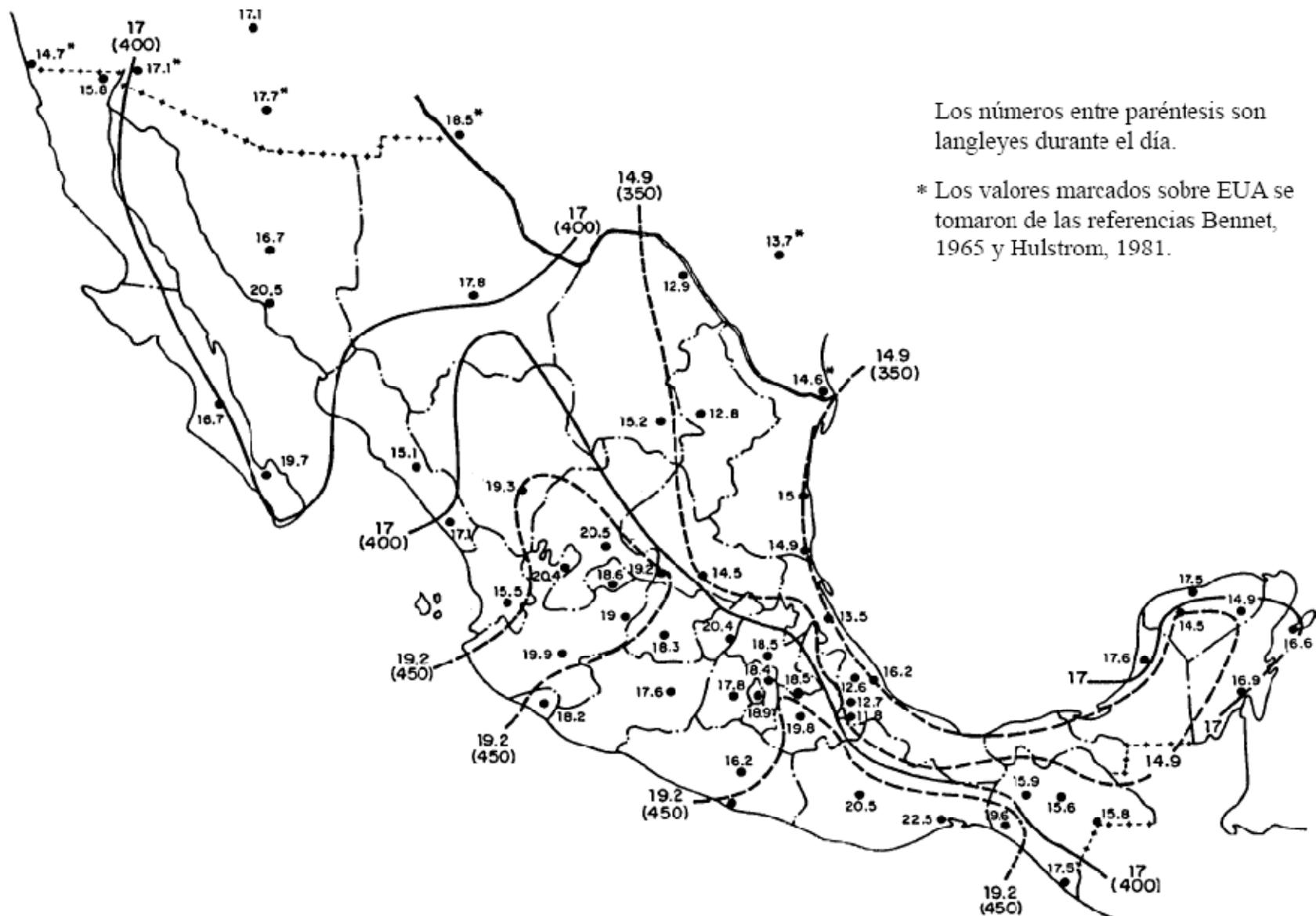


Fig 1.3 Promedio de irradiación global diaria en enero, en MJ/m^2



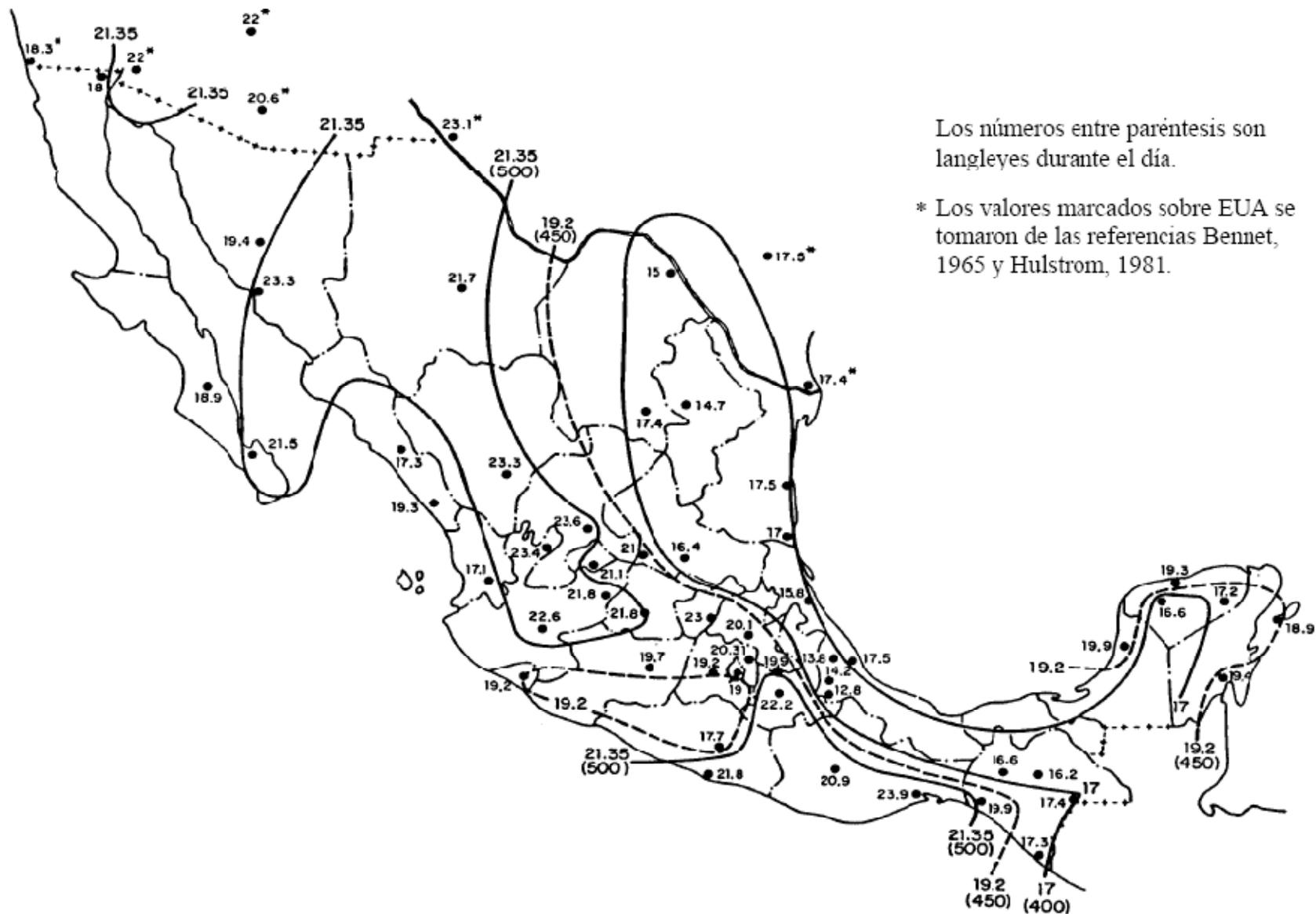


Fig 1.5 Promedio de irradiación global diaria en marzo, en MJ/m^2

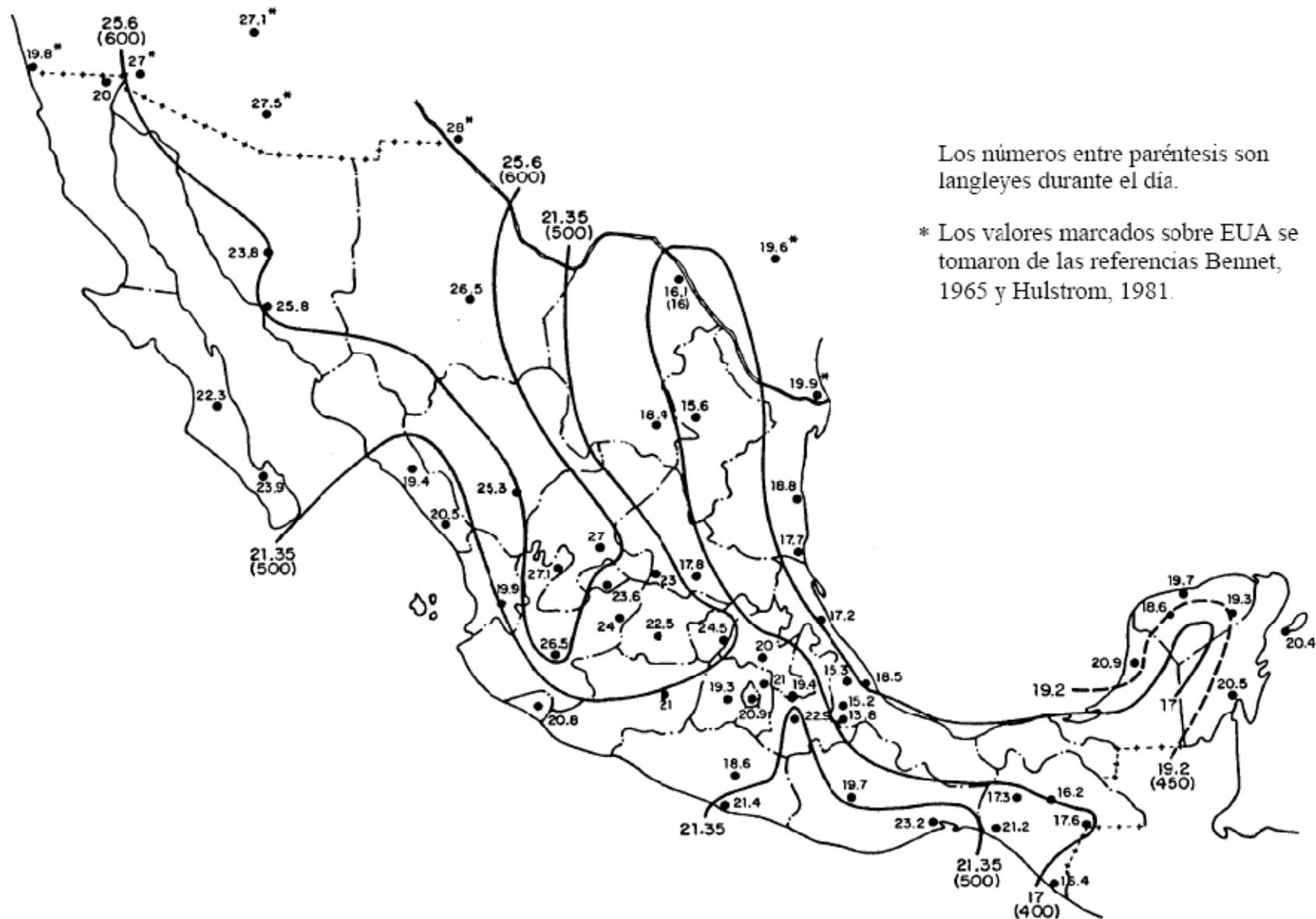


Fig 1.6 Promedio de irradiación global diaria en abril, en MJ/m^2



Fig 1.8 Promedio de irradiación global diaria en junio, en MJ/m^2

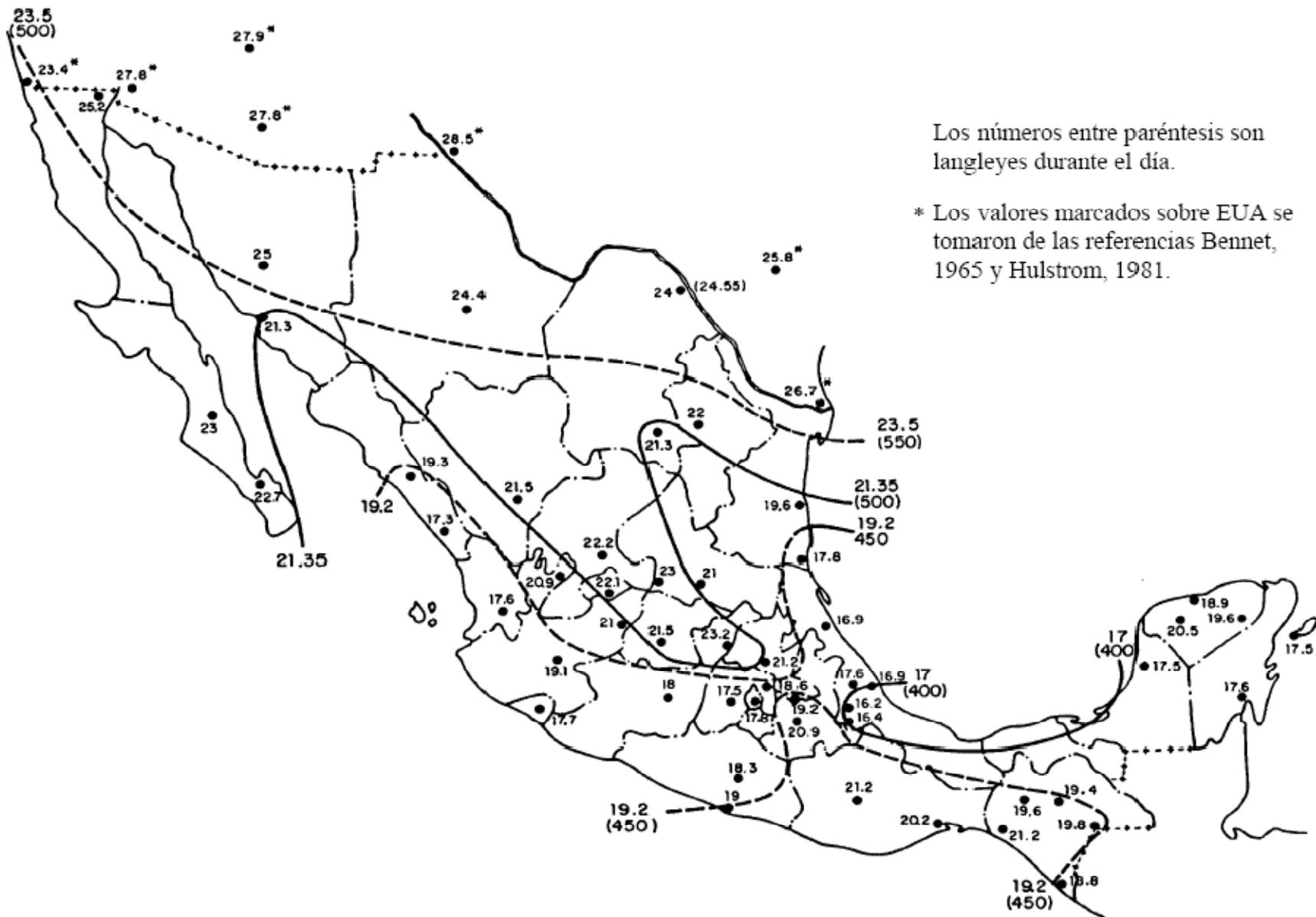


Fig 1.9 Promedio de irradiación global diaria en julio, en MJ/m^2

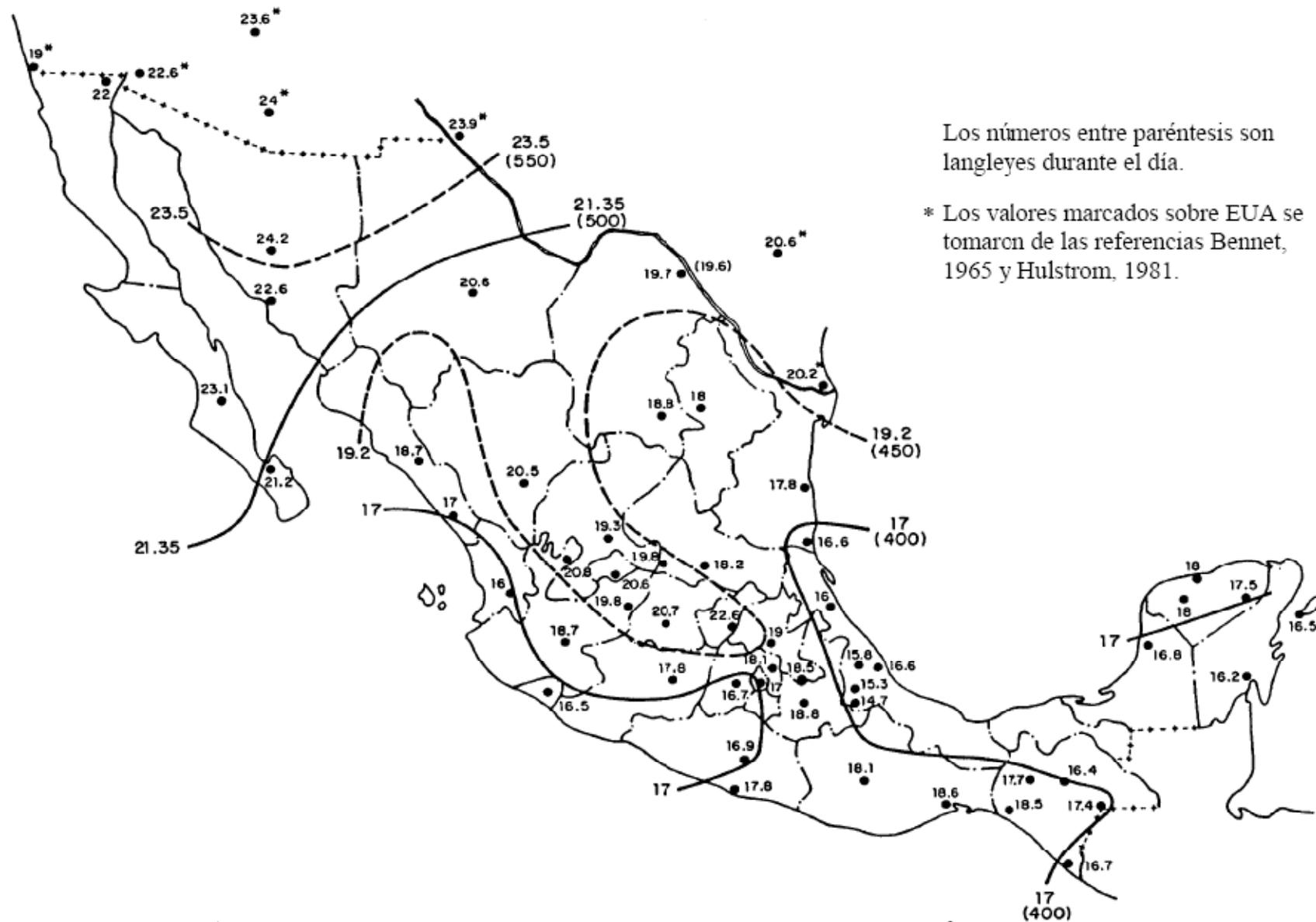


Fig 1.11 Promedio de irradiación global diaria en septiembre, en MJ/m^2

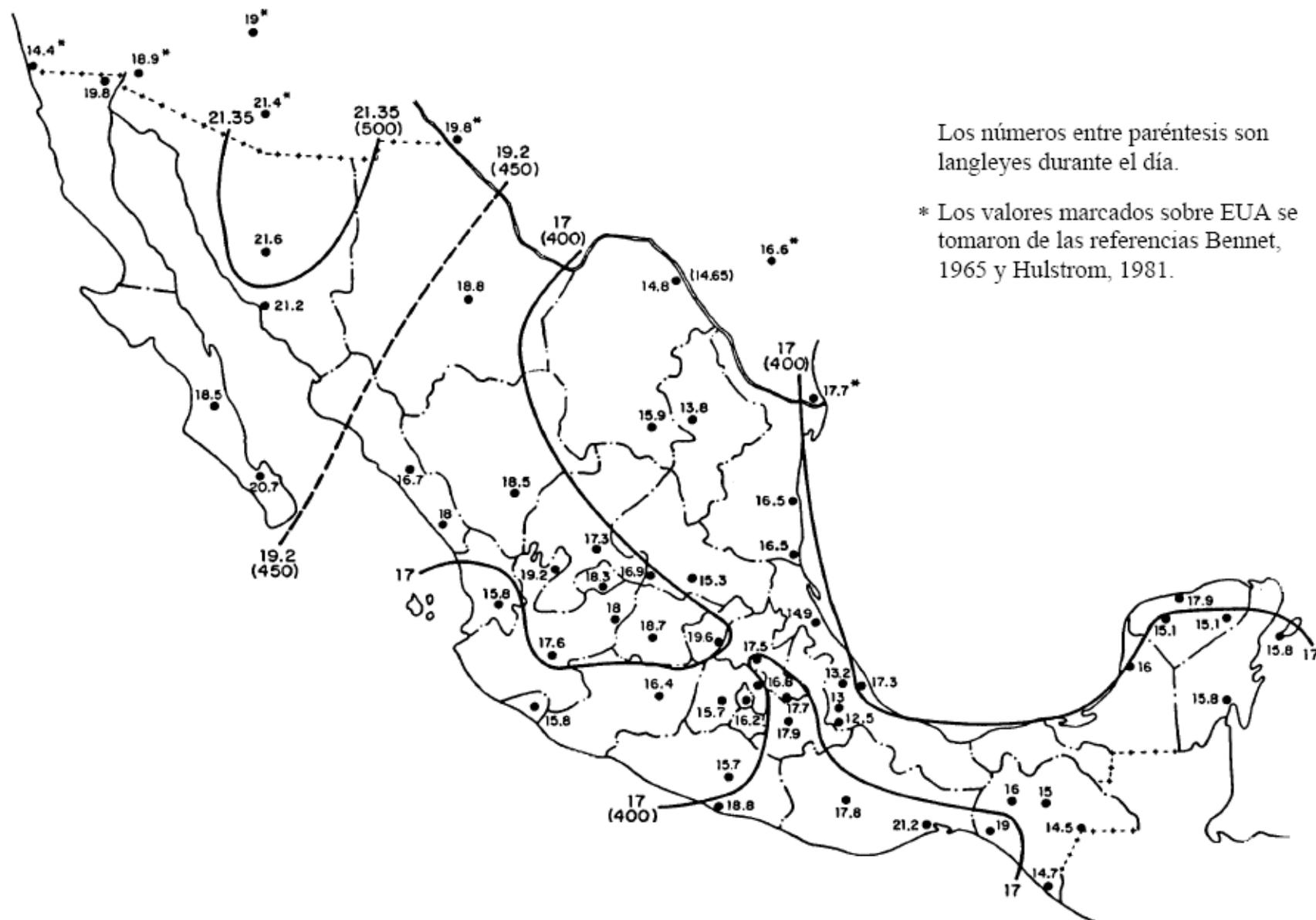


Fig 1.12 Promedio de irradiación global diaria en octubre, en MJ/m²

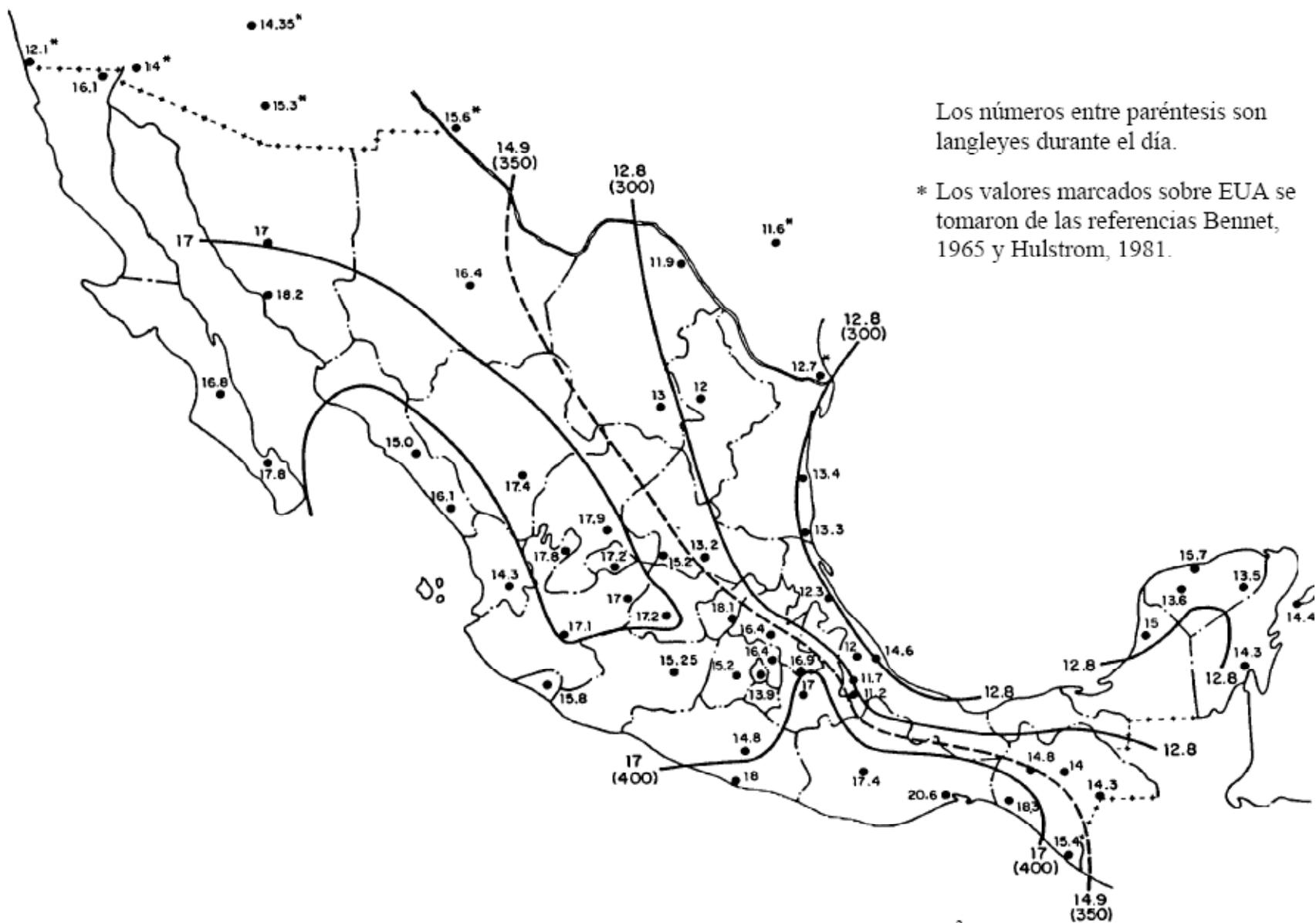


Fig 1.13 Promedio de irradiación global diaria en noviembre, en MJ/m^2



Fig 1.14 Promedio de irradiación global diaria en diciembre, en MJ/m^2

BIBLIOGRAFIA

1. John A. Duffie y W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes: segunda edición.
Ed. John Wiley & Sons. Inc.
2. Peter J. Lunde, Solar Thermal Engineering: space heating and hot water systems.
Ed. John Wiley & Sons. Inc.
3. Jaume R. Martín, Curso de Energía Solar.
Ed. Centro de Tecnología Educativa.
4. José A. Manrique, Energía Solar: fundamentos y aplicaciones fototérmicas.
Ed. Harla
5. Rafael A. Salgado, Ingeniería en Energía Solar II.
Ed. Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.
6. Yunus A. Çengel, Transferencia de Calor: segunda edición.
Ed. Mc. Graw Hill.