

201  
69



**Universidad Nacional Autónoma de México**

Facultad de Ingeniería

**Aprovechamiento y Aplicación de la Energía  
Solar en la Edificación.**

**Tesis Profesional**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

**P r e s e n t a :**

**Ricardo Rafael Flores Ramos**



México, D. F.

1986



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# I N D I C E

		PAGINAS
CAPITULO I.	INTRODUCCION .....	I
CAPITULO II.	RELACIONES MATEMATICAS PARA LA ESTIMACION DE LA ENERGIA SOLAR. ....	3
2.I.	Angulos solares .....	3
2.I.I	Problemas .....	7
2.2	Radiación directa sobre una superficie inclinada .....	8
2.2.I	Superficie Horizontal .....	8
2.2.2	Superficie inclinada hacia el sur .....	8
2.2.3	Superficie vertical orientada hacia el sur ..	8
2.2.4	Problemas .....	9
2.3	Estimación de la radiación solar .....	II
2.3.I	Radiación diaria promedio sobre superficies inclinadas .....	II
2.3.2	Radiación instantánea sobre superficies inclinadas .....	18
2.3.3	Problemas .....	20
CAPITULO III.	FORMULAS DE DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR .....	23
3.I	Balance de energía .....	24
3.2	Pérdidas de calor .....	24
3.3	Pasos a seguir en el diseño de un colector solar .....	24
3.4	Problemas .....	38
CAPITULO IV.	DISEÑO E INSTALACION DE SISTEMAS SOLARES DE PRODUCCION DE AGUA CALIENTE. ....	42
4.I	Sistema de circulación por termosifón .....	42
4.I.I	Circuito Abierto .....	43
4.I.2	Ventajas y desventajas .....	44
4.I.3	Circuito Cerrado .....	45

	4.2	Sistema con bomba de circulación .....	47
	4.2.I	Ventajas y desventajas .....	47
	4.3	Criterios comparativos para la adquisición de una nueva instalación solar para la producción de agua caliente .....	51
	4.4	Diseño de un sistema de calentamiento de agua mediante circulación forzada .....	52
	4.5	Problemas .....	54
CAPITULO V.		DISEÑO E INSTALACION DE SISTEMAS SOLARES DE CALEFACCION PARA ALBERCAS .....	57
	5.1	Pérdidas de calor .....	58
	5.2	Tamaño del conjunto de colectores .....	60
	5.3	Funcionamiento de las instalaciones solares para calefaccion de albercas .....	63
	5.3.I	Instalación con circuito abierto .....	63
	5.3.2	Instalación con circuito cerrado .....	67
	5.4	Disposiciones constructivas para la calefacción de las albercas .....	68
	5.5	Sugerencias para reducir las pérdidas de calor ....	69
	5.6	Problemas .....	70
CAPITULO VI.		AUTOCONSTRUCCION DE COLECTORES SOLARES .....	73
	6.1	Superficie absorbidora y circuito absorbedor .....	73
	6.2	El aislamiento térmico .....	76
	6.3	La cubierta transparente .....	76
	6.4	La carcasa del colector .....	77
	6.5	Disposiciones contra heladas, incrustaciones y corrosión de los colectores de agua .....	78
	6.5.I	Las heladas .....	78
	6.5.2	Incrustaciones calcáreas .....	79
	6.5.3	La corrosión .....	79
	6.6	Conexión de los colectores .....	80
	6.6.I	En paralelo .....	80
	6.6.2	En serie .....	80

6.7	Montaje de los colectores solares .....	81
6.7.1	Colectores sobre cubiertas planas .....	81
6.7.2	Colectores sobre cubiertas inclinadas .....	81
6.7.3	Colectores combinados con los muros del edificio ...	82
6.7.4	Disposición del colector fuera del edificio.....	83
6.8	Autoconstrucción de colectores con tanques e tanques de gasolina .....	84
6.8.1	Colectores de tanques .....	84
6.8.2	Colectores con tanques de gasolina .....	87
6.9	Factores de calidad que debe reunir un colector solar .....	91
CAPITULO VII. CONCLUSIONES .....		93
BIBLIOGRAFIA. ....		95

# CAPITULO I

## Introducción.

El sol, fuente generadora de todo lo existente en nuestro planeta, ha propiciado la formación de los energéticos fósiles no renovables (petroleo, gas combustible, y carbon). De ahí que, frente a su existencia poco perdurable, debamos encontrar nuevas fuentes de energía a fin de no depender de las no renovables.

Estas las debemos aprovechar prolongando sus reservas y dandoles un uso más eficiente en las actividades de desarrollo de nuestro país.

La energía solar como energético perdurable, incide en el 40% de nuestra república mexicana, con un promedio de más de 243 W/m<sup>2</sup>.día, en todo el año.

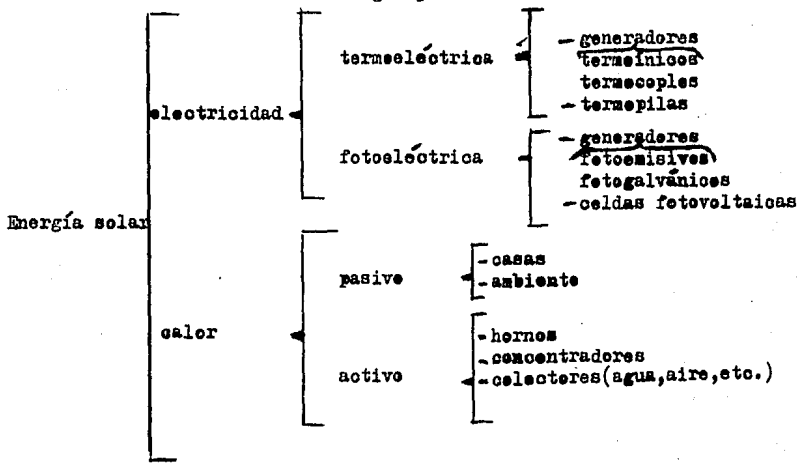
Como caso particular la península de Baja California, la costa occidental y la parte de la península de Yucatán, son las zonas más favorecidas por la radiación solar.

Es por ello que esta tesis, la realicé con el propósito de utilizar una de las fuentes de energía no convencionales como es la energía solar, que puede ser aprovechada para necesidades locales modestas y además es un energético seguro, anti-contaminante e inextinguible.

Una de las aplicaciones de este energético son por ejemplo, que toda la demanda de agua caliente en un hospital se puede satisfacer mediante la energía solar que incide en su cubierta, el techo de una casa si actua como colector de energía, puede suministrar electricidad para un telar o un torno, etc. Estas son algunas de las multiples aplicaciones que se le puede dar a la energía solar.

En los capitulos subsecuentes muestre la manera de estimar la radiación solar incidente en un colector solar así como su diseño e instalación.

Además doy algunos principios de autoconstrucción de un colector ya sea para aprovecharlo en el calentamiento de agua para uso domestico o calefacción de piscinas:



# II EQUIVALENCIAS DE UNIDADES EN SI

Cantidad física	Símbolo	Equivalencia
Longitud	L	1 pie = 0.3048 m
		1 pig (pulg) = 0.0254 m
		1 mi = 1 609.3 m
Velocidad	V	1 pie/s = 0.3048 m/s
		1 mi/h = 0.4470 m/s
		1 km/h = 0.2778 m/s
Aceleración	a	1 pie/s <sup>2</sup> = 0.3048 m/s <sup>2</sup>
		1 g = 0.0229 m/s <sup>2</sup>
Área	A	1 pie <sup>2</sup> = 0.0929 m <sup>2</sup>
		1 pig <sup>2</sup> = 6.452 x 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>
		1 pie <sup>3</sup> = 0.0283 m <sup>3</sup>
Volumen	V	1 pig <sup>3</sup> = 1.6387 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>
		1 gal = 3.785 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
		1 pie <sup>3</sup> /s = 0.0283 m <sup>3</sup> /s
Flujo de volumen	V̇	1 pie <sup>3</sup> /min = 0.0283 m <sup>3</sup> /min
		1 gal/min = 3.785 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /min
		1 pie <sup>3</sup> /h = 0.06243 m <sup>3</sup> /h
Volumen específico	v	1 lb = 0.4536 kg
		1 slug = 14.594 kg
		1 utm = 9.8066 kg
Masa	m	1 lb/s = 0.4536 kg/s
		1 lb/h = 0.4536 kg/h
		1 lb/pie <sup>3</sup> = 16.013 kg/m <sup>3</sup>
Flujo de masa	ṁ	1 lb/s = 0.4536 kg/s
		1 lb/h = 0.4536 kg/h
		1 lb/pie <sup>3</sup> = 16.013 kg/m <sup>3</sup>
Densidad	ρ	1 lb/pie <sup>3</sup> = 16.013 kg/m <sup>3</sup>
		1 lb/s = 0.4536 kg/s
		1 lb/h = 0.4536 kg/h
Fuerza	F	1 lbf = 4.448 N
		1 kgf = 9.8066 N
Presión	p	1 lb/pie <sup>2</sup> = 6.895 kPa
		1 kgf/cm <sup>2</sup> = 98.066 kPa
		1 bar = 100 kPa
Viscosidad dinámica	μ	1 lbfs/pie <sup>2</sup> = 1.488 N·s/m <sup>2</sup>
		1 cP (centipoise) = 0.001 N·s/m <sup>2</sup>
		1 pie <sup>2</sup> /s = 0.0929 m <sup>2</sup> /s
Viscosidad cinemática	η	1 pie <sup>2</sup> /h = 2.581 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
		1 pie <sup>2</sup> /s = 0.0929 m <sup>2</sup> /s
		1 pie <sup>2</sup> /h = 2.581 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Energía, trabajo, calor	E, U, W, Q	1 pie·lbf = 1.356 J
		1 Btu = 1.0551 kJ
		1 kgf·m = 9.8066 J
Energía, trabajo, calor (por unidad de masa)	e, u, w, q	1 Btu/lb = 2.3261 kJ/kg
		1 kcal/kg = 4.1868 kJ/kg
		1 Btu/(lb·R) = 4.1868 kJ/(kg·K)
Calor específico	c <sub>p</sub> , c <sub>v</sub>	1 kcal/(kg·K) = 4.1868 kJ/(kg·K)
		1 kcal/(kg·K) = 4.1868 kJ/(kg·K)
		1 Btu/(lb·R) = 1.0551 kJ
Entalpía	H	1 Btu = 1.0551 kJ
		1 kcal = 4.1868 kJ
Entalpía específica	h	1 Btu/lb = 2.3261 kJ/kg
		1 kcal/kg = 4.1868 kJ/kg
		1 Btu/R = 1.3692 kJ/K
Entropía	S	1 kcal/K = 4.1868 kJ/K
		1 Btu/(lb·R) = 4.1868 kJ/(kg·K)
		1 kcal/(kg·K) = 4.1868 kJ/(kg·K)
Flujo de calor	Q̇	1 Btu/h = 1.0551 kW
		1 kcal/h = 4.1868 kW
Coeficiente de transmisión de calor, convectividad térmica	U, h <sub>c</sub>	1 Btu/(h·pie <sup>2</sup> ·°F) = 5.678 W/(m <sup>2</sup> ·K)
		1 kcal/(h·m <sup>2</sup> ·°C) = 1.163 W/(m <sup>2</sup> ·K)
		1 Btu/(h·pie <sup>2</sup> ·°F) = 1.731 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Conductividad térmica	k, λ	1 kcal/(h·m·°C) = 1.163 W/(m·K)
		1 Btu/(h·pie·°F) = 1.731 W/(m·K)
		1 kcal/(h·m·°C) = 1.163 W/(m·K)
Difusividad térmica	α	1 pie <sup>2</sup> /s = 0.0929 m <sup>2</sup> /s
Constante de gas	R	1 Btu/(lb·R) = 4.1868 kJ/(kg·K)
		1 kcal/(kg·K) = 4.1868 kJ/(kg·K)

## Conversión de temperaturas:

$$T (K) = T (°C) + 273.15$$

$$T (°C) = \frac{5}{9} [T (°F) - 32]$$

$$T (R) = T (°F) + 459.67$$

$$T (K) = \frac{5}{9} T (R)$$



## CAPITULO II

Relaciones matemáticas para la  
estimación de la energía solar.

### Relaciones geométricas para la radiación solar.

En los procesos de conversión fototérmica los colectores solares se encuentran fijos o tienen un movimiento limitado a ciertos grados de libertad. En consecuencia, estos colectores no están dirigidos continuamente hacia el disco solar, los parasoles en la edificación deben de diseñarse de modo que permitan la entrada del sol al interior del edificio durante el invierno, y eviten el acceso de la radiación al interior de éste durante la temporada de verano, de ello se desprende la necesidad de conocer de manera precisa el movimiento del sol y la dirección de la radiación directa sobre un plano dado en cualquier instante.

#### -Ángulos solares.

Cada día el sol, para un observador situado en la tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento, alcanzando su punto más alto al mediodía, por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos, más altos en el firmamento a medida que el invierno transcurre y llega el verano, como se observa en la fig. 2.I.

En el diagrama también se observa que el amanecer acontece más temprano, y el atardecer, más tarde durante el verano.

Obviamente la posición del sol en la bóveda celeste depende del lugar en que se encuentra el observador. Así al mediodía de marzo 21 y septiembre 23 los equinoccios de primavera y otoño, el sol se encuentra directamente sobre el ecuador, dado que los movimientos de la tierra y el sol son relativos entre sí en el análisis que sigue se supondrá que la tierra está fija en el espacio, que el sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen del sistema de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la tierra, desde este punto de vista telescópico, el sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste.

En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura solar  $\theta$  y el acimut solar  $\phi$ .

La primera de estas variables define el ángulo que la visual al sol forma con el horizonte, en tanto que la segunda define la desviación que tienen los rayos del sol con respecto al sur verdadero.

En este caso se considera que el acimut se mide con respecto al sur, y no con relación norte, como es usual.

El cálculo preciso de estas variables depende fundamentalmente de tres parámetros: la latitud del lugar L; la declinación D; y el ángulo horario W.

La latitud queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la tierra, con respecto al plano del ecuador. Este ángulo es positivo cuando se mide hacia el norte del ecuador, y negativo cuando lo es hacia el sur de éste.

La declinación define la posición angular del sol al mediodía solar, es decir en el momento en que el sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador. La declinación es también un índice del alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador.

Este parámetro, que depende del día del año, puede calcularse con la expresión:

$$D = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{(284 + m)}{365} \right) \quad \text{ec. (2.1)}$$

donde  $m$  es el día del año. La tabla 2.I indica los valores correspondientes.

El ángulo horario es igual a cero al mediodía solar y adquiere un valor de 15 grados de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes. Así,  $W = +30$  a las 10:00, y  $W = -15$  a las 13:00.

Una vez determinadas la latitud, la declinación y el ángulo horario, la altura y el acimut solares pueden calcularse fácilmente por medio de las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\operatorname{sen} \# = \operatorname{sen} D \operatorname{sen} L \operatorname{sen} W + \operatorname{sen} D \operatorname{sen} L \quad \text{ec. (2.2)}$$

$$\operatorname{sen} \& = \operatorname{sen} D \operatorname{sen} W / \operatorname{sen} \# \quad \text{ec. (2.3)}$$

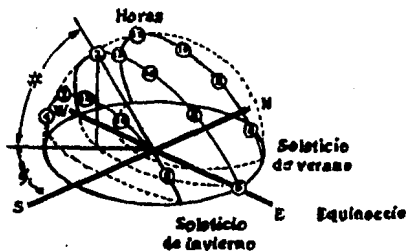


Figura 2.I Movimiento aparente del sol.

D/a	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
01	-22°05'	-17°04'	-07°33'	04°38'	13°03'	22°02'	23°02'	19°02'	08°19'	-02°09'	-14°24'	-21°47'
02	-23°00'	-17°07'	-07°14'	04°54'	13°21'	22°10'	23°03'	17°47'	07°57'	-03°52'	-14°43'	-21°56'
03	-22°53'	-16°58'	-06°51'	05°17'	13°39'	22°18'	22°58'	17°32'	07°35'	-03°55'	-14°02'	-22°05'
04	-22°48'	-16°53'	-06°28'	05°40'	13°56'	22°25'	22°53'	17°16'	07°13'	-04°15'	-13°21'	-22°14'
05	-22°43'	-16°48'	-06°05'	06°02'	14°14'	22°32'	22°48'	17°00'	06°51'	-04°42'	-12°39'	-22°21'
06	-22°37'	-16°57'	-05°42'	06°25'	14°31'	22°39'	22°42'	16°44'	06°29'	-05°03'	-12°57'	-22°29'
07	-22°30'	-16°58'	-05°19'	06°48'	14°47'	22°45'	22°36'	16°27'	06°06'	-05°28'	-13°15'	-22°38'
08	-22°23'	-16°50'	-04°53'	07°10'	15°04'	22°50'	22°29'	16°10'	05°44'	-05°51'	-13°33'	-22°42'
09	-22°15'	-16°01'	-04°52'	07°33'	15°20'	22°55'	22°12'	15°53'	05°21'	-06°14'	-13°50'	-22°49'
10	-22°07'	-14°42'	-04°08'	07°55'	15°36'	23°00'	22°15'	15°36'	04°53'	-06°36'	-14°07'	-22°59'
11	-21°58'	-14°22'	-03°45'	08°17'	15°51'	23°05'	22°07'	15°18'	04°36'	-06°59'	-14°24'	-23°03'
12	-21°49'	-14°03'	-03°21'	08°39'	16°07'	23°06'	21°59'	15°00'	04°18'	-07°22'	-14°40'	-23°09'
13	-21°40'	-13°43'	-02°58'	09°01'	16°22'	23°12'	21°51'	14°42'	03°50'	-07°44'	-14°56'	-23°15'
14	-21°29'	-13°23'	-02°34'	09°22'	16°36'	23°16'	21°42'	14°24'	03°27'	-08°07'	-15°12'	-23°18'
15	-21°19'	-13°03'	-02°10'	09°44'	16°51'	23°18'	21°32'	14°05'	03°04'	-08°23'	-15°29'	-23°16'
16	-21°08'	-12°42'	-01°47'	10°05'	17°05'	23°21'	21°23'	13°46'	02°41'	-08°51'	-15°45'	-23°19'
17	-20°57'	-12°22'	-01°23'	10°27'	17°18'	23°23'	21°13'	13°27'	02°18'	-09°13'	-15°56'	-23°21'
18	-20°45'	-12°01'	-00°59'	10°48'	17°32'	23°24'	21°03'	13°08'	01°59'	-09°38'	-16°12'	-23°23'
19	-20°33'	-11°40'	-00°35'	11°08'	17°48'	23°25'	20°53'	12°49'	01°38'	-09°57'	-16°26'	-23°23'
20	-20°21'	-11°18'	-00°12'	11°29'	17°58'	23°26'	20°41'	12°29'	01°18'	-10°18'	-16°40'	-23°26'
21	-20°08'	-10°57'	00°12'	11°50'	18°10'	23°26'	20°29'	12°09'	00°45'	-10°40'	-16°54'	-23°26'
22	-19°53'	-10°35'	00°36'	12°11'	18°22'	23°26'	20°18'	11°49'	00°21'	-11°01'	-17°07'	-23°28'
23	-19°42'	-10°13'	00°59'	12°31'	18°34'	23°26'	20°08'	11°29'	-00°02'	-11°22'	-17°20'	-23°26'
24	-19°29'	-09°52'	01°23'	12°50'	18°45'	23°25'	19°53'	11°08'	-00°26'	-11°43'	-17°32'	-23°23'
25	-19°13'	-09°29'	01°47'	13°10'	18°56'	23°24'	19°41'	10°48'	-00°43'	-12°04'	-17°44'	-23°20'
26	-18°59'	-09°07'	02°10'	13°29'	19°07'	23°22'	19°27'	10°27'	-01°12'	-12°25'	-17°55'	-23°22'
27	-18°44'	-08°45'	02°34'	13°48'	19°17'	23°20'	19°14'	10°06'	-01°36'	-12°45'	-18°07'	-23°20'
28	-18°29'	-08°22'	02°57'	14°07'	19°27'	23°17'	19°00'	09°45'	-01°59'	-13°05'	-18°17'	-23°17'
29	-18°15'	-08°00'	03°21'	14°26'	19°36'	23°14'	18°46'	09°24'	-02°22'	-13°25'	-18°28'	-23°14'
30	-17°57'	-	03°44'	14°45'	19°45'	23°11'	18°32'	09°02'	-02°46'	-13°45'	-18°38'	-23°10'
31	17°41'	-	04°01'	-	21°54'	-	18°17'	08°41'	-	-14°05'	-	-23°06'

TABLA 2:I Angulos de declinación (D) diaria del sol.

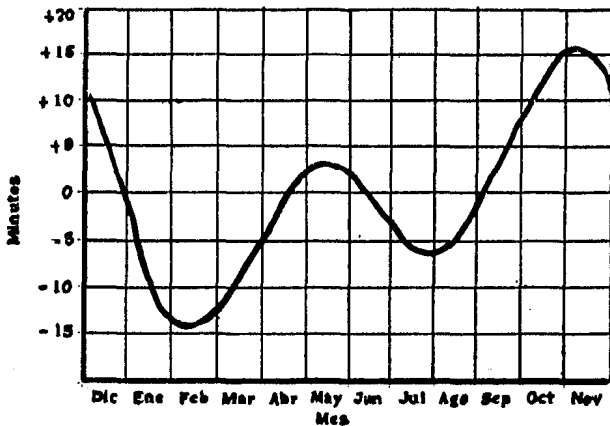


Figura 2.2 Ecuación del tiempo.

Haciendo uso de las expresiones anteriores puede calcularse también la longitud del día, es decir, el máximo número de horas de asealamiento diario.

Haciendo  $\lambda = 0$  en la ecuación 2.2 se obtiene que:

$$\cos Ws = - \tan L \tan B \quad \text{ec. (2.4)}$$

e bien,

$$T_d = \frac{2}{15} Ws \quad (\text{horas}) \quad \text{ec. (2.5)}$$

Cabe apuntar que el tiempo solar difiere del tiempo oficial que indica un reloj exacto. Ambas están relacionadas entre sí por la expresión

$$\text{tiempo solar} = \text{tiempo oficial} + E + 4(\text{lref.} - \text{lloc.}) \quad \text{ec. (2.6)}$$

donde E es la ecuación del tiempo mostrada en la fig. 2.2 en minutos.

lref. es la longitud del meridiano de referencia horaria oficial para la zona en cuestión, y lloc. es la longitud del meridiano del lugar en grados oeste.

En la tabla 2.2 se muestran algunos valores de E para los distintos días del año.

Fecha	Corrección de tiempo		Fecha	Corrección de tiempo			
	min	seg		min	seg		
Enero	1	-3	22	Julio	1	-3	23
	8	-4	04		8	-4	39
	15	-8	12		15	-5	28
	22	-11	28		22	-6	02
	29	-13	07		29	-6	11
Febrero	1	-13	38	Agosto	1	-6	07
	8	-14	23		8	-5	37
	15	-14	27		15	-4	38
	22	-13	54		22	-3	12
Marzo	1	-12	47	Septiembre	1	-0	27
	8	-11	12		8	+2	07
	15	-9	16		15	+4	20
	22	-7	07		22	+6	54
	29	-4	53		29	+9	23
Abril	1	-3	57	Octubre	1	+10	04
	8	-2	08		8	+12	17
	15	+0	13		15	+14	08
	22	+1	23		22	+15	30
	29	+2	35		29	+16	16
Mayo	1	+2	58	Noviembre	1	+16	25
	8	+3	32		8	+16	15
	15	+3	39		15	+15	25
	22	+3	20		22	+13	54
	29	+2	37		29	+11	47
Junio	1	+2	13	Diciembre	1	+11	05
	8	+1	05		8	+8	19
	15	+0	14		15	+5	12
	22	-1	38		22	+1	53
	29	-3	00		29	+1	29

TABLA 2.2 Valores de la ecuación del tiempo en distintos días del año.

Problema 2.1

Especificar la posición del sol el día 21 de mayo a las 10:00 (tiempo solar), en un lugar en que la latitud norte es igual a  $24^\circ$ .

Solución

De la ecuación 2.1 para  $n = 141$  ó de la tabla 2.1

$$D = 23.45 \operatorname{sen}\left(360\left(\frac{284 + 141}{365}\right)\right) = 20.14^\circ$$

Haciendo uso de la ecuación 2.2,

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \# &= \operatorname{sen}(24^\circ) \operatorname{sen}(20.14^\circ) \operatorname{sen}(30^\circ) + \operatorname{sen}(24^\circ) \operatorname{sen}(20.14^\circ) \\ &= (0.91)(0.94)(0.87) + (0.41)(0.34) \\ &= 0.88 \end{aligned}$$

Por lo tanto  $\# = 62.08^\circ$ .

Similarmente, de la ecuación 2.3,

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \& &= \operatorname{sen}(20.14^\circ) \operatorname{sen}(30^\circ) / \operatorname{sen}(62.08^\circ) \\ &= (0.94)(0.54) / (0.47) \\ &= 1.00 \end{aligned}$$

En consecuencia,  $\& = 90^\circ$ .

Es decir, el sol se encuentra en el oriente y a un ángulo de  $62.08^\circ$  sobre la horizontal.

Problema 2.2

Calcular el tiempo solar a las 12:00 horas el día 22 de enero en Monterrey, N. L. México (se encuentra en las coordenadas  $25^\circ 40'N$ ,  $100^\circ 18'W$ ).

Solución

Según la tabla 2.2,  $E = -11$  min 28 seg. Recurriendo a la ecuación 2.6,

$$\begin{aligned} \text{Tiempo solar} &= 12:00h - 11.47 \text{ min} + 4(90 - 100.30) \\ &= 12:00h - 52.67 \text{ min} \\ &= 12:00h - 52 \text{ min } 40 \text{ seg} \\ &= 11:00h + 7 \text{ min } 20 \text{ seg} \end{aligned}$$

Radiación directa sobre una superficie inclinada.

Considera ahora una superficie inclinada, un ángulo  $\beta$  con respecto a un plano horizontal y que forma un ángulo acimutal  $\lambda_s$  con respecto al sur.

En estas circunstancias, como se observa en el esquema de la fig. 2.4., el ángulo de incidencia  $\theta$  de la radiación directa queda definido como el ángulo entre la normal a la superficie y el haz de radiación.

La relación entre  $\theta$  y los otros ángulos está dada por la expresión,

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \cos D \sin L \cos \beta - \cos D \cos L \sin \beta \cos \lambda_s \\ & + \cos D \cos L \cos \beta \cos W + \cos D \sin L \sin \beta \cos \lambda_s \cos W \\ & + \cos D \sin \beta \sin \lambda_s \sin W \quad \text{ec. (2.7)} \end{aligned}$$

Varios casos de la ec. 2.7 son de interés:

-Superficie horizontal.

En este caso  $\beta = 0^\circ$  y  $\theta = \theta_z$ , según la ec. 2.7

$$\cos \theta_z = \cos D \sin L + \cos D \cos L \cos W \quad \text{ec. (2.8)}$$

Nótese que esta expresión es idéntica a la ec. 2.2

-Superficie inclinada hacia el sur, por ejemplo, un selector plano.

Haciendo referencia a la fig. 2.5 se observa que el ángulo de incidencia  $\theta$  es idéntico al ángulo acimutal, para una superficie horizontal localizada en un lugar en que la latitud es igual a  $(L - S)$ , en consecuencia, de la ec. 2.8

$$\cos \theta = \cos D \sin (L - S) + \cos D \cos (L - S) \cos W \quad \text{ec. (2.9)}$$

-Superficie vertical orientada hacia el sur.

En este caso  $S = 90^\circ$  y  $\lambda_s = 0^\circ$ , según la ec. 2.7:

$$\cos \theta = -\cos D \cos L + \cos D \sin L \cos W \quad \text{ec. (2.10)}$$

A menudo es necesario conocer la radiación directa sobre una superficie inclinada cuando solamente se conoce la componente sobre un plano horizontal.



FIGURA 2.3 Radiación directa sobre un plano horizontal y sobre una inclinada.

Haciendo referencia a la fig. 2.3 puede definirse el cociente de la radiación directa sobre un plano inclinado  $I_{b,c}$  a la radiación directa sobre un plano horizontal  $I_{b,h}$ , es decir,

$$R_b = \frac{I_{b,c}}{I_{b,h}} = \frac{I_b \cos \Theta}{I_b \cos \Theta_z} = \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_z} \quad \text{ec. (2.II)}$$

Si la superficie se encuentra inclinada hacia el sur pueden emplearse las ecs. 2.8 y 2.9 y sustituyendo en la ec. 2.II, se tiene;

$$R_b = \frac{\sin D \sin (L - S) + \cos D \cos (L - S) \cos W}{\sin D \sin L + \cos D \cos L \cos W} \quad \text{ec. (2.I2)}$$

### Problema 2.3

Determinar el cociente  $R_b$  para una superficie vertical orientada hacia el este.

#### Solución

Según la ecuación 2.7, para  $S = 90^\circ$  y  $\alpha_s = 90^\circ$ ,

$$\cos \Theta = \cos D \sin W$$

Por lo tanto de la ecuación 2.II

$$R_b = \frac{\cos D \sin W}{\sin D \sin L + \cos D \cos L \cos W} \quad W=0^\circ$$

### Problema 2.4

Supóngase que se tiene un colector orientado hacia el sur con un ángulo igual a  $35^\circ$  en un lugar en el que la latitud es de  $25,67^\circ$  N. Determinar el cociente  $R_b$  a las 12:00 del día 21 de junio (solsticio de verano).

#### Solución

De la tabla 2.I,  $D = 23,43^\circ$ . Haciendo uso de la ecuación 2.I2,

$$R_b = \frac{\sin(23,43^\circ) \sin(25,67^\circ - 35^\circ) + \cos(23,43^\circ) \cos(25,67^\circ - 35^\circ)}{\sin(23,43^\circ) \sin(25,67^\circ) + \cos(23,43^\circ) \cos(25,67^\circ)}$$

$$\frac{(0,398)(-0,162) + (0,918)(0,987)}{(0,398)(0,433) + (0,918)(0,901)}$$

$$= 0,843$$





Estimación de la radiación solar. (H<sub>g</sub>)

Para predecir o evaluar el funcionamiento de cualquier sistema de conversión de energía fototérmica se hace necesario conocer la magnitud de la radiación solar directa y difusa que llega a un lugar dado sobre la superficie de la tierra.

En algunos países desarrollados existe información histórica experimental horaria, diaria y mensual acerca de la magnitud de la radiación solar en distintos sitios. Sin embargo, en países subdesarrollados o en vías de desarrollo generalmente se carece de esta información histórica y sólo se cuenta con estimaciones mensuales promedio como en México, ver figs. 2.6 y 2.7:

- Radiación diaria promedio sobre superficies inclinadas. (H<sub>t</sub>)

Existen varios modelos para calcular la radiación total diaria promedio sobre una superficie inclinada a partir de datos de radiación diaria promedio sobre un plano horizontal. Uno de ellos es el desarrollado por Liu y Jordan<sup>(1)</sup> el cual considera que la radiación solar incidente sobre un plano inclinado H<sub>t</sub>; 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.

$$\bar{H}_t = \bar{I}_b, h \cdot \bar{R}_b + \bar{I}_d, h \cdot \bar{R}_d + (\bar{I}_b, h + \bar{I}_d, h) \cdot \bar{R}_p \quad \text{ee. (2.13)}$$

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.

El factor  $\bar{R}_b$  es una función de la transmitancia de la atmósfera (excepto durante los equinoccios), y depende de la nubosidad atmosférica, la concentración de vapor de agua y otras partículas.

Sin embargo, Liu y Jordan sugieren que  $\bar{R}_b$  puede estimarse como el cociente de la radiación extraterrestre sobre la superficie inclinada y la correspondiente a una superficie horizontal para el mes en cuestión.

$$\bar{R}_b = \frac{W_s \text{ sen } D \text{ sen } (L - S) + \text{cos } D \text{ cos } (L - S) \text{ sen } W_s}{W_s \text{ sen } D \text{ sen } L + \text{cos } D \text{ cos } L \text{ sen } W_s} \quad \text{ee. (2.14)}$$

$\bar{R}_b$  = factor de conversión de la radiación directa.

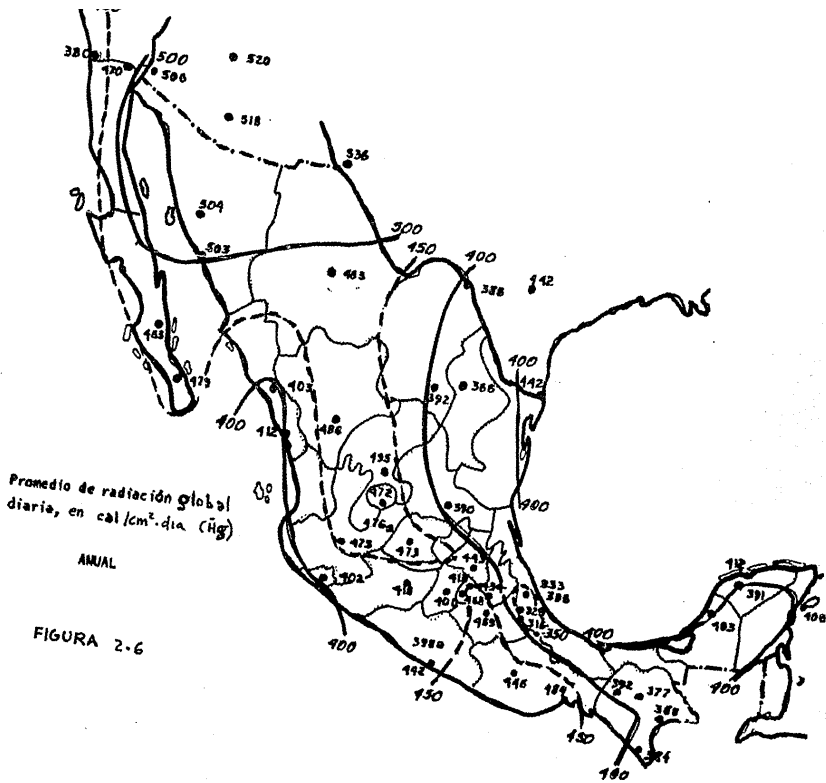


FIGURA 2-6



Por otra parte, la radiación difusa no sólo varía en intensidad dependiendo de los contenidos atmosféricos de vapor de agua, polvo, etc, sino que también varía en distribución angular con los cambios en las condiciones atmosféricas. Si se supone que la radiación procedente de la bóveda celeste es isotrópica, esto es, si se supone que es uniforme en todas las direcciones, entonces puede demostrarse que el cociente de la radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada un ángulo  $S$ , y la radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal es igual a  $(1 + \cos S)/2$ . Dado que este cociente es independiente de la posición del sol en el firmamento.

$$\bar{R}_d = \frac{1 + \cos S}{2} = \text{factor de conversión de la radiación difusa.} \quad \text{ee. (2.15)}$$

Similarmenete, dado que la mayoría de los materiales que constituyen el suelo (césped o pasto, concreto, arena, tierra, etc,) reflejan la radiación solar de una manera más o menos difusa, aquí se supondrá que la reflexión es perfectamente difusa.

$$\bar{R}_p = \frac{1 - \cos S}{2} p = \text{factor de conversión de la radiación reflejada.} \quad \text{ee. (2.16)}$$

La tabla 2.3 muestra algunos valores de  $p$  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.

Superficie	Albedo (p)
Desierto	0.24 - 0.28
Campos, varios tipos	0.03 - 0.23
Bosque, verde	0.03 - 0.10
Pasto, varias condiciones	0.14 - 0.37
Suelo, común	0.07 - 0.20
Moña, negro	0.03 - 0.19
Arena, seca	0.18 - 0.40
Arena, húmeda	0.09 - 0.18
Hielo o nieve	0.49 - 0.86
Agua ( $\alpha = 47^\circ$ )	0.02
Agua ( $\alpha = 5.5^\circ$ )	0.71

TABLA 2.3 Albedos de distintas superficies.

$p$  = considerando que el suelo localizado frente a la superficie inclinada es muy grande y tiene una reflectancia hemisférica uniforme o albedo ( $p$ ).

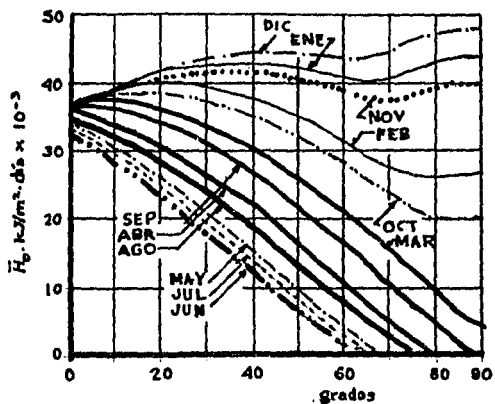


FIGURA 2.8 Radiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal, para puntos medios del mes, latitud sur. ( $H_0$ )

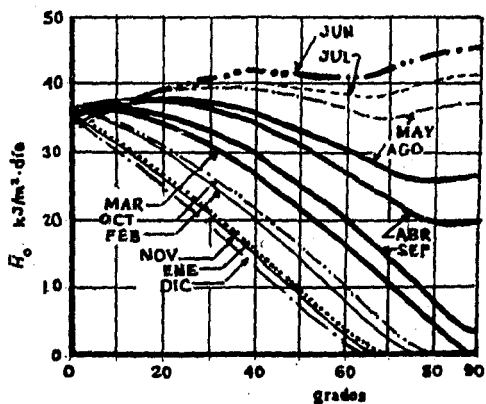


FIGURA 2.9 Radiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal para puntos medios del mes, latitud norte. ( $H_0$ )

Combinando las ecs. 2.13, 2.15 y 2.16.

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_t}{\bar{H}_g} = \left(1 - \frac{\bar{I}_{d,h}}{\bar{H}_g}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{I}_{d,h}}{\bar{H}_g} \bar{R}_d + \bar{R}_p \quad \text{ec. (2.17)}$$

o bien,

$$\bar{H}_t = (\bar{H}_g - \bar{I}_{d,h}) \bar{R}_b + \bar{I}_{d,h} \frac{1 + \cos S}{2} + \bar{H}_g \frac{1 - \cos S}{2} p \quad \text{ec. (2.18)}$$

Cabe apuntar que la componente de la radiación  $\bar{I}_{d,h}$  rara vez se conoce, por lo que es necesario estimarla a partir de un conocimiento de la radiación global diaria promedio en el mes.

Liu y Jordan, así como Page<sup>(20)</sup>, sugieren la siguiente expresión para evaluar el cociente  $\bar{I}_{d,h}/\bar{H}_g$ ,

$$\frac{\bar{I}_{d,h}}{\bar{H}_g} = \begin{cases} 1.390 - 4.027\bar{K}_t + 5.531\bar{K}_t^2 - 3.108\bar{K}_t^3 & \text{(Liu y Jordan) ec. (2.19)} \\ 1.00 - 1.13\bar{K}_t & \text{(Page) ec. (2.20)} \end{cases}$$

donde  $\bar{K}_t$  es el cociente de la radiación global diaria promedio en un mes a la radiación extraterrestre diaria promedio sobre una superficie horizontal en el mismo mes. Es decir,

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}_g}{\bar{H}_o} \quad \text{ec. (2.21)}$$

Finalmente para evaluarse la radiación total diaria promedio en un mes para una superficie inclinada.

$$\bar{H}_t = \bar{R} \bar{H}_g = \bar{R} \bar{K}_t \bar{H}_o \quad \text{ec. (2.22)}$$

Los valores de  $\bar{H}_o$  se muestran en las figs. 2.8 y 2.9 y en la tabla 2.4 y 2.5

$$\bar{H}_o = \frac{24}{\pi} I_{es} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) (\cos L \cos D \cos W_s + W_s \sin L \sin D) \quad \text{ec. (2.23)}$$

$n$  = día del año en que la radiación diaria extraterrestre es numéricamente igual en forma aproximada al valor medio de ese mes,

$$I_{es} = 1353 \text{ W/m}^2 = 1.940 \text{ cal/min.cm}^2 \text{ ó } 428 \text{ Btu/h.pie}^2.$$

Mes	Días en el año (n)	Fecha
Enero	17	Enero 17
Febrero	47	Febrero 16
Marzo	75	Marzo 16
Abril	105	Abril 15
Mayo	135	Mayo 15
Junio	162	Junio 11
Julio	198	Julio 17
Agosto	228	Agosto 16
Septiembre	258	Septiembre 15
Octubre	288	Octubre 15
Noviembre	318	Noviembre 14
Diciembre	344	Diciembre 10

TABLA 2.4 Día promedio recomendada para cada mes. (n)

Latitud Norte	Enc	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
20	26 644	30 359	34 307	37 515	38 834	39 144	38 893	37 864	35 300	31 402	27 512	23 519
25	23 902	28 115	32 848	37 111	39 356	40 046	39 606	37 832	34 238	29 413	24 509	22 009
30	21 034	25 679	31 141	36 436	39 569	40 706	40 071	37 534	32 917	27 213	22 161	19 714
35	18 069	23 072	29 200	35 498	39 530	41 129	40 292	36 976	31 548	24 820	19 296	16 687
40	15 043	20 515	27 040	34 305	39 247	41 329	40 281	36 166	29 542	22 255	16 344	13 626
45	11 898	17 443	24 677	32 869	38 737	41 382	40 033	35 118	27 515	19 541	13 344	10 379
50	8 987	14 490	22 151	31 209	38 025	41 147	39 044	33 851	25 283	16 705	10 342	7 609
55	6 082	11 486	19 423	29 345	37 152	40 883	39 100	32 391	22 863	13 778	7 206	4 791
60	3 398	8 486	16 576	27 308	36 188	40 585	38 513	30 779	20 277	10 798	4 598	2 277

TABLA 2.5 Radiación extraterrestre diaria promedio en el mes,  $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{día}$ . ( $\bar{H}_0$ ).



Radiación instantánea sobre superficies inclinadas. (Ht)

Para evaluar el comportamiento térmico a lo largo del día de un sistema de conversión de energía solar, se hace necesario conocer también los valores instantáneos de radiación total Ht sobre cualquier superficie.

Aun cuando obviamente estos valores pueden determinarse experimentalmente, en muchas circunstancias no se dispone de instrumentación necesaria, o más comúnmente, se desea que sean valores representativos de un día típico, evitándose así la irregularidad de las condiciones meteorológicas que puedan prevalecer en un día específico.

Se tienen los siguientes factores de conversión;

$$rd = \frac{I_{d,h}}{I_{d,h}} = \text{factor de conversión de la radiación difusa instantánea. ee. (2.24)}$$

donde  $I_{d,h}$  es la componente de radiación difusa sobre un plano horizontal en cualquier instante y

$$rg = \frac{H_g}{H_g} = \text{factor de conversión de la radiación global instantánea. ee (2.25)}$$

donde  $H_g$  es la radiación global en cualquier instante.

Los factores rd y rg dependen fundamentalmente de dos variables: la hora del día, expresada por medio del ángulo horario  $W_s$ .

Liu y Jordan han mostrado que rd puede valorarse mediante la relación,

$$rd = \frac{\pi \cos W - 360 W_s}{T \sin W_s - W_s \cos W_s} \quad \text{ee. (2.26)}$$

$$T = 24 \text{ h.}$$

Similarmente, el factor de conversión rg puede calcularse mediante la relación

$$rg = \frac{\pi \cos W - \cos W_s}{T \sin W_s - W_s \cos W_s} (a + b \cos W) \quad \text{ee. (2.27)}$$

donde los parámetros a y b están dados por las expresiones,

$$a = 0.409 + 0.5016 \operatorname{sen} (W_s - 1.047) \quad \text{es. (2.28)}$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \operatorname{sen} (W_s - 1.047) \quad \text{es. (2.29)}$$

$$1.047 \operatorname{rad} := 60^\circ$$

se tiene que

$$R = \frac{H_t}{H_g} = \left(1 - \frac{I_{d,h}}{H_g}\right) R_b + \frac{I_{d,h}}{H_g} R_d + R_p \quad \text{es. (2.30)}$$

alternativamente

$$H_t = (H_g - I_{d,h}) R_b + I_{d,h} \frac{1 + \cos S}{2} + H_g \frac{1 - \cos S}{2} p \quad \text{es. (2.31)}$$

En esta expresión  $R_b$  esta dada por la es. 2.II

La es. 2.31 permite evaluar a cada instante la radiación total que incide sobre cualquier superficie inclinada (colectores planos, paredes de una casa, etc.), en el caso particular de colectores orientados hacia el sur (en el hemisferio norte), el uso de las distintas ecuaciones presentadas en este capítulo permite demostrar que la máxima captación de energía solar se tiene cuando el ángulo de inclinación  $S$  es aproximadamente igual a la latitud del lugar,  $L$ . Similarmente, la máxima captación durante el invierno se logra cuando la inclinación  $S$  es igual a  $(L + 10^\circ)$ , el ángulo más adecuado durante el verano debe de ser alrededor de  $(L - 10^\circ)$ .

La figura 2.10 muestra la inclinación para colectores fijos en la latitud norte.

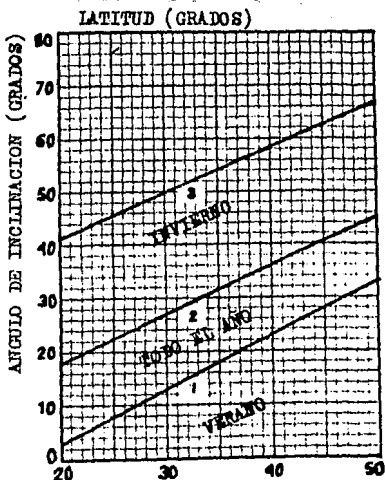


Figura 2.10

Problema 2.5

¿Que radiación diaria promedio incide sobre un colector solar plane inclinado y orientado hacia el sur, en la ciudad de Salina Cruz Oax., en el mes de diciembre?,

Solución

De la tabla 7. se tiene que Salina Cruz, se encuentra en la Latitud  $16^{\circ} 10' N$ , (1), y de la figura 2.7 se tiene una radiación global ( $\bar{H}_g$ ) de  $436 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{día}$  para el mes de diciembre.

Tomando de la tabla 2.4 el día promedio recomendado para cada mes que para nuestro caso es diciembre 10 que es igual a  $n=344$ , se tiene de la tabla 2.1 la declinación (D) =  $-22^{\circ} 54'$ .

La radiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal ( $\bar{H}_o$ ) se calcula de la figura 2.9; y tiene un valor  $\bar{H}_o = 27000 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$

La inclinación de ese colector para fines de diseño sera  $\beta = 16^{\circ} 10' + 10^{\circ} = 26.16^{\circ}$

En consecuencia de la ecuación 2.21

$$\bar{K}_t = \frac{436(41860)}{27000} = \frac{18251 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}}{27000 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}} = 0.68$$

$$\bar{K}_t = 0.68$$

De la ecuación 2.20,

$$\frac{\bar{I}_{d,h}}{\bar{H}_g} = 1 - 1.13(0.68) = 0.232$$

$$\bar{I}_{d,h} = 0.232(18251) = 4214 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día} / 86.4 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día} = 49 \text{ W/m}^2$$

Por otra parte, según la ecuación 2.4 para el día 10 de diciembre,

$$\cos W_s = -\tan(16.16^{\circ}) \tan(422.54^{\circ}) = 0.120$$

$$\cos W_s = 0.120$$

$$W_s = 83^{\circ} = 1.45 \text{ rad.}$$

Ahora bien, según la ecuación 2.14,

$$\bar{R}_b = \frac{(1.45) \cos(-22.9^{\circ}) \cos(-10^{\circ}) + \cos(-22.9^{\circ}) \cos(-10^{\circ}) \sin(83^{\circ})}{(1.45) \cos(-22.9^{\circ}) \cos(16.16^{\circ}) + \cos(-22.9^{\circ}) \cos(16.16^{\circ}) \sin(83^{\circ})} = \frac{0.9993}{0.7258} = 1.377$$

$$\bar{R}_b = 1.377$$

y sustituyendo valores en la ecuación 2.17,

$$\bar{R} = (1 - 0.232)(1.377) + (0.232) \frac{1 + \cos(26.16^\circ)}{2} + \frac{1 - \cos(26.16^\circ)}{2}(0.2) =$$

$$\bar{R} = 1.288$$

Finalmente de la ecuación 2.22

$$\bar{H}_t = 1.288(0.68)(27000) = 23648 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$$

$$\bar{H}_t = \frac{23648}{86.4} = 273 \text{ W/m}^2$$

¿ Que radiación incide en el mismo colector a las 12:00 ?.

En consecuencia de la ecuación 2.5, la longitud del día es:

$$T_d = \frac{2}{15} (83^\circ) = 11.07 \text{ horas.}$$

$$W = 12:00 = 0^\circ$$

También, de la ecuación 2.26,

$$r_d = \frac{\pi \cos(0^\circ) - \cos(83^\circ)}{24 \sin(83^\circ) - 1.45 \cos(83^\circ)} = \frac{\pi}{24} \frac{1 - (0.122)}{(0.992) - (0.177)} =$$

$$r_d = 0.141$$

De la ecuación 2.24

$$I_{d,h} = 0.141(4234) = 597 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{hora} / 3.6 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{hora} = 166 \text{ W/m}^2$$

$$I_{d,h} = 166 \text{ W/m}^2$$

Ahora de las ecuaciones 2.28, 2.29 y 2.27,

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(83^\circ - 60^\circ) =$$

$$a = 0.409 + 0.5016(0.391) =$$

$$a = 0.605$$

$$b = 0.6609 - 0.4767(0.391) =$$

$$b = 0.475$$

$$r_g = 0.141(0.605 + 0.475 \cos(0^\circ)) =$$

$$r_g = 0.152$$

De la ecuación 2.25

$$H_g = 0.152(18251) = 2774 \text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} / 3.6 \text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} = 770 \text{ W/m}^2$$

Ahora de la ecuación 2.12

$$R_b = \frac{\text{sen}(-22.9^\circ) \text{sen}(-10^\circ) + \text{cos}(-22.9^\circ) \text{cos}(-10^\circ) \text{cos}(0^\circ)}{\text{sen}(-22.9^\circ) \text{sen}(16.16^\circ) + \text{cos}(-22.9^\circ) \text{cos}(16.16^\circ) \text{cos}(0^\circ)} =$$

$$R_b = \frac{0.970}{0.776} =$$

$$R_b = 1.25$$

Por lo tanto, de la ecuación 2.31 para  $p = 0.2$

$$H_t = (770 - 166)(1.25) + 166(0.949) + 770(0.01) =$$

$$H_t = 920 \text{ W/m}^2$$

## CAPITULO III

Fórmulas de diseño de un  
colector solar.

### Diseño de un colector plano.

Las partes más importantes de un colector plano típico se muestran esquemáticamente en la siguiente figura.

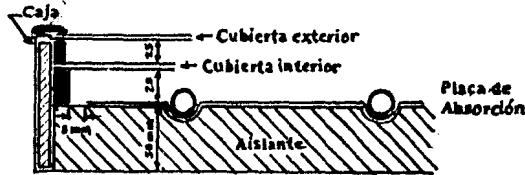


FIGURA 2-1 Corte transversal de un colector plano con dos cubiertas de vidrio.

Como puede observarse la energía solar atraviesa una o varias cubiertas para luego quedar en la placa de absorción.

El calor es posteriormente transferido por conducción hacia los tubos, llegando eventualmente por convección hacia el fluido de trabajo (agua, aire, etc.).

El aislante en la parte inferior y los lados del colector sirve para disminuir las pérdidas de calor de la placa de absorción hacia el ambiente.

Todo el conjunto se encuentra dentro de una caja que puede ser metálica, de plástico o de otro material. Son varios los parámetros más importantes en el diseño de un colector solar. Es importante conocer lo siguiente: el material de los tubos, su diámetro nominal, su longitud, el número de tubos y su espaciado; el número y el tipo de espesor y el acabado superficial de la placa de absorción; el número y tipo de cubierta; el espesor y el tipo de aislante; el flujo de masa y medio de trabajo; la inclinación del colector con respecto a la horizontal; etc. Todos los parámetros tienen mayor o menor importancia en el diseño de un colector solar de acuerdo con el tipo de aplicación fototérmica a la que va a destinarse. Así, los niveles de temperatura que debe alcanzar el fluido de trabajo en el colector son sustancialmente distintos si se trata del agua para una piscina o alberca, del calentamiento del agua para el uso doméstico, etc. En el caso del calentamiento del agua de una piscina se requiere que alcance una temperatura de aproximadamente 22 a 29°C, por lo que los colectores pueden tener un diseño muy simple. Similarmente, en el calentamiento de agua para el consumo doméstico requiere que se encuentre de 35 a 60°C.

-Balance de energía.

El balance de energía en un colector plano indica que sólo una fracción de la radiación total incidente sobre él,  $HtAc$ , puede utilizarse en el medio de trabajo, dado que una parte se pierde hacia los alrededores por conducción, convección, y re-radiación; otra se pierde por las características propias de reflexión de la cubierta y la placa de absorción, ( $\gamma_c$ ); y una última puede ser almacenada en el colector mismo. La última parte usualmente es despreciable. Este balance de energía puede expresarse analíticamente como,

$$HtAc(\gamma_c) = \text{útil} + \text{pérd.} + \frac{du}{dt} \quad \text{ec. (3.1)}$$

en donde  $Ac$  es el área efectiva del colector, útil es el calor útil que es transportado hacia el fluido de trabajo,  $\text{pérd.}$  corresponde a las distintas pérdidas de calor que experimenta el colector, y  $du/dt$  es el cambio de la energía interna almacenada en el colector, generalmente despreciable.

Por otra parte, se define aquí la eficiencia del colector como la fracción de la radiación solar incidente sobre su superficie que puede ser aprovechada como calor útil. Este es,

$$\eta_c = \frac{\text{útil}}{HtAc} \quad \text{ec. (3.2)}$$

-Pérdidas de calor.

Las pérdidas de calor en un colector solar pueden expresarse por una relación de la forma:

$$\text{pérd.} = U_L A_c (T_p - T_a) \quad \text{ec. (3.3)}$$

en donde  $U_L$  es el coeficiente total de pérdidas de calor,  $T_p$  es la temperatura promedio de la placa de absorción y  $T_a$  la temperatura ambiente.

La evaluación numérica del coeficiente total de transferencia de calor requiere de un análisis detallado de todas las distintas pérdidas de calor.

Los pasos a seguir en el diseño de un colector solar son los siguientes:

1. Se supone una temperatura promedio  $T_p$  en la placa de absorción del colector
2. Se calcula el coeficiente total de transferencia de calor  $U_L$ .
3. Se evalúa el factor de eficiencia del colector  $F'$  para la configuración geométrica en cuestión.



4. Se determina el factor de remoción de calor Fr o la temperatura del fluido a la descarga Tfs.
5. Se calcula el calor útil en el selector y la eficiencia del mismo.
6. Se verifica el valor de la temperatura Tp supuesto, con un balance de energía.

Las expresiones que se necesitan para diseñar un selector y de acuerdo al orden dado anteriormente;

1. Se supone la temperatura Tp.

2. El coeficiente total de transferencia de calor  $U1 = U_{fende} + U_{sup.} + U_{lade}$ ;  
 $U_{fende} = \frac{K_a}{l}$  ec. (3.5) ec. (3.4)

$K_a$  = conductividad térmica del aislante, W/m.K. (tabla 3.2).

$l$  = espesor del aislante, m.

Para calcular el coeficiente total de transferencia de calor por la parte superior, Hettel y Wehrtz así como Klein, sugieren la siguiente expresión; cuando el ángulo de inclinación es igual a  $45^\circ$ .

$$U_{sup.} = \left( \frac{n}{(344 / T_p) (T_p - T_a) / (n + f)^{0.3T} + \frac{1}{H_v}} \right)^{-1} + \frac{\tilde{N}(T_p + T_a) (T_p^2 + T_a^2)}{(E_p + 0.0425n(1 - E_p))^{-1} + (2n + f - 1) / (E_s - n)} \quad \text{ec. (3.6)}$$

donde,

el coeficiente de transferencia de calor en una placa expuesta al viento,

$$H_v = 5.7 + 3.8 V$$

$H_v$  está en  $W/m^2.K$  y la velocidad del viento  $V$  está en m/s.

$n$  = número de cubiertas.

$T_p$  = temperatura promedio en la placa de absorción, en  $^\circ K$ .

$T_a$  = temperatura ambiente, en  $^\circ K$ . (tabla 3.3).

$E_p$  = emitancia de la placa de absorción en el infrarrojo (pintura negra).  
(tabla 3.4)

$E_s$  = emitancia del vidrio en el infrarrojo. (tabla 3.5)

$\tilde{N} = 5.6697 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$  que es la cte. de Stefan-Boltzmann.

$$f = (1 - 0.04H_v + 0.0005H_v^2) (1 + 0.058n)$$



TABLA 3.1 CONTINUACIÓN

METAL (% Aleación)	(Propiedades a 20°C)				Conductividad térmica, W/m·K										
	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg·K	$k$ W/m·K	$\alpha$ m <sup>2</sup> /s	-100°C	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C
<b>Cobre:</b>															
puro	8934	0.3881 × 10 <sup>6</sup>	386	11.234 × 10 <sup>-6</sup>	407	386	375	374	369	363	353				
bronce-aluminio (85 Cu, 5 Al)	8666	0.410	83	2.350											
bronce (75 Cu, 25 Sn)	8666	0.343	28	0.839											
latón rojo (83 Cu, 9 Sn, 6 Zn)	8719	0.385	81	1.804			39	71							
latón (70 Cu, 30 Zn)	8522	0.388	111	3.412	88		129	144	147	147					
plata alemana (62 Cu, 18 Ni, 22 Zn)	8419	0.394	24.9	0.753	18.2		31	40	45	45					
constantan (60 Cu, 40 Ni)	8322	0.410	22.7	0.612	21		22.2	26							
<b>Magnesio:</b>															
puro	1746	1.015	171	9.708	178	171	168	163	157						
Mg-Al (electrolítica) (6-8 Al, 1-2 Zn)	1810	1.00	66	3.603			32	62	74	83					
Mg-Mn (2 Mn)	1773	1.00	119	6.382	93	111	128	130							
Mg-Mn (2 Mn)	1778	1.00	114	6.382	93	115	125	130							
<b>Molibdeno:</b>	10220	0.251	123	4.750	138	125	118	114	111	109	106	102	99	92	
<b>Níquel:</b>															
puro	8906	0.445 <sup>o</sup>	90	2.266	104	93	83	75	64	59					
impuro (84.2%)	8906	0.444	69	1.747	69	64	58	53	52	55	62	67	69		
Ni-Cr (50 Ni, 10 Cr)	8646	0.444	17	0.444	12.1	18.3	20.9	22.8	24.6						
(80 Ni, 20 Cr)	8214	0.444	12.4	0.343	12.3	12.8	18.6	17.1	18.9	22.5					
<b>Plata:</b>															
de la más pura	10524	0.2340	419	17.094	415	417	415	412							
pura (99.9%)	10524	0.2340	407	16.563	415	410	415	374	362	360					
<b>Tungsteno:</b>	19330	0.1394	165	6.271	166	161	142	133	126	112	76				
<b>Zinc, puro:</b>	7144	0.3813	112.2	4.106	114	112	108	106	108	89					
<b>Estado, puro:</b>	7304	0.2265	64	3.884	0.74	63.9	59	57							

TABLA 3.2 Propiedades térmicas de algunos materiales

Material	T °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg·K	$k$ W/m·K o C	$\alpha$ m <sup>2</sup> /s
Algodón	20	80	1.30 × 10 <sup>3</sup>	0.050	0.184 × 10 <sup>-6</sup>
Asbesto	-200	469.3		0.074	
	0	469.5		0.186	
	100	576.7	0.816	0.192	
	200	576.7		0.208	
	400	576.7		0.229	
Baquelita	20	1275.5	1.59	0.232	0.0114
Carbón (antracita) pulverizado	20	1201-1508	1.26	0.76	0.013-0.015
	30	737	1.30	0.116	0.013
Concreto	20	1906-2307	0.88	0.81-1.40	0.049-0.070
Corcho, hoja	30	160		0.043	
Granito				1.7-4.0	
Hielo	0	913	1.93	2.22	0.124
Hule (caucho), duro	0	1198.2		0.151	
Ladrillo, seco	20	1762-1810	0.84	0.35-0.52	0.022-0.034
Mérmol	20	2499-2707	0.888	2.8	0.130
Tierra	20	2030	1.84	0.92	0.0139
Vidrio, fibra	20	260.2	0.67	0.040	0.028
Vidrio, hoja	20	2707	0.8	0.76	0.034

Simbolos: T temperatura  
 $\rho$  densidad  
 $c_p$  calor específico  
 $k$  conductividad térmica  
 $\alpha$  difusividad térmica

TABLA 3.3 Temperatura media mensual.

Localidad	Lat. N	Long. W	Altitud (s.n.m.) m	Meses											
				E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Acapulco, Gro.	16°50'	99°56'	3	26.2	26.4	26.8	27.4	28.6	28.7	29.5	29.3	27.8	28.1	28.0	27.1
Agua Calientes, Agu.	21°53'	102°18'	1 875	13.5	15.2	18.4	20.1	21.5	22.3	20.1	20.0	20.0	18.0	16.4	13.3
Campeche, Camp.	19°51'	86°32'	25	23.1	24.2	24.3	27.5	28.9	29.0	28.1	28.2	27.9	26.8	25.7	22.4
Colima, Col.	19°14'	102°45'	450	22.7	23.0	24.1	25.1	26.1	26.5	25.6	23.7	24.8	24.8	24.7	22.9
Cukulcán, Sin.	24°48'	107°24'	53	20.0	20.6	21.9	24.4	27.1	29.5	28.4	28.7	29.5	28.2	22.5	21.4
Chetumal, Q. Roo.	18°50'	88°20'	4	23.5	23.9	25.1	26.5	27.3	27.5	27.7	27.8	27.5	26.0	24.9	24.4
Chihuahua, Chih.	28°38'	106°08'	1 423	11.8	13.7	16.6	19.7	23.1	28.0	23.5	24.7	24.4	19.9	14.4	10.2
Chilpancingo, Gro.	17°32'	99°30'	1 340	19.2	19.9	21.0	22.4	22.5	22.4	21.1	21.6	20.9	20.9	20.3	19.3
Ensenada, B.C.	31°53'	116°33'	3	12.7	13.8	14.0	15.2	16.4	17.6	19.6	20.3	20.0	18.4	15.7	13.8
Guadalupe, Jal.	20°41'	103°20'	1 589	14.1	16.2	19.3	21.1	22.0	22.5	20.1	20.2	20.3	18.9	17.7	14.8
Guaymas, Gto.	27°01'	107°15'	2 037	13.7	16.0	18.0	19.6	20.5	19.0	19.0	18.0	17.9	16.6	17.1	13.6
Guaymas, Son.	27°55'	110°53'	4	18.5	20.0	21.1	24.2	25.7	30.6	31.4	31.0	31.8	29.6	24.5	19.6
Hermosillo, Son.	29°05'	110°52'	211	16.9	17.8	20.2	24.6	26.8	32.5	32.4	31.4	31.5	28.0	20.3	17.4
Jalisco, Ver.	19°32'	96°56'	1 299	14.7	16.4	18.5	18.8	20.6	20.1	19.1	18.6	18.5	17.5	17.0	15.2
Juárez, Co. Chih.	31°44'	106°29'	1 127	6.1	7.2	12.5	18.7	24.4	28.2	29.1	23.2	24.7	18.2	11.8	8.7
Ledón, Gto.	21°07'	101°41'	1 809	15.5	17.5	20.0	22.3	23.0	19.3	20.6	20.9	21.4	19.1	18.1	15.4
Manzanillo, Col.	19°04'	104°20'	3	23.4	24.3	24.4	24.9	26.9	28.0	28.2	28.1	27.7	27.2	27.0	20.3
Mazatlán, Sin.	23°11'	106°25'	10	20.4	20.6	20.3	21.8	24.6	27.3	28.2	28.4	28.3	27.7	24.7	21.3
Merida, Yuc.	20°58'	89°31'	22	21.5	23.7	25.5	24.8	28.1	27.9	26.9	27.4	27.0	26.2	25.0	22.9
México, D.F.	19°34'	99°08'	2 108	13.8	14.4	17.4	17.7	18.5	18.2	17.4	17.7	16.6	16.0	14.0	14.3
Monterrey, N.L.	23°40'	100°18'	538	15.0	16.2	19.3	22.1	25.8	28.3	28.1	28.9	26.0	22.7	18.4	14.5
Mordis, Mich.	19°42'	101°07'	1 923	14.1	15.9	18.4	19.9	20.3	20.4	18.6	18.7	18.4	17.2	16.8	14.2
Oaxaca, Oax.	12°04'	96°42'	1 563	19.0	19.2	21.7	22.9	23.0	22.6	21.1	21.8	21.1	20.0	19.7	18.1
Pachuta, Hgo.	20°08'	98°44'	2 400	12.1	13.4	15.6	16.3	15.8	15.3	14.2	14.7	13.3	12.9	13.4	11.5
La Paz, B.C.	24°10'	110°18'	19	18.9	19.9	20.6	22.9	24.1	26.4	28.5	29.8	28.9	26.4	23.1	20.1
P. Negras, Coah.	28°42'	100°31'	220	12.1	14.6	17.6	21.2	28.7	35.0	29.6	27.2	22.2	22.5	13.8	10.7
Puebla, Pue.	19°03'	98°12'	2 150	15.3	14.8	18.3	19.5	19.5	19.4	17.6	18.5	16.9	16.7	16.0	13.9
Querétaro, Gra.	20°26'	100°23'	1 842	14.9	18.8	20.4	20.9	21.3	21.6	20.2	20.1	19.2	17.6	13.9	13.5
Río Verde, S.L.P.	21°56'	100°00'	987	14.1	17.5	19.9	21.6	24.8	28.4	23.7	24.4	22.7	20.7	18.3	15.3
Salina Cruz, Oax.	16°10'	98°12'	17	25.4	25.7	26.9	29.0	29.5	28.5	28.6	28.5	27.1	27.4	27.2	23.2
Saltillo, Coah.	25°26'	101°00'	1 689	12.4	14.3	15.6	17.7	21.2	22.9	22.4	22.5	19.9	17.1	15.4	11.6
S. Luis Potosí, S.L.P.	22°09'	108°58'	1 877	13.7	15.7	18.3	20.4	22.0	21.6	20.0	20.3	19.6	17.4	16.7	14.4
Tampico, Tamps.	22°13'	97°51'	4	19.0	20.5	21.9	23.8	26.3	27.8	27.5	28.1	26.7	23.5	22.8	19.1
Topichula, Chih.	14°54'	92°16'	137	25.0	28.5	28.8	27.8	27.8	26.1	26.0	26.3	25.5	23.5	21.1	22.2
Tepic, Nayar.	21°91'	104°54'	922	17.6	18.0	18.7	20.0	21.6	23.5	23.3	23.7	22.1	22.9	22.7	18.4
Torreón, Coah.	25°32'	103°23'	140	15.3	18.3	20.3	23.6	27.1	29.4	27.9	27.3	25.4	22.9	18.3	14.2
Tuxtla Gtz. Chis.	16°45'	93°06'	524	21.0	22.4	25.3	26.1	27.2	28.0	25.5	24.6	24.7	23.9	22.8	20.8
Veracruz, Ver.	19°12'	96°08'	16	21.6	22.4	23.7	25.1	27.2	28.2	27.6	28.1	27.3	26.1	24.6	22.4
Zacatecas, Zac.	22°47'	102°34'	2 616	9.7	11.0	13.2	15.1	15.9	16.4	14.5	15.2	14.2	13.6	12.5	9.5

TABLA 3.3. Valores de emitancia y absorptancia de diferentes superficies.

Superficie	$\epsilon / ^\circ\text{C}$			$\alpha$
Aluminio: puro	0.182	0.180	0.113	0.09-0.10
	300	300	600	
oxidado	0.242	0.780	0.669	0.12-0.16
	25	221	301	
Cromo	0.290	0.365	0.435	0.415
	449	632	799	
Cobre: pulido	0.041	0.036	0.039	0.35
	65	190	330	
Oro	0.028	0.040	0.048	0.20-0.23
	2	196	395	
Hierro	0.071	0.110	0.175	0.44
	-74	196	395	
Niquel	0.10	0.10	0.12	0.36-0.43
	37	196	395	
Pintura: negro mate	0.981	0.981		0.98
	-23	189		
blanco (ZnO)	0.928	0.926	0.869	0.12-0.16
	32	205	373	

TABLA 3.4. Valores de emitancia hemisférica total a distintas temperaturas.

Superficie	Temperatura, $^\circ\text{C}$	$\epsilon$
Aluminio: pulido	93	0.05
Cromo: pulido	150	0.058
Cobre: pulido	20	0.030
ligeramente oxidado	20	0.037
oxidado	151	0.76
Oro: pulido	130	0.018
Hierro: pulido	400	0.022
vaciado, oxidado	84	0.06
Niquel: pulido mate	93	0.61
pulido	100	0.041
100	0.045	
Latón: pulido	38	0.05
oxidado	38	0.46
Pintura: blanco	100	0.925
rojo	100	0.93
Mármol blanco	38	0.93
Papel	95	0.92
Arena	38	0.83
Agua (0.1 mm de espesor o más)	38	0.96

	Transmisión Luz	Transmisión Calor
Vidrio claro 3 mm	85%	84%
Cristal fletado claro 4 mm	85%	84%
Cristal fletado claro 5 mm	85%	84%
Cristal fletado claro 6 mm	85%	84%
Cristal fletado gris 6 mm	42%	61%
Cristal fletado bronce 6 mm	50%	67%

TABLA 3.5 Transmisión de calor de vidrios y cristales.

En forma general, para otros ángulos de inclinación  $S$  diferentes de  $45^\circ$ .

$$\frac{Usup.}{Usup. 45^\circ} = \frac{1 - ((S - 45) (0.00259 - 0.00144S))}{1} \quad \text{ec. (3.7)}$$

Usup. está en  $W/m^2 K$

$$U_{lades} = \frac{K_a A \cdot P}{l' A_c} \quad \text{ec. (3.8)}$$

donde,

$K_a$  = conductividad térmica del aislante, en  $W/m.K$ .

$A$  = altura del colector, en m.

$l'$  = espesor del aislante para los lados de la placa de absorción, en m.

$P$  = perímetro del colector, en m.

$A_c$  = área del colector, en  $m^2$ .

$U_{lades}$  está en  $W/m^2.K$ .

3. El factor de eficiencia  $F'$  de un colector se calcula de la siguiente manera:

$$F' = \frac{1/U_l}{\left[ \frac{1}{U_l (D + (W - D)F)} + \frac{1}{D_i H_f \pi} \right] W} \quad \text{ec. (3.9)}$$

donde,

el denominador, constituye la resistencia térmica entre el fluido y el ambiente, mientras que el numerador corresponde a la resistencia térmica entre la superficie del colector y el aire ambiente.

$D_i$  = diámetro interior del tubo de cobre, en m. (Tabla 3.5)

$D$  = diámetro exterior del tubo de cobre, en m. (Tabla 3.5)

$W$  = longitud entre ejes de tubos, en m.

$\pi = 3.1416$

$H_f$  = coeficiente de transferencia de calor, en  $W/m^2.K$ .

$H_f$  para convección forzada en el interior de un tubo circular, en el que la temperatura de la pared es cte. y el régimen es laminar; Hausen recomienda la siguiente expresión empírica para calcular el valor promedio del número de Nusselt:

$$Nu = \frac{HfDi}{Ka} = 3.66 + \frac{0.0668 (Di/L) Re Pr}{1 + 0.04 ((Di/L) Re Pr)^{2/3}} \quad \text{ec. (3.I0)}$$

Re = número de Reynolds.

Pr = número de Prandtl, se saca de la tabla 3.I.

L = longitud del tubo, en m.

Ka = conductividad térmica, en W/m .K (H<sub>2</sub>O) (tabla 3.6)

Hf = coeficiente de transferencia de calor, en W/m<sup>2</sup>.K.

Para flujo turbulento completamente desarrellado en tubos lisos, Dittus y Be-  
elter sugieren la siguiente correlación:

$$Nu = \frac{HfDi}{Ka} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad \text{ec. (3.II)}$$

las propiedades en esta expresión se evalúan a la temperatura media del flui-  
de y el exponente n adquiere un valor de 0.4 para calentamiento, o bien 0.3  
para enfriamiento, el uso de tubos de diámetro pequeño conducen a valores más  
del coeficiente de transferencia de calor, pero, los costes de bombeo también  
son elevados en estas circunstancias.

La ec. 3.II es aplicable a fluidos cuyos números de Prandtl varían entre 0.7 y  
120, y en casos en que la diferencia de temperaturas entre la pared del tubo  
y el fluido es moderada, el número de Reynolds debe ser mayor de 10<sup>4</sup> y L/Di  
debe ser mayor que 60.

Para determinar si el flujo es laminar o turbulento,

$$Re = \frac{\dot{m}}{\eta Di \rho v} \quad \text{ec. (3.I2)}$$

donde,

ρ = densidad, en kg/m<sup>3</sup>.

v = viscosidad cinemática, en m<sup>2</sup>/s.

$\dot{m}$  = flujo másico, en l/s.

Di = diámetro interior, en m.



TABLA 3.5 Características del tubo de cobre

TIPOK

Tamaño pulg	Medidas nominales, pulg			Valores calculados con base en las medidas nominales			
	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de pared	Área transversal libras, pulg <sup>2</sup>	Superficie externa, pie <sup>2</sup> /pie	Superficie interna, pie <sup>2</sup> /pie	Peso, lib/pie
3/8	.375	.305	.035	.075	.038	.040	0.145
1/2	.500	.402	.049	.127	.131	.105	0.269
3/4	.625	.527	.049	.218	.164	.138	0.344
7/8	.750	.652	.049	.334	.196	.171	0.418
1	.875	.745	.065	.436	.229	.195	0.501
1 1/8	1.125	.995	.065	.778	.294	.261	0.898
1 1/4	1.375	1.245	.065	1.22	.360	.325	1.04
1 1/2	1.625	1.481	.072	1.72	.425	.389	1.36
2	2.125	1.959	.085	3.01	.536	.515	2.08
2 1/2	2.625	2.435	.099	4.66	.687	.638	2.93
3	3.125	2.907	.109	6.64	.818	.761	4.00
3 1/2	3.625	3.385	.120	9.00	.949	.876	5.12
4	4.125	3.887	.124	11.7	1.08	1.01	6.31
5	5.125	4.805	.160	18.1	1.34	1.26	9.67
6	6.125	5.741	.182	23.9	1.60	1.50	13.2
8	8.125	7.583	.271	48.2	2.15	1.98	23.9
10	10.125	9.449	.338	70.1	2.65	2.47	40.3
12	12.125	11.315	.405	101.	3.17	2.88	57.8

TIPOL

3/8	.375	.315	.030	.075	.038	.032	0.124
1/2	.500	.450	.025	.145	.131	.113	0.198
3/4	.625	.545	.040	.233	.164	.148	0.285
7/8	.750	.666	.042	.348	.196	.174	0.362
1	.875	.788	.048	.484	.229	.206	0.455
1 1/8	1.125	1.025	.050	.825	.294	.268	0.695
1 1/4	1.375	1.265	.055	1.26	.360	.331	0.944
1 1/2	1.625	1.505	.060	1.78	.425	.394	1.14
2	2.125	1.985	.070	3.09	.536	.520	1.75
2 1/4	2.625	2.465	.080	4.77	.687	.645	2.40
3	3.125	2.945	.090	6.81	.817	.771	3.33
3 1/2	3.625	3.425	.100	9.21	.949	.897	4.33
4	4.125	3.905	.110	12.0	1.08	1.02	5.28
5	5.125	4.875	.125	18.7	1.34	1.22	7.61
6	6.125	5.845	.140	26.5	1.60	1.53	10.2
8	8.125	7.725	.200	46.9	2.15	2.02	18.5
10	10.125	9.625	.280	72.8	2.65	2.53	28.1
12	12.125	11.565	.380	109.	3.17	3.03	40.4

TIPOM

Tamaño pulg	Medidas nominales, pulg.			Valores calculados con base en las medidas nominales			
	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de pared	Área transversal libras, pulg <sup>2</sup>	Superficie externa, pie <sup>2</sup> /pie	Superficie interna, pie <sup>2</sup> /pie	Peso, lib/pie
3/8	.500	.420	.028	.158	.131	.118	0.148
1/2	.625	.548	.028	.254	.164	.149	0.204
3/4	.875	.811	.032	.517	.229	.212	0.328
1	1.125	1.055	.035	.874	.294	.278	0.468
1 1/8	1.375	1.291	.042	1.31	.360	.348	0.628
1 1/4	1.625	1.527	.049	1.95	.425	.400	0.940
2	2.125	2.009	.058	3.17	.536	.526	1.46
2 1/4	2.625	2.495	.065	4.89	.687	.663	2.03
3	3.125	2.981	.072	6.98	.818	.795	2.68
3 1/2	3.625	3.499	.083	9.40	.949	.906	3.38
4	4.125	3.955	.095	12.2	1.08	1.03	4.66
5	5.125	4.907	.108	18.9	1.34	1.27	6.66
6	6.125	5.881	.122	27.1	1.60	1.54	9.02
8	8.125	7.785	.170	47.6	2.15	2.04	18.5
10	10.125	9.761	.212	73.9	2.65	2.54	28.4
12	12.125	11.617	.284	108.	3.17	3.04	38.7

TIPODWV

1 1/8	1.375	1.296	.040	1.32	.360	.339	.89
1 1/2	1.625	1.541	.042	1.87	.425	.403	.91
2	2.125	2.041	.042	3.27	.536	.534	1.07
3	3.125	3.030	.045	7.21	.818	.793	1.69
4	4.125	4.009	.056	12.6	1.08	1.05	2.37
5	5.125	4.881	.072	19.5	1.34	1.30	4.43
6	6.125	5.899	.085	27.9	1.60	1.56	6.10
8	8.125	7.967	.109	49.1	2.15	2.07	10.6

- Símbolos: T temperatura  
 ρ densidad  
 C<sub>p</sub> calor específico  
 ν viscosidad cinemática  
 k conductividad térmica  
 α difusividad térmica  
 Pr número de Prandtl  
 β dilatabilidad volumétrica

T °C	ρ kg/m <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> J/kg·K	ν m <sup>2</sup> /s	k W/m·K	α m <sup>2</sup> /s	Pr	β K <sup>-1</sup>
Agua. H <sub>2</sub> O							
0	1000.00	4.2178 × 10 <sup>3</sup>	1.788 × 10 <sup>-6</sup>	0.532	1.208 × 10 <sup>-7</sup>	18.6	0.18 × 10 <sup>-3</sup>
20	999.82	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.02	
40	991.20	4.1794	0.652	0.628	1.512	4.24	
60	983.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.02	
80	974.98	4.1854	0.361	0.668	1.586	2.22	
100	960.43	4.2181	0.294	0.680	1.620	1.74	
120	948.28	4.280	0.247	0.688	1.709	1.446	
140	928.27	4.283	0.214	0.694	1.724	1.241	
160	909.69	4.342	0.190	0.690	1.729	1.099	
180	893.03	4.417	0.173	0.678	1.724	1.004	
200	868.76	4.505	0.160	0.665	1.706	0.937	
220	842.41	4.618	0.150	0.652	1.680	0.931	
240	815.66	4.786	0.145	0.645	1.639	0.871	
260	788.27	4.949	0.157	0.611	1.577	0.874	
280.6	753.33	5.208	0.188	0.589	1.491	0.910	
300	714.26	5.728	0.188	0.540	1.324	1.018	

TABLA 3.5 Propiedades del agua en estado de saturación.

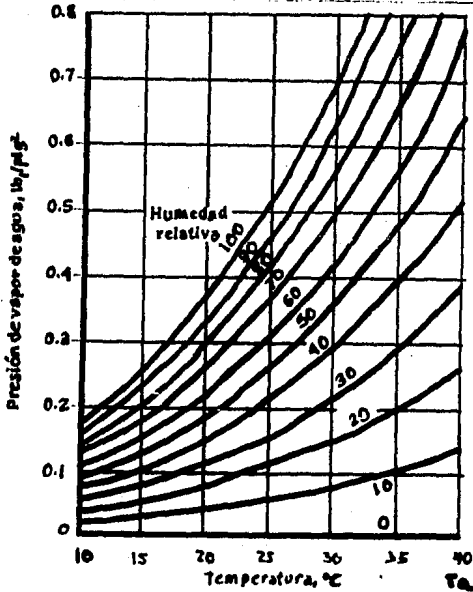


TABLA 3.7 Relación entre la presión de agua, humedad relativa y T<sub>a</sub>

$$F = \frac{\tanh(m(W-D)/2)}{m(W-D)/2} \quad \text{es, (3.I3)}$$

donde,

$$m = \sqrt{UI/KaEe}$$

$Ee$  = espesor de la placa, en m.       $Ka$  = conductividad térmica de la placa

$D$  = diámetro exterior del tube en m.

también se puede calcular  $F$  con la siguiente tabla:

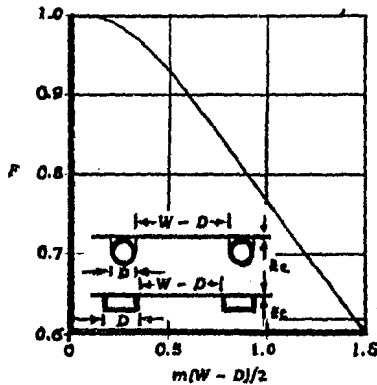


TABLA 3.8

4. El factor de recuperación de calor  $Fr$  e la Temperatura del fluido a la descarga se determinan de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{\dot{m}Cp}{AcUl} (1 - \exp(-UIF'Ac/\dot{m}Cp)) \quad \text{es. (3.I4)}$$

este parámetro relaciona el calor útil que se obtiene efectivamente en el colector, con el que se obtendría si toda la superficie del colector se encontrara a la temperatura del fluido a la entrada, ( $Tfe$ ).

Cp = calor específico del agua, en J/kg.K.  
 todos los demás parámetros son conocidos.

$$T_{fs} = \frac{Fr(Ac(R - U_l(T_{fe} - T_a))}{\dot{m}C_p} + T_{fe} \quad \text{ec. (3.15)}$$

donde,

$$R = Ht(\tau_a) \text{ en } W/m^2$$

Ht = radiación solar incidente sobre el plano del colector, en  $W/m^2$ .

$\tau_a$  = producto de la reflexión de la cubierta y la placa de absorción.

$$\tau_a = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - (\tau_1 - \tau_2)Pd} \quad \text{ec. (3.16)}$$

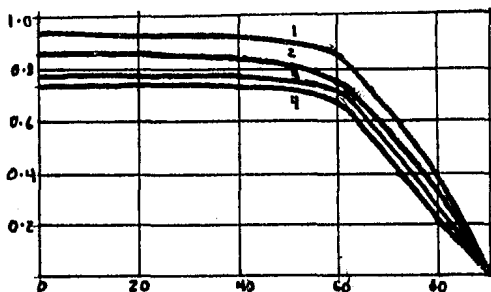
Pd = la reflectancia difusa, tienen los siguientes valores según el número de cubiertas:

1	0.16
2	0.24
3	0.29
4	0.32

El valor de  $\tau_1$ , el cual es la absorptancia de la pintura negra está dado, según el ángulo de incidencia  $\theta$ .

$\theta^\circ$	$\tau_1$
0 - 30	0.96
30 - 40	0.95
40 - 50	0.93
50 - 60	0.91
60 - 70	0.88
70 - 80	0.81
80 - 90	0.66

El valor de  $\eta$ , está dado en la siguiente grafica



$T_{fe}$  - está es conocida por lo gral. fluctua entre 10 y 15°C.

todos los demás parámetros son conocidos.

Para estimar la temperatura máxima que puede alcanzar el fluido en un colector plano, es de mucha importancia para la selección de los materiales de este; y conociendo que la eficiencia térmica del colector es igual a cero a esta temperatura, y las condiciones de estancamiento (o flujo igual a cero), sobrepasarían el límite de operación de alguno de sus componentes, por lo que se tiene la siguiente expresión para calcularla:

$$T_{fs, \text{máx.}} = T_a + \frac{R}{U_1} \quad \text{ec. (3.17)}$$

5. El calor útil y la eficiencia del colector se determinan a continuación:

$$q_{\text{útil}} = A_c F_r (R - U_1 (T_{fe} - T_a)) \quad \text{ec. (3.18)}$$

$$\eta_c = F_r (T_a) - F_r U_1 \frac{T_{fe} - T_a}{H_t} \quad \text{ec. (3.19)}$$

todos los parámetros son conocidos.

6. La verificación de la temperatura  $T_p$  supuesta, se realiza con un balance de energía.

De la ecuación 3.I,

$$RAe = AeFr(R - U_l(T_{fe} - T_a)) + U_lAe(T_p - T_a)$$

despejando  $T_p$ , tenemos;

$$T_p = \frac{RAe - AeFr(R - U_l(T_{fe} - T_a))}{U_lAe} + T_a \quad \text{ec. (3.20)}$$

El proceso I a 6 se repite hasta que coincidan los valores supuestos y calculados de  $T_p$ .

### Problema 3.I

Haciendo referencia al ejemplo 2.5 tenemos que la radiación solar incidente promedio para el mes de diciembre es igual a  $273 \text{ W/m}^2$ , se quiere estimar la temperatura de salida del agua, para ese mismo colector que tiene las siguientes características:

Area del colector ( $A_c$ ).	$9 \text{ m}^2$
Altura del colector ( $A$ ).	$1.32 \text{ m}$
Conductividad térmica de tubos de cobre ( $K_a$ ).	$386 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Conductividad térmica del aislante, fibra de vidrio ( $K_a$ ).	$0.04 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Diámetro interior tubos ( $D_i$ ).	$0.01 \text{ m}$
Diámetro exterior tubos ( $D$ ).	$0.013 \text{ m}$
Perímetro del colector ( $P$ ).	$12 \text{ m}$
Longitud entre ejes de tubos ( $W$ ).	$0.15 \text{ m}$
Emitancia de la pintura negra ( $\epsilon_r$ ).	$0.9$
Longitud de los tubos ( $L$ ).	$3 \text{ m}$
Espesor de la placa de cobre ( $\epsilon_c$ ).	$0.0005 \text{ m}$
Emitancia del vidrio en el infrarrojo ( $\epsilon_g$ ).	$0.88$
Velocidad del viento en Salina Cruz Oax. ( $V$ ).	$10.00 \text{ m/s}$
Espesor del aislante por el fondo y los lados ( $l$ y $l'$ ).	$0.0254 \text{ m}$
Temperatura del ambiente ( $T_a$ ).	$25 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura del agua de suministro ( $T_{fe}$ ).	$10 \text{ }^\circ\text{C}$

Angulo de inclinación del colector ( $\beta$ ).	26.16 °
Espaciamente entre la placa de absorción y el vidrio.	0.025 m
Producto de la reflexión de la cubierta y la placa. ( $\rho_J$ ).	0.8
Flujo masico ( $h$ ).	0.015 l/s
Número de cubiertas en el colector ( $n$ )	1

### Solución

De acuerdo a los pasos a seguir en el diseño de un colector heliostático:

- 1) Se supone una temperatura  $T_p = 30^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C} = 303^\circ\text{K}$
- 2) El coeficiente total de transferencia de calor  $U_1$  lo sacamos de la siguiente manera:

De la ecuación 3.5,

$$U_{fondo} = \frac{0.04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}{0.0254 \text{ m}} = 1.57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Con la ecuación 3.6,

$$R_v = 5.7 + 3.8(10) = 43.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} = 44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$f = (1 - 0.04(44) + 0.0005(44)^2) (1 + 0.058(1)) = 0.22$$

$$U_{sup.} = \frac{1}{45} \left( \frac{1}{(344/303)(303-298)/(1+0.2)^{0.31}} + \frac{1}{43.7} + \right.$$

$$\left. + \frac{5.67(10)^{-8} (303+298)(303^2 + 298^2)}{(0.90+0.0425(1) (1-0.90))^{-1} + (2(1)+(22-1.0)/(0.88-1))} \right) =$$

$$= (0.1864 \cdot 0.023)^{-1} + (6.155/-10.16) = 4.0$$

$$U_{sup.} = 4.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Ahora bien de la ecuación 3.7,

$$U_{sup.} = (1 - ((26.16-45)(0.00259-0.00144(0.9))))(4.0) =$$

$$U_{sup.} = 1.024(4.0) = 4.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Con la ecuación 3.8

$$U_{lades} = \frac{0.04(1.32)(12)}{0.0254(9)} = 2.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Ahora sustituyendo estos valores en la ecuación 3.4,

$$U_1 = 1.57 + 4.1 + 2.77 = 8.44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3) El factor de eficiencia  $F^*$  lo obtenemos de la ecuación 3.9 y sus parámetros

son:

De las ecuaciones 3.I7, 3.I2, 3.I0 e 3.II, 3.I3 tenemos,

$$T_{fs, \text{m} \acute{a}x.} = 25^{\circ} + (218/8.44) = 51^{\circ}$$

$$\Delta T = 51 - 10 = 41^{\circ} = T_{fs, \text{m} \acute{a}x.} - T_{fe}$$

De la tabla 3.8, interpolando se obtiene lo siguiente,

$$\rho = 994.2 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 4.179 (10)^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\nu = 0.649 \text{ m}^2/\text{s} (10)^{-6}$$

$$k = 0.629 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\alpha = 1.514 \text{ m}^2/\text{s} (10)^{-7}$$

$$Pr = 4.274$$

$$Re = \frac{4(0.015)}{(0.01)(993.2)(0.631(10)^{-6})} = 2960 < 10^4$$

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668(0.01/3)(3048)(4.142)}{1 + 0.04[(0.01/3)(3048)(4.142)]^{2/3}} = 5.56$$

$$h_f = \frac{5.56(0.631)}{0.01} = 351 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$n = \sqrt[3]{\frac{7.92}{386(0.0005)}} = 6.6$$



$$F = \frac{\tanh(6.4(0.15 - 0.013)/2)}{6.4(0.15 - 0.013)/2} = 0.94 \quad \bullet \text{ bien de la grafica 3.1}$$

$$F' = \frac{\tau/8.44}{0.15 \left( \frac{\tau}{8.44(0.013 + (0.150 - 0.013)(0.94)} + \frac{\tau}{0.01(\pi)(351)} \right)}$$

$$F' = 0.86$$

- 4) El factor de remoción  $F_r$  y la temperatura del fluido a la descarga  $T_{fs}$  se obtienen de las ecuaciones 3.14 y 3.15 de las cuales se sacan los siguientes valores:

$$F_r = \frac{0.015(4179)}{9(8.44)} (1 - \exp(-8.44(0.86)(9)/(0.015(4179))))$$

$$F_r = 0.53$$

$$T_{fs} = \frac{0.53(9)(218 - 8.44(10 - 25))}{0.015(4179)} + 10 = 36.6^\circ\text{C}$$

$$T_{fs} = 36.6^\circ\text{C}$$

- 5) El calor útil y la eficiencia del colector se calculan con las ecuaciones 3.18 y 3.19 con los siguientes resultados:

$$Q_{\text{útil}} = 9(0.53)(218 - 8.44(10 - 25)) = 1657 \text{ W}$$

$$\eta_c = 0.53(0.8) - 0.53(8.44)((10 - 25)/273) = 0.68 = 68\%$$

- 6) Se verifica si  $T_p$  supuesta y calculada son iguales con la ecuación 3.20

$$T_p = \frac{218(9) - 1657}{9(8.44)} + 25 = 4.14 + 25 = 29.2 \approx 30$$

para fines de este ejemplo la consideramos iguales.

## CAPITULO IV

Diseño e instalación de sistemas  
solares de producción de agua  
caliente.

Sistemas de obtención de agua caliente solar.

Los dos sistemas de producción de agua caliente más utilizados actualmente se diferencian en el modo de circulación del agua en el colector solar. En ciertas condiciones, este movimiento del agua entre el colector y el depósito puede producirse por el efecto de termosifón o con la ayuda de una bomba de impulsión.

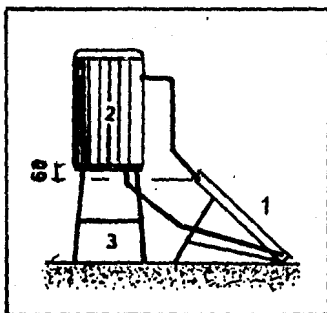
-Sistema de circulación por termosifón.

Un fenómeno muy conocido es que, a igualdad de volumen, el agua caliente es más ligera que el agua fría y que, calentando una cierta cantidad de agua se puede conseguir la circulación del agua de un circuito. Este hecho que suele denominarse "principio de termosifón", puede aprovecharse para la producción de agua caliente con la energía solar.

Gracias a las incidencias de las radiaciones solares, una parte del agua de el circuito del colector se calienta, se desplaza hacia arriba, y la parte más fría se mueve hacia abajo, lo que permite un constante movimiento del agua sin ayuda de bombas.

Para asegurar este tipo de circulación propia. Los depósitos de agua deben estar, como mínimo, 60 cm más altos que el borde superior del colector.

Una instalación para producción de agua caliente por el principio del termosifón puede trabajar en circuito cerrado e en circuito abierto.



**FIGURA 4.1**

*Instalación de producción de agua caliente con circulación por termosifón*

1. Colector solar
2. Depósito calentador del agua
3. Caballete

Sistemas de circuito abierto.

En los sistemas por termosifón en circuito abierto, se hace pasar el agua de la tubería tan lentamente a través de los colectores que en una sola pasada alcanza la temperatura de régimen deseada. Un termostato permite que el agua pase al depósito acumulador cuando se ha alcanzado ya esta temperatura. En este momento se abre una válvula termostática y el agua caliente entra en el depósito, mientras el agua fría vuelve al colector. Cuando el depósito está lleno, una válvula de flotador cierra el flujo de agua fría al colector solar. Al seguirse calentando el colector, se pone en marcha una circulación constante; del depósito sale el agua que se ha ido enfriando a través de la válvula de retorno, pasa al colector y una vez caliente, vuelve al depósito. Cuando la temperatura de funcionamiento en vacío del colector alcanza un valor inferior al requerido, el termostato cierra totalmente el sistema de circuito abierto.

- Sistema de producción de agua caliente solar con circulación por termosifón*  
Sistema de circuito abierto (según Hullmann y Schmidt)
1. Colector solar
  2. Acumulador de agua caliente
  3. Válvula termostática
  4. Válvula de retención
  5. Válvula marcada por flotador
  6. Agua fría
  7. Toma de agua caliente
  8. Rebosadero

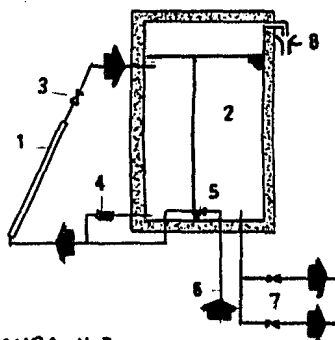


FIGURA 4.2

En un sistema de este tipo, sólo la parte superior del colector solar se calienta. En cambio la parte inferior, por donde entra el agua fría, se mantiene relativamente fría. De esta manera se consigue, como consecuencia de la menor temperatura de régimen, que una gran parte de la superficie del colector tenga mayor rendimiento.

Este hecho permite construir colectores más baratos.

Si se consume agua caliente durante los días en que no hace sol, se reduce la cantidad de agua almacenada, pero la temperatura del agua que queda se mantiene relativamente constante, suponiendo que el depósito esté bien aislado. Sin embargo, si se consume una gran parte de agua caliente, por experiencia se sabe que la que queda se enfría más de prisa. En la mayoría de los casos, en el depósito se instala un calentador eléctrico de 0.5 a 2.0 kW para poder producir también agua caliente durante los días sin sol. El calentamiento del agua se acelera o retarda según la duración del aislamiento.

La toma del agua caliente se realiza por la fuerza de la gravedad a través de una salida situada en el fondo del depósito.

Sólo se dispone de agua caliente en una tubería sin presión.

Cuando es escasa la radiación solar, se sigue disponiendo de agua caliente a la temperatura deseada, pero cada vez en menor cantidad.

Una vez consumida el agua caliente no sale agua de la tubería.

-Ventajas de los sistemas per termosifón con circuito abierto.

Simplicidad y robustos.

No se necesita bomba ni intercambiador de calor.

Construcción económica.

-Inconvenientes de los sistemas de termosifón de circuito abierto.

Se necesitan tuberías relativamente gruesas.

El depósito no puede colocarse en el sótano ni en una posición cualquiera.

No puede elegirse arbitrariamente la composición del colector.

El depósito de agua caliente debe estar cerca del colector.

Es relativamente difícil el control de la temperatura y su regulación.

Si no se controlan debidamente las temperaturas o éstas son demasiado altas (más de 60 °C), se corre el peligro de que se formen incrustaciones calcáreas.

Sistemas de circuito cerrado.

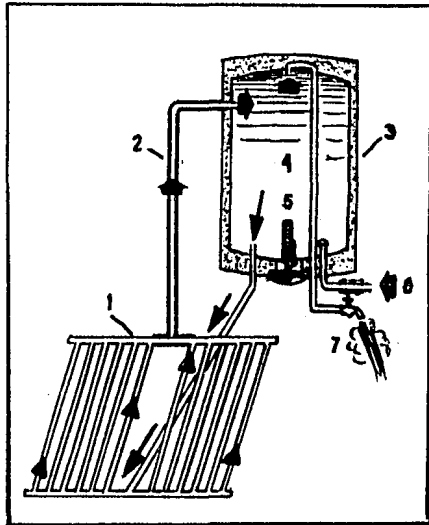
Son mejores las instalaciones de producción de agua caliente por termosifón que trabajan en circuito cerrado. El calentamiento del agua del depósito puede hacerse directamente con un intercambiador de calor.

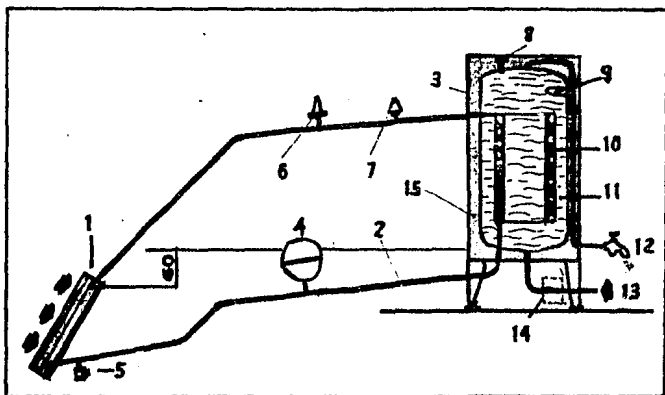
Como el agua del depósito se encuentra a la presión de la red de agua potable, la toma del agua caliente puede hacerse por la parte superior del depósito.

**FIGURA 4-3**

*Sistema de preparación de agua caliente solar con circulación por termosifón (según Keren-Or)*  
 Sistema de circuito cerrado sin intercambiador de calor

1. Colector solar
2. Tubería aislada
3. Calentador de agua
4. Agua caliente
5. Calentador eléctrico
6. Agua fría
7. Agua caliente





Sistema de producción de agua caliente solar con circulación por termosifón.

Sistema de circuito cerrado con: intercambiador de calor.

- |                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. Colectores solares          | 9. Elemento calentador eléctrico |
| 2. Circuito primario (aislado) | 10. Intercambiador de calor      |
| 3. Calentador de agua          | 11. Agua                         |
| 4. Depósito de expansión       | 12. Grifo de agua caliente       |
| 5. Llave de vaciado            | 13. Entrada de agua fría         |
| 6. Válvula de seguridad        | 14. Grupo de seguridad           |
| 7. Válvula de purga de aire    | 15. Aislamiento                  |
| 8. Termostato                  |                                  |

FIGURA 4.4

-Sistemas con bomba de circulación.

Si se quieren evitar los inconvenientes, relativamente numerosos de la instalación con circulación per termosifón, la circulación del agua puede con seguirse por medio de un sistema de bombas. En este caso, suele hacerse pa sar el agua del depósito a través del colector y volver al depósito circu lando con tanta velocidad que en cada vuelta sólo se calienta unos pocos grados. El agua del colector circula por una red cerrada de tuberías que se denomina círculo del colector, la cesión del calor se hace en un inter cambiador de calor.

El depósito siempre está lleno, si se consume agua caliente, entra de la red en el depósito la misma cantidad de agua fría.

Este sistema no requiere regulación del caudal, aunque se consuma agua en un día sin sol, la cantidad de agua del depósito sigue siendo la misma, pe ro baja su temperatura. Si el agua no se calienta bastante por la energía solar existe la posibilidad de alcanzar la temperatura necesaria en el depósito por medio de un elemento calefactor eléctrico. El agua del acumulador de agua caliente se encuentra a la presión de la red de agua potable por lo que puede tomarse agua caliente en varias llaves a la vez a la pre sión normal. Intercalando una bomba de circulación en el círculo del co lector se aumenta la velocidad de circulación del agua, por lo que se puede utilizar tuberías de menor calibre. La bomba de circulación de una instala ción pequeña tiene una potencia relativamente pequeña, de unos 15 a 20 vatios.

-Ventajas de los sistemas con bomba de circulación.

Independencia de emplazamiento del acumulador.

Pequeño calibre de las tuberías.

Pueden utilizarse distintos tipos de colectores.

El control de la temperatura es sencillo.

-Inconvenientes de los sistemas con bomba de circulación.

Costes de instalación más elevados.

Se necesita conexión a la red eléctrica.

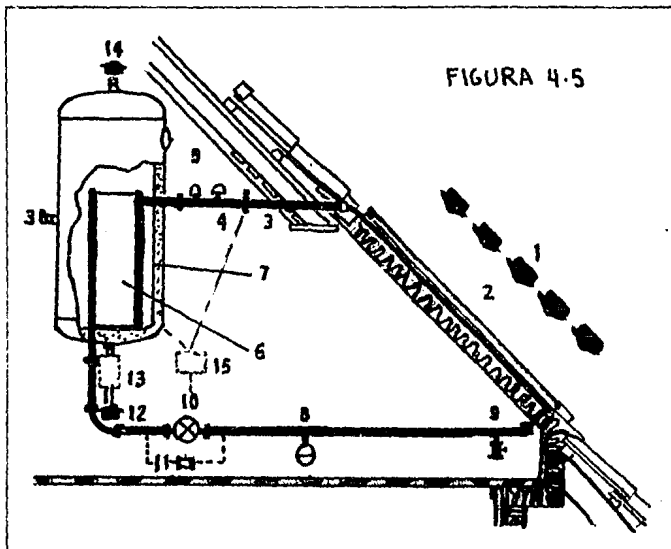
Posibilidad de averías.

Se necesita una regulación muy precisa.

También es posible combinar ambos sistemas utilizando varios depósitos con lo que se pueden conseguir distintas temperaturas en la superficie colecto

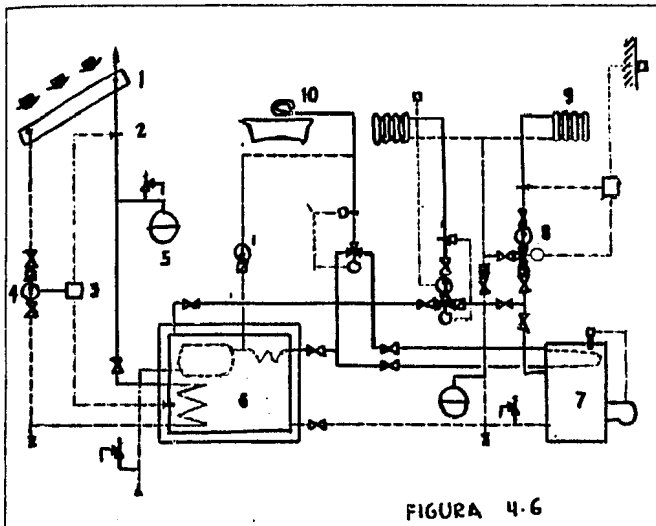


ra y en los depósitos por ser más lento el flujo del agua.



*Sistema de producción de agua caliente solar con bomba aceleradora*  
Circuito cerrado con intercambiador de calor

1. Radiación solar incidente
2. Colectores solares
3. Termostato
4. Válvula de purga para el aire
5. Válvula de seguridad
6. Intercambiador de calor
7. Depósito de agua caliente
8. Depósito de expansión
9. Llave de vaciado
10. Bomba aceleradora
11. By-Pass
12. Agua fría
13. Grupo de seguridad
14. Agua caliente
15. Mandos



*Esquema de un sistema de producción solar de agua caliente sanitaria combinada con la calefacción de locales (sistema ZinCo)*

1. Colectores solares
2. Termostato
3. Mandos
4. Bomba aceleradora
5. Depósito de expansión
6. Acumulador de agua caliente con intercambiador de calor y calentador de agua
7. Caldera auxiliar de calefacción
8. Bomba aceleradora del circuito de calefacción
9. Radiador especial o calefacción de suelo radiante a baja temperatura
10. Toma de agua caliente

*Esquema de principio de un sistema de producción solar de agua caliente combinado con la calefacción por gasóleo ya existente (según Rüesch)*

1. Radiación solar incidente
  2. Colectores solares
  3. Termostato
  4. Válvula de purga de aire
  5. Calentador de agua con aislamiento
  6. Intercambiador de calor
  7. Elemento calentador eléctrico
  8. Bomba aceleradora
  9. Depósito de expansión
  10. Mandos
  11. Calentador eléctrico
  12. Válvula mezcladora de tres vías
  13. Caldera de calefacción combinada
  14. Quemador
  15. Agua fría
  16. Radiador de calefacción
  17. Punto de toma de agua caliente
- A = Instalación ya existente  
B = Instalación solar complementaria

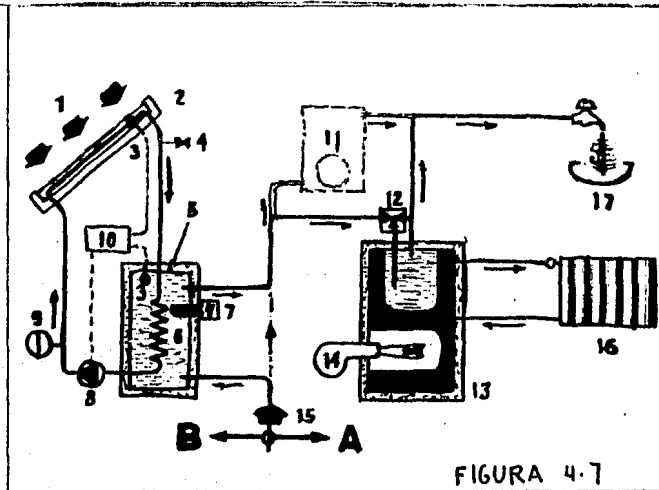


FIGURA 4.7

Criterios comparativos para la adquisición de una instalación solar para producción de agua caliente.

Quien se decida por la adquisición de una instalación para la producción de agua caliente debe pensar, ante todo, si quiere construir él mismo algunas de las partes de la instalación, o si compra un sistema completo y le hace instalar.

Las dificultades técnicas inesperadas que puedan presentarse si la realización lo hace un inexperto elevan a menudo el coste de fabricación.

Si se quiere comprar piezas de la instalación, hay que determinar, ante todo, el tamaño del colector y del acumulador y calcular, en relación con éstos, las dimensiones de los accesorios como tuberías, bombas, etc. Una vez conocidas las dimensiones necesarias de todos los elementos principales de la instalación, se pueden pedir precios para elegir las piezas más favorables.

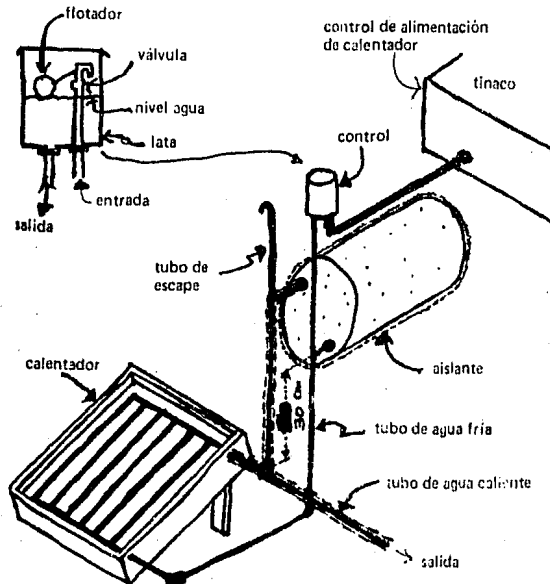


FIGURA 4.8

Diseño de un sistema de calentamiento de agua mediante circulación forzada.

La metodología para el cálculo de un sistema de calentamiento de agua mediante circulación forzada se hace mediante la ecuación 4.2 la cual calcula el gasto de agua a calentar. En forma análoga, la capacidad de la bomba e circulador queda determinada mediante las características propias de ésta, las caídas de presión en el sistema y el caudal de agua a circular.

De la ecuación 3.18, tenemos

$$q_{\text{útil}} = A_c F_r (R - U_l (T_{fe} - T_a)) \quad \text{ec. (3.18)}$$

Similarmente,

$$q_{\text{útil}} = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe}) = \dot{m} C_p \Delta T_f \quad \text{ec. (4.1)}$$

Iguando estas expresiones, y sustituyendo en la ecuación 3.14 se obtiene que

$$\dot{m} = \frac{-U_l F A_c}{C_p [1 - (U_l F \Delta T_f) / (R - U_l (T_{fe} - T_a))]} \quad \text{ec. (4.2)}$$

En la expresión anterior se supone que el factor  $F$  es independiente del flujo de masa, por otra parte se supone que el agua pasa solamente una vez a través del colector.

El funcionamiento térmico en forma transitoria de un tanque de almacenamiento puede obtenerse recurriendo a principios básicos, aquí se considerará el caso más sencillo de un tanque en que el agua se encuentra a temperatura uniforme (totalmente mezclada).

Supongase que  $Q_u$  es el flujo de calor asociado al agua caliente que proviene del colector,  $Z$  es el flujo de calor relacionado con la demanda de agua caliente, y  $U_l A (T - T_a)$  son las pérdidas hacia las alrededores. Un balance de energía en el tanque da como resultado la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{m} C_p \frac{dT}{dt} = Q_u - Z - U_l A (T - T_a) \quad \text{ec. (4.3)}$$

Dado que en general  $Q_u$  y  $Z$  dependen del tiempo, la solución de la ecuación 4.3 puede reescribirse en diferencias finitas como

$$T_{n+1} - T_n + \frac{\Delta t}{m C_p} (Q_u - Z - U_l A (T_n - T_a)) \quad \text{ec. (4.4)}$$

en donde  $T_{n+1}$  es la temperatura del agua después de transcurrir un intervalo de tiempo  $\Delta t$ ;  $Q_u = q_{\text{útil}}$ .

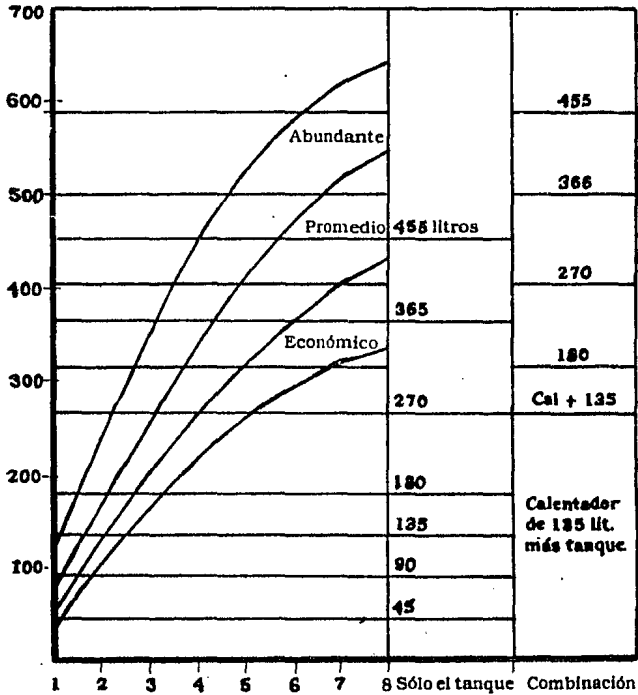


FIGURA 4.7 Tamaño del tanque de almacenamiento para distintos consumos.

Problema 4.1

Se dispone de un colector plano con las siguientes características:

área del colector	$3 \text{ m}^2$
coeficiente de transferencia de calor	$4.2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
factor de eficiencia del colector	0.89
absortancia de la placa de absorción	0.96
transmitancia del vidrio	0.88
radiación promedia sobre el colector	$485 \text{ W/m}^2$
temperatura del agua de suministro	$25 \text{ }^\circ\text{C}$
temperatura ambiente	$21 \text{ }^\circ\text{C}$

Se desea tener agua caliente a  $60^\circ\text{C}$ . Si el tiempo de operación del sistema es igual a 8 h, calcule el caudal diario de agua caliente.

Solución

Según la ecuación 4.2

$$\dot{m} = \frac{-4.2(0.89)(3)}{4186 \ln(1 - (4.2(0.89)(60-25)) / (500(0.96)(0.88) - 4.2(25-21))}$$

$$\dot{m} = 6.879 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

El tamaño del tanque de almacenamiento para ese gaudy tiempo de operación es:

$$m = 6.879(3600)(8) = 198 \text{ kg}$$

el tanque tendrá como mínimo de capacidad 200 litros.

De acuerdo a la figura 4.4 tenemos que este tanque de almacenamiento sirve para detar de agua caliente a 3 personas:

Problema 4.2

En nuestro problema 3.1 tenemos un flujo masico( $\dot{m}$ ) = 0.015 l/s, ¿queremos saber el tamaño de nuestro tanque de almacenamiento así como las pérdidas de calor que habrá en él, si el tiempo de operación del sistema es de 9 horas y la Temperatura  $T_{fs} = 36.6 \text{ }^\circ\text{C}$  ?.

Solución

$$m = 9(3600)(0.015) = 486 \text{ litros}$$

para este volumen tenemos en el mercado nacional tinacos verticales de asbesto cemento de 535 litros, que será nuestro tanque de almacenamiento.

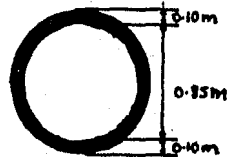
Ahora si al tanque de almacenamiento le aislamos con 10 cm de fibra de vidrio ( $k = 0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) por todos sus lados, y dado que el aislante constituye la mayor resistencia al flujo de calor, las resistencias por convección en el interior del tanque y en el exterior del aislante se despreciarán, así como la resistencia al flujo de calor en el asbesto tenemos:

Características del tanque de almacenamiento.

Diámetro = 0.85 m Longitud = 1.10 m.

Ahora para un tanque cilíndrico tenemos las siguientes expresiones para calcular las pérdidas de calor:

$$q_{\text{paredes}} = \frac{2 \pi k L \Delta T}{\ln(D/D_i)} = \frac{2 \pi (0.04)(1.10)(36.6 - 25)}{\ln(1.05/0.85)} = 15.29 \text{ W}$$



$$q_{\text{tapas}} = 2k \frac{\pi D_i^2 \Delta T}{4 l} = 2(0.04) \frac{\pi (0.85)^2}{4(0.10)} (36.6 - 25) = 5.27 \text{ W}$$

$$U_{IA} = 15.29 + 5.27 = 20.57 \text{ W}$$

Estas pérdidas representan el 11% de la energía útil captada por el colector, ya que la radiación solar sobre los colectores es de  $273 \text{ W/m}^2$  y operan con una eficiencia del 68%.



Haciendo uso de los datos anteriores, la energía almacenada por el agua caliente cuando ésta se calienta de 10 a 36.6 °C es la siguiente:

$$\Delta U = mC_p \Delta T = (486)(4186)(36.6 - 10) = 54.11 \text{ MJ}$$

Una regla de tipo practice dice que el tamaño apropiado de un sistema de almacenamiento es del orden de 75 litros de agua por m<sup>2</sup> de área de colector, o de 300 kJ/m<sup>2</sup>·°C, dentro de los intervalos de 50 a 100 l/m<sup>2</sup> e de 200 a 400 kJ/m<sup>2</sup>·°C:

Ahora con el volumen de agua de 486 litros sirve para detar a 6 personas de acuerdo a la tabla 4.1.

### Problema 4.3

Considere el tanque del problema 4.2 de 535 litros para el que el producto  $\eta_{RA} = 20.57 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . El tanque inicia un periodo de 9 horas con una temperatura de 30 °C, y esta a la temperatura ambiente ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ ), calcule la temperatura del agua de acuerdo con los datos de calor  $Q_u$  y  $Z$  que se indican en la tabla 4.3a.

### Solución

De la ecuación 4.4 tenemos,

$$T_{n+1} = T_n + \frac{3600}{(535)(4186)} ((Q_u - Z) - (20.56(T_n - 25)))$$

Tabla 4.3a

Hora	$Q_u$ , W	$Z$ , W	$T_n$ , °C	$T_{n+1}$ , °C
1	1663	0	30	32.89
2	2345	0	32.89	36.00
3	3678	1567	36.00	39.01
4	4390	0	39.01	45.57
5	5209	0	45.57	53.23
6	6504	2749	53.23	58.31
7	4243	3048	58.31	59.13
8	2539	2943	59.13	57.35
9	1243	5067	57.35	50.17

## CAPITULO V

Diseño e instalación de sistemas  
solares de calefacción para  
albercas.

### Calificación de piscinas aprovechando la energía solar.

El aprovechamiento de la energía solar para la producción de agua caliente sanitaria y para la calefacción de locales se dificulta por el hecho de que la demanda de energía y la radiación solar no alcanza al mismo tiempo sus valores máximos. Para ambos métodos de aprovechamiento se necesitan las mayores cantidades de energía cuando sólo se dispone de un mínimo de energía de radiación.

Este desplazamiento de fases entre la demanda y la disponibilidad de la radiación solar se tiene que compensar por medio del almacenamiento de la energía, que resulta bastante costoso. Las piscinas, que sólo suelen utilizarse cuando hace buen tiempo y principalmente durante la estación de verano, no tienen este inconveniente por lo que pueden considerarse como la posibilidad de aprovechamiento de la energía solar ideal y a mejor precio. La superficie colectorera necesaria para calentar el agua de la piscina, variará según el tipo de colector, el tipo de la piscina y las condiciones climatológicas.

La mayoría de los fabricantes dan como superficie mínima, la mitad de la superficie de la piscina, si ésta está bien aislada y puede cubrirse. Cuanto mayor sea la superficie colectorera, mayores serán los aumentos de temperatura que podrán alcanzarse en el agua de la piscina.

Otras razones técnicas que permiten la economía de la instalación y de su aprovechamiento son las siguientes:

- La temperatura de trabajo de la calefacción de piscinas es baja, y a estas temperaturas, la mayoría de los colectores solares trabajan con un rendimiento muy alto. Por esta razón puede alcanzarse la temperatura necesaria incluso en días casi nublados.
- No se necesitan acumuladores de energía independientes ya que el agua de la piscina constituye por sí misma un buen acumulador de calor.
- En la mayoría de los casos no se necesita calefacción auxiliar porque las piscinas al aire libre no se utilizan durante los periodos prolongados de mal tiempo, y además no se presenta el problema de las sombras proyectada porque, por lo general, las piscinas al aire libre se construyen en zonas soleadas.

El agua en la mayoría de las piscinas o albercas que no cuentan con calentamiento auxiliar sólo tiene una temperatura confortable en algunos meses del año y rara vez se encuentra lo suficientemente tibia durante la tarde o muy temprana por la mañana.

Los requisitos de la temperatura del agua son muy variados; el agua usualmente se calienta a  $22^{\circ}\text{C}$  si la piscina se destinara a competencias deportivas. En el caso de albercas de tipo recreativo el agua usualmente se acondiciona a temperaturas del orden de  $27-29^{\circ}\text{C}$ . Los niños pequeños usualmente requieren temperaturas mayores dado que tienden a enfriarse rápidamente por su alta relación superficie a peso.

El acondicionamiento del agua para albercas o tanques de natación mediante energía solar es sumamente atractivo si se toma en cuenta que las temperaturas requeridas son bajas y los colectores pueden ser de construcción muy sencilla.

#### -Pérdidas de calor

El agua de una alberca en condiciones climatológicas constantes alcanza una temperatura de equilibrio en la que las ganancias de calor son iguales a las pérdidas. Estas últimas se incrementan cuando la temperatura del agua aumenta. Una alberca con agua bien filtrada y una profundidad promedio de 1.60 a 1.70 m, absorbe, para su calentamiento, entre el 75% y 85% de la energía solar incidente. Por otra parte, aproximadamente 5% de esta energía incidente es reflejada sin producir calentamiento.

Debe apuntarse que una fracción de la energía solar incidente (radiación de longitud de onda corta) es capaz de penetrar hasta el fondo o los lados de la alberca, reflejarse de nuevo hacia el agua, y salir de la misma. El recubrimiento de color blanco ordinariamente utilizado en la construcción de las paredes de una alberca es un absorbedor muy pobre de la radiación de longitud de onda corta. Esta es precisamente una de las razones por las que se usa. Dado que el cielo se observa azul por la dispersión de la radiación solar a una longitud de onda aproximadamente  $0.4\mu\text{m}$ , esta energía atraviesa el agua, se refleja en las paredes y el fondo, para finalmente llegar de regreso a los ojos del observador dándole la ilusión de que el agua es azul en la piscina.

Puede mencionarse también que entre 85 y 95% de la radiación solar incidente se convierte en calor útil si el agua no está filtrada adecuadamente, o si el fondo y las paredes tienen un material que absorbe la radiación.

Hay varios factores que intervienen en las pérdidas de calor de una alberca. Las de conducción hacia el suelo son despreciables y usualmente se recuperan cuando la temperatura del agua disminuye ligeramente. Las pérdidas de calor por radiación en el infrarrojo hacia la bóveda celeste, si son importantes. Como la temperatura efectiva del firmamento es aproximadamente igual o menor que la del ambiente, el agua de la piscina también pierde calor por convección natural o forzada dependiendo de la velocidad del viento.

Las pérdidas por evaporación son las más importantes, y dependen de la temperatura del agua y la humedad específica del aire ambiente.

El agua de la piscina se evapora por existir una diferencia entre la presión de saturación de ésta en la alberca, y la presión parcial de vapor de agua en el aire ambiente, aquí el calor necesario en el proceso de evaporación es extraído del agua de la alberca.

Ozarnowski propone la siguiente expresión para determinar las pérdidas totales de calor de una piscina;

$$Q_1 = A_p [2R + 5.68(T_w - T_a) + H_{ca}(T_w - T_a) + 1612H_{ca}(P_w - P_a)] \quad \text{es. (5.1)}$$

en donde:

$A_p$  = área del alberca, en  $m^2$

$H_{ca}$  = coeficiente de transferencia de calor por convección, igual a  $9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para una velocidad de viento igual a  $10 \text{ km/h}$ . Vasconcelos, Martins y otros sugieren la expresión

$$H_{ca} = \begin{cases} 4.4 & \text{para } V \leq 5 \text{ km/h} \\ 1.39V^{0.8} & \text{para } V > 5 \text{ km/h} \end{cases} \quad \text{es. (5.2)}$$

$P_a$  = presión de vapor de agua en el aire ambiente, en bar.

$P_w$  = presión de saturación del agua a la temperatura de la alberca, en bar.

$Q_1$  = pérdidas de calor, en W.

$R$  = pérdidas de calor por radiación de un cuerpo negro a la temperatura  $T_a$ , valor igual a  $79 \text{ W/m}^2$ , de acuerdo con Bliss.

Ta = temperatura ambiente, en °C.

Tw = temperatura del agua, en °C.

ε = emisividad efectiva del agua, igual a 0.9

El agua de la piscina alcanza una temperatura de equilibrio cuando la energía absorbida es igual a la disipada. Este es, de la ec. 5.1 tenemos:

$$q_i = \epsilon R + 5.68 \Delta T + H_{ea} \Delta T + H_{ea} \Delta P \quad \text{ec. (5.3)}$$

en donde la energía qi es la promedio por unidad de área incidente sobre el agua de la alberca, y Δ es la absorbancia del agua, en consecuencia tenemos:

$$\Delta T = \frac{q_i - \epsilon R - H_{ea} \Delta P}{5.68 + H_{ea}} \quad \text{ec. (5.4)}$$

de la expresión anterior se observa que cuanto menores sean las pérdidas de calor en una piscina, tanto mayor será la temperatura del agua de la misma.

- Tamaño del conjunto de los colectores.

Como el calor útil aprovechado por los colectores solares y/o equipo auxiliar debe contrarrestar las pérdidas de calor que experimenta una piscina, se debe determinar el tamaño apropiado de los colectores orientados hacia el sur. Cuanto mayor sea la superficie de los colectores, tanto mayor será el calor útil que éstos suministrarán al agua de la alberca. Sin embargo, tan pronto empiecen los colectores a aportar energía al agua, la temperatura de esta comenzará a subir, en estas condiciones la temperatura de operación de los colectores tenderá también a elevarse, disminuyendo por ende la eficiencia de éstos, como resultado de estos fenómenos, las ganancias obtenidas con un conjunto de colectores cada vez más grandes se vuelven cada vez menores.

Debe también apuntarse que el flujo de agua a través de los colectores depende del tamaño de la piscina. Así, al incrementarse la superficie de los colectores de una piscina dada, el factor de radiación de calor Er tiende a disminuir, bajando también la eficiencia de captación.

De la ecuación 5.1 y 5.3 tenemos:

$$q_{\text{útil}} = A_p(q_i \epsilon) - A_p(\epsilon R + 5.68(T_w - T_a) + H_{ea}(T_w - T_a) + H_{ea} \Delta P) \quad \text{ec. (5.5)}$$

Las figs. 5.1 y 5.2 muestran el comportamiento de un conjunto de colectores sin vidrio y con él, para valores de  $F'$  iguales a 0.8 y 0.85, respectivamente. Las líneas mostradas en estas figuras están basadas en un tiempo de captación igual a 8 h. Por otra parte se ha supuesto en el trazo de tales figs. que el agua de la alberca sin calentar se encuentra aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura ambiente durante el tiempo de captación.

El uso de las figs. es muy sencillo, el valor de radiación diaria promedio se multiplica por 0.9 (ya que el 90% de la energía incide durante las dos terceras partes del día empleadas para calentamiento) para obtener el calor aprovechable, y el número resultante se divide entre 8 para obtener el valor promedio por hora. Conociendo el incremento de temperatura deseado en el agua y el valor de radiación aprovechable, se determina el cociente área de colectores/área de piscina.

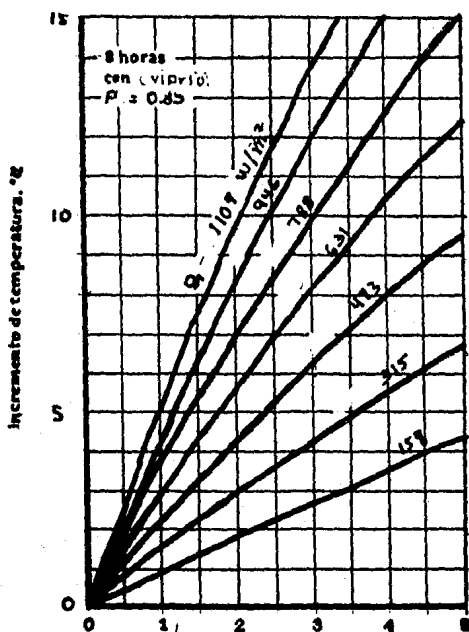


FIGURA 5.1 Área de colectores/Área de piscina

$Q_i$  es la radiación incidente sobre la superficie de la alberca.

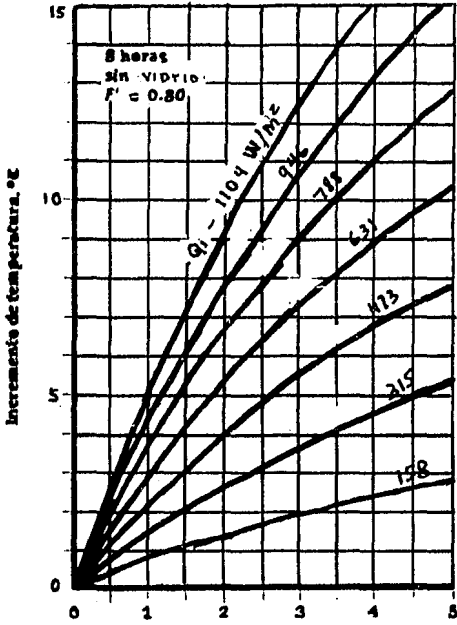


FIGURA 5-2 Area de colectores/Area de piscinas



Funcionamiento de las instalaciones solares para calefacción de piscinas.

El agua de las piscinas puede calentarse por medio de colectores solares que funcionan en circuito abierto o cerrado.

-Instalación con circuito abierto.

El agua de la piscina se hace circular por medio de las bombas usuales y pasa a través de los filtros y luego a través de los colectores solares de donde, una vez caliente, vuelve a la piscina.

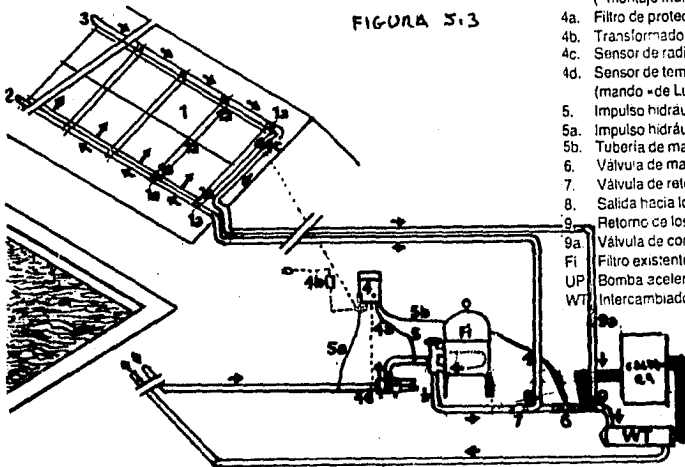
La bomba se pone en funcionamiento por medio de un termostato en cuanto a la temperatura de salida del colector solar es unos grados mas elevada que la del agua de la piscina. Se intenta reducir las pérdidas de carga dando al sistema de tuberías un calibre suficientemente grande para conseguir una velocidad de circulación relativamente grande con lo que se consigue también que la temperatura del absorbedor sea baja y, por tanto, su rendimiento mayor.

De esta manera se capta la mayor cantidad de energía. Si la instalación es tá bien hecha, normalmente toda el agua de la piscina pasa por el colector una vez al día. Esta instalación en circuito abierto no necesita intercambiador de calor.

*Calefacción solar de una piscina en circuito abierto (sistema Solar-Tech.)*

1. Colectores solares
- 1a. Uniones y fijaciones
2. Caperuza terminal
3. Válvula de purga de aire
4. Aparato de mando\*  
(\* montaje mural en un local seco)
- 4a. Filtro de protección
- 4b. Transformador de 24 V. conexión 220 V
- 4c. Sensor de radiación solar
- 4d. Sensor de temperatura de la piscina (mando "de Luxe")
5. Impulso hidráulico "conectado"
- 5a. Impulso hidráulico "desconectado"
- 5b. Tubería de mando a la válvula
6. Válvula de mando
7. Válvula de retención
8. Salida hacia los colectores
9. Retorno de los colectores
- 9a. Válvula de compuerta
- Fi. Filtro existente
- UP. Bomba aceleradora existente
- WT. Intercambiador de calor existente

FIGURA 5.3



Si los colectores solares pudiesen colocarse, de alguna manera, más bajos que la piscina (taludes), sería posible construir una calefacción solar de piscinas con circulación por gravedad o termosifón. En este caso podría prescindirse de la bomba y el termostato.

Calefacción de una piscina con circulación por termosifón (según Albrecht/Hewig)

1. Piscina
2. Colectores solares



FIGURA 5.4

Si ya existe una instalación de calefacción de la piscina con una caldera convencional, el sistema de colectores solares puede conectarse, en general, sin problemas, a la instalación ya existente. En este caso, en el tubo existente entre el filtro de la piscina y el intercambiador de calor de la calefacción existente se intercala una válvula de maniobra, y una de retención, así como una tubería de ida y de retorno entre el colector y las dos válvulas. Estas tuberías, de 1 1/2"-2" de calibre, pueden ser de PVC o de polietileno. Con el sensor de radiaciones solares de los colectores, el sensor de temperatura de la piscina, y con la válvula de maniobra se enlaza un aparato de maniobra, antes y después de la bomba de circulación se conectan los dos impulsos hidráulicos "conectado y desconectado".

Cuando el sensor registra suficiente cantidad de radiación solar, envía esta información al aparato de maniobra. Ahora se cierra automáticamente la válvula de maniobra, se interrumpe el circuito normal y el agua de la piscina se desvía hacia los colectores. La presión del agua cierra automáticamente la válvula de ventilación. El agua fluye uniformemente a través de los colectores, se calienta por la acción del sol y vuelve a la piscina. Por los colectores sigue circulando agua fría y continúa la circulación de agua. Si la radiación solar vuelve a ser insuficiente, el aparato de maniobra ordena a la válvula de maniobra que se abra y vuelva a establecerse el circuito normal, al faltar presión en los colectores se abre la válvula de ventilación y toda el agua contenida en los colectores retorna a la piscina. Ver figura 5.3.

Ver figura 5.3.

*Preparación de agua caliente solar combinada con la calefacción de la piscina (según Hergel)*

1. Colectores solares
2. Termostato
3. Mandos
4. Acumulador de agua caliente
5. Depósito de expansión
6. Intercambiador de calor
7. Instalación de filtros
8. Piscina
9. Bomba aceleradora
10. Punto de toma de agua caliente

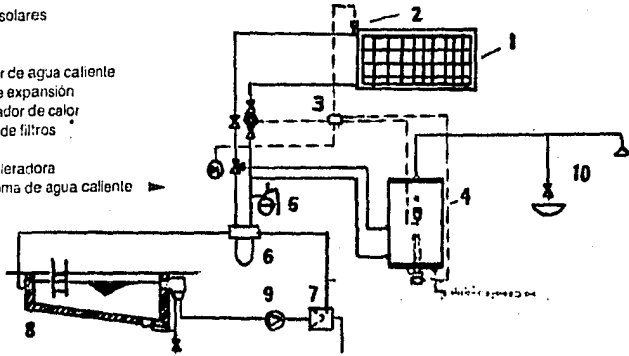
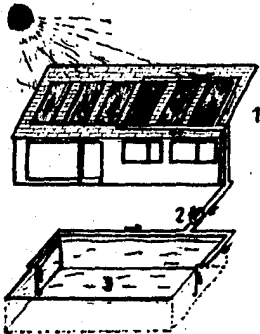


FIGURA 5.5



*Calefacción de una piscina con circulación forzada (Doc. Interbrada)*

1. Colectores solares
2. Bomba aceleradora
3. Piscina

FIGURA 5.6

Para las calefacciones solares de piscinas en circuito abierto suelen utilizarse colectores planos ecenómicos o serpentines tubulares de plástico o de cobre que pueden colocarse en las tejadas, taludes, en horizontal sobre el suelo. La superficie colectora debe ser del 50 al 100 % de la superficie de la piscina.

Los colectores tendidos horizontalmente o los que tienen una orientación desfavorable necesitan mayor superficie. Las dimensiones exactas de la superficie colectoras dependen de la temperatura deseada en el agua, del rendimiento del colector y de las condiciones constructivas y climatológicas. En las regiones cálidas, el agua de la piscina está tan caliente en pleno verano que, en realidad, no se necesita la instalación solar. Al cesar la circulación del agua, ésta puede calentarse tanto que se pueden producir fisuras en las tuberías. Para evitar estos daños, en el punto más alto se coloca una válvula de ventilación y en las proximidades de la bomba de circulación se instala una válvula de retención. De esta manera se puede vaciar la instalación sin ningún problema de sobrecalentarse.

En los climas fríos y extremos conviene vaciar la instalación antes de comenzar el invierno para evitar roturas en el sistema de tuberías a causa de las heladas. Estas instalaciones tienen la ventaja de ser baratas pero el inconveniente de que el circuito de agua de los colectores está permanentemente en contacto con la atmósfera que acorta la durabilidad de la instalación.

-Instalación con circuito cerrado.

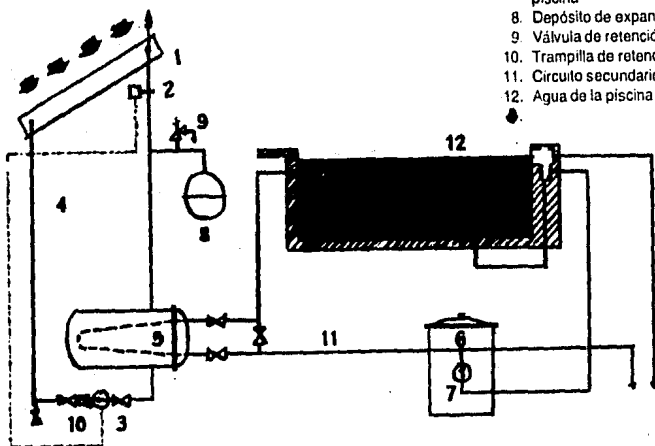
Si se utilizan colectores metálicos de alto rendimiento, más caros, con el fin de prolongar su vida útil, conviene que el circuito de los colectores sea cerrado, en este caso, en el circuito de los colectores debe instalarse un depósito de compensación o de expansión como el que suele instalarse en los sistemas de calefacción. El calor captado por los colectores solares se cede al agua de la piscina por medio de un intercambiador de calor.

La circulación puede hacerse, en algunos casos, por termosifón pero normalmente se hace forzada por medio de una bomba mandada por un termostato.

Los circuitos primario y secundario se controlan por medio de un aparato automático de mando. Además, en la mayoría de los casos se aconseja agregar al agua del circuito del colector un producto anticorrosivo y anticongelante. El funcionamiento y los problemas técnicos del circuito del colector de la calefacción de piscinas son análogos a los de la producción solar de agua caliente sanitaria.

Las calefacciones de piscinas en circuito cerrado pueden, en ciertas condiciones, funcionar también en invierno.

FIGURA 5.7



*Calefacción solar de una piscina en circuito cerrado (sistema ZinCo)*

1. Colectores solares
2. Termostato
3. Bomba aceleradora
4. Circuito colector (primario)
5. Intercambiador de calor
6. Filtro de la piscina
7. Bomba aceleradora del agua de la piscina
8. Depósito de expansión
9. Válvula de retención
10. Trampilla de retención
11. Circuito secundario
12. Agua de la piscina

Disposiciones constructivas para la calefacción solar de las piscinas

La demanda calorífica de las piscinas consiste, en la compensación constante de las pérdidas a través del terreno, por evaporación en la superficie, por convección y por radiación.

Las pérdidas por evaporación constituyen, aproximadamente, el 65 % de las pérdidas caloríficas totales, por lo que adquieren la mayor importancia. Estas pérdidas se están produciendo constantemente mientras el punto de condensación del aire situado sobre la piscina es mayor que la temperatura del agua. Las disposiciones constructivas deben mantener estas pérdidas dentro de unos límites razonables en beneficio del costo de la calefacción solar:

-Sugerencias para reducir las pérdidas de calor.

- ✓ La piscina debe construirse en un lugar soleado y a resguardo del viento.
- La distancia a la vivienda no debe ser excesiva para poder mantener lo más ciertas posibles las uniones de las instalaciones técnicas.
- La situación de la piscina debe permitir la colocación óptima de las superficies colectoras necesarias.
- Se pueden utilizar también, ventajosamente, los taludes existentes, o las cubiertas de las terrazas para la colocación de los colectores. Por esta razón debe tomarse en cuenta la topografía del terreno.
- Tanto la piscina como los colectores deben colocarse resguardados del viento y, naturalmente, deben recibir óptimamente las radiaciones solares. Las superficies colectoras tienen que protegerse también contra las roturas que pudieran producirse.
- Cubriendo la piscina con una lona de plástico de una o dos capas, puede conseguirse elevar la temperatura del agua unos grados centígrados. Deben evitarse las láminas demasiado delgadas porque se desgarran fácilmente.
- Una cobertura hecha con una manta aislante rígida, que asegure un coeficiente de transmisión térmica favorable, reduce las pérdidas de un 20% a 50%
- Las disposiciones técnicas y arquitectónicas han de constituir una imagen armónica de conjunto, una técnica avanzada puede combinarse adecuadamente con la estética.

Problema 5.1

Estime las pérdidas de calor de una alberca de  $1000\text{m}^2$  de superficie expuesta al aire, de 1.5 m de profundidad y con una temperatura igual a  $5^\circ\text{C}$  por encima de la del ambiente. Las condiciones de temperatura ambiente y humedad relativa son  $20^\circ\text{C}$  y 80%, respectivamente. La velocidad del viento sobre la piscina es igual a 10 km/h.

Solución

de la tabla tenemos:

$$P_a = \phi P_g + (0.80)(0.02339) = 0.0187 \text{ bar}$$

en donde  $\phi$  es la humedad relativa y  $P_g$  es la presión de saturación del agua a  $20^\circ\text{C}$ , similarmente, a  $25^\circ\text{C}$ ,

$$P_w = 0.03169 \text{ bar}$$

Por otra parte,

$$h_{ea} = 1.39(10)^{0.8} = 8.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{--- ec. (5.2)}$$

$$Q_1 = 1000((0.9)(79) + 5.68(25-20) + 8.8(25-20) + 1612(8.8)(0.03169-0.0187)) \text{---}$$

$$\text{--- ec. (5.1)}$$

$$= 1000(71.10 + 28.40 + 44.00 + 184.27)$$

$$Q_1 = \underline{327.77 \text{ kW}}$$

De estos 327.77 kW de pérdidas, 99.50 kW corresponden a radiación, 44.00 a convección y 184.27 kW a enfriamiento evaporativo.

Problema 5.2

Considere una piscina de  $45 \text{ m}^2$  de superficie y 1.6 m de profundidad, la cual recibe una insolación promedio de  $425 \text{ W/m}^2$  durante 8 horas. Si la velocidad del viento es igual a 10 km/h, la temperatura ambiente igual a  $20^\circ\text{C}$  y la humedad relativa igual a 60%, calcule la temperatura del agua de la piscina, cuando se encuentra expuesta al ambiente.

Solución

De la ecuación 5.4,

$$\Delta T = \frac{0.8(425) - 0.9(79) - 9(\Delta P)}{5.68 + 9} =$$

$$\Delta P = P_w - P_a$$

Utilizando la tabla 5.1 ; la figura 3.1 y 2.1 ,

$$P_a = 0.6(0.02339) = 0.014034 \text{ bar}$$

$$P_w = 0.22(6.895)/100 = 0.015169 \text{ bar}$$

$$\Delta P = 0.001135 \text{ bar}$$

$$\Delta T = \frac{340 - 71.1 - 0.010215}{14.68} = \frac{268.89}{14.68}$$

$$\Delta T = 18.32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_w - T_a =$$

$$T_w = 18.32 + 20 =$$

$$T_w = 38.32 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Problema 5.3

Se tiene una alberca de  $57 \text{ m}^2$ , la cual recibe una insolación promedio de  $315 \text{ W/m}^2$  si la temperatura de la alberca es de  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  y se quiere incrementar esa temperatura  $4.9$  grados, ¿que área de colectores con una  $F' = 0.85$  y vidrio se necesita?

### Solución

De la figura 5.1 tenemos,

Para un incremento de temperatura =  $4.9 \text{ }^\circ\text{C}$  y una radiación promedio en 8 horas =  $315 \text{ W/m}^2$ , tenemos el cociente  $A_c/A_p = 4.5$ .

$$\text{Sustituyendo } A_c = 57(4.5) = 256.5 \text{ m}^2$$

$$A_c = 256 \text{ m}^2.$$

Se necesita un colector de  $16.01 \text{ m} \times 16.01 \text{ m}$ .



Vapor de agua saturado - temperatura.

Temp. °C T	Presión bar P	Volumen específico, cm <sup>3</sup> /g		Energía interna J/g		Entalpía J/g			Entropía J/g·K		
		v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>g</sub>		
0,01	0,00113	1,0002	206136	0,00	2375,3	,01	2501,3	2501,4	,00	9,1562	9,1562
5	0,00721	1,0001	147120	20,37	2382,3	20,38	2489,6	2510,6	0,761	8,9456	9,0257
10	0,12176	1,0094	106379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	1,518	8,7490	8,9008
15	0,17051	1,0029	77926	62,09	2396,1	62,09	2465,9	2528,9	2,245	8,5563	8,7814
20	0,2339	1,0018	57191	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	2,966	8,3706	8,6672
25	0,3149	1,0029	43360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	3,674	8,1905	8,5580
30	0,4246	1,0043	32894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	4,369	8,0160	8,4533
35	0,5618	1,0060	25216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	5,030	7,8478	8,3531
40	0,7394	1,0078	19823	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	5,725	7,6849	8,2570
45	0,9693	1,0099	15758	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	6,387	7,5261	8,1648
50	1,2349	1,0141	12632	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	7,058	7,3725	8,0763
55	1,5758	1,0166	9568	230,21	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	7,679	7,2234	7,9913
60	1,9940	1,0178	7671	251,11	2456,6	251,13	2358,5	2609,6	8,212	7,0784	7,9096
65	2,500	1,0199	6197	272,02	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	8,655	6,9375	7,8310
70	3,119	1,0228	5042	292,95	2469,6	292,98	2333,8	2626,9	9,009	6,8004	7,7553
75	3,858	1,0259	4131	313,90	2475,9	313,93	2321,4	2635,3	9,155	6,6669	7,6824
80	4,739	1,0291	3407	335,86	2482,2	335,91	2308,8	2643,7	9,179	6,5369	7,6122
85	5,783	1,0323	2828	355,84	2488,4	355,90	2296,0	2651,9	9,134	6,4102	7,5445
90	7,014	1,0360	2361	376,85	2494,5	376,92	2283,2	2660,1	9,125	6,2866	7,4781
95	8,455	1,0397	1981,9	397,88	2500,6	397,96	2270,2	2668,1	9,200	6,1659	7,4159
100	1,0135	1,0435	1672,9	418,94	2506,5	418,04	2257,0	2676,1	9,309	6,0480	7,3549
110	1,5853	1,0503	991,9	503,50	2520,3	503,71	2202,6	2706,3	9,576	5,8620	7,1896
120	2,418	1,0797	508,9	588,74	2550,0	589,18	2144,7	2735,9	9,791	5,1908	6,9799
130	3,6178	1,1070	307,1	674,87	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	9,927	4,8075	6,7502
140	5,1821	1,1274	194,05	762,09	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	9,996	4,4461	6,5897
150	7,1538	1,1565	127,36	850,85	2599,3	852,45	1940,7	2793,2	9,989	4,1014	6,4323
160	9,5135	1,1855	84,19	940,87	2616,4	943,62	1858,5	2802,1	9,918	3,7683	6,2861
170	12,291	1,2251	59,26	1033,21	2630,0	1037,32	1766,5	2803,8	9,701	3,4422	6,1487
180	15,538	1,2735	42,21	1128,59	2639,0	1134,37	1662,5	2798,9	9,386	3,1181	6,0019
190	19,240	1,3321	30,17	1227,46	2646,1	1235,99	1565,6	2784,6	9,048	2,7903	5,8571
200	23,348	1,4036	21,67	1327,0	2650,0	1344,0	1464,9	2768,0	8,594	2,4511	5,7045
210	27,949	1,4867	15,916	1428,1	2650,9	1446,3	1466,9	2750,7	8,050	1,8909	5,5417
220	33,14	1,5825	11,949	1530,2	2651,6	1605,5	1468,0	2741,0	7,417	1,1579	5,0536
230	38,94	1,6925	8,952	1633,2	2652,0	1720,3	1468,0	2741,0	6,610	0,4429	4,4298
240	45,34	1,8271	6,848	1736,9	2652,0	1891,3	1468,0	2741,0	5,660	0,0000	3,7045
250	52,34	1,9877	5,325	1841,2	2652,0	2074,3	1468,0	2741,0	4,590	0,0000	2,9045
260	60,00	2,1761	4,224	1946,0	2652,0	2269,3	1468,0	2741,0	3,440	0,0000	2,0545
270	68,34	2,3941	3,411	2051,2	2652,0	2476,3	1468,0	2741,0	2,240	0,0000	1,2045
280	77,34	2,6421	2,841	2156,8	2652,0	2694,3	1468,0	2741,0	1,040	0,0000	0,3545
290	86,94	2,9201	2,461	2262,8	2652,0	2924,3	1468,0	2741,0	0,000	0,0000	0,0045
300	97,00	3,2281	2,211	2369,2	2652,0	3176,3	1468,0	2741,0	0,000	0,0000	0,0000

TABLA 5-1

TABLA 5.2 Humedad relativa media mensual.

Localidad	Lat. N	Long. W	Altitud (s.n.m.) m	Meses											
				E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Acapulco, Gro.	16°30'	99°56'	3	72	72	73	74	73	77	79	73	80	77	76	72
Agua Calientes, Aps.	21°53'	102°18'	1 875	52	45	43	42	40	56	66	69	65	61	57	59
Campeche, Camp.	19°31'	90°32'	23	83	79	75	72	75	77	79	82	85	84	83	82
Calién, Col.	18°14'	103°45'	490	59	56	54	52	57	70	77	78	82	79	71	65
Cutiacán, Sin.	24°48'	107°24'	33	71	65	61	58	54	67	79	80	78	73	70	68
Chetumal, Q. Roo.	18°30'	88°20'	4	52	52	84	87	88	91	90	89	91	92	90	90
Chihuahua, Chih.	28°38'	104°04'	1 423	44	40	31	31	29	24	31	55	47	46	43	48
Chilpancingo, Gro.	17°53'	99°30'	1 360	79	79	80	75	80	82	88	87	87	86	88	82
Ensenada, B.C.	31°58'	116°38'	3	79	74	74	76	81	80	81	82	79	74	75	77
Guadalupe, Jal.	20°41'	103°30'	1 529	50	44	40	41	47	59	73	72	72	78	59	56
Guadalupe, Gro.	21°01'	101°18'	2 037	48	39	32	40	48	62	60	60	63	58	47	34
Guaymas, Son.	27°55'	110°53'	4	54	39	37	41	40	53	61	66	61	55	49	48
Hermosillo, Son.	28°08'	110°58'	211	46	42	37	35	32	35	50	52	47	40	47	47
Jilapa, Ver.	19°33'	96°55'	1 399	76	75	72	76	75	84	80	80	83	82	80	81
Juárez, Co. Chih.	31°44'	106°28'	1 137	63	58	35	28	41	27	42	42	51	41	48	65
Leon, Gto.	21°07'	101°41'	1 809	64	52	52	45	48	60	69	68	62	64	59	68
Manzanillo, Col.	19°04'	104°20'	3	66	71	72	76	75	77	81	80	84	84	84	74
Mazatlán, Sin.	28°11'	106°25'	10	76	73	78	80	76	77	78	80	82	78	72	75
Michoacán, Yuc.	20°58'	89°38'	32	76	71	63	62	68	78	77	77	79	76	78	78
México, D.F.	19°30'	99°08'	2 308	58	50	44	51	58	60	62	60	62	62	54	59
Monterrey, N.L.	25°40'	100°18'	538	63	62	62	67	69	67	76	67	66	70	69	69
Morelia, Mich.	19°42'	101°07'	1 923	61	51	47	47	54	67	72	74	72	70	67	65
Oaxaca, Oax.	17°04'	96°42'	1 563	57	62	57	57	64	67	71	65	72	68	63	64
Pachuca, Hgo.	20°03'	98°44'	2 400	58	53	52	52	66	71	73	74	80	74	64	69
La Paz, B.C.	24°10'	110°18'	19	65	60	61	60	62	60	64	64	69	68	66	70
P. Negras, Coah.	23°42'	100°31'	220	71	68	62	64	68	65	65	69	68	72	76	70
Puebla, Pue.	19°03'	96°12'	2 130	51	52	42	47	53	42	49	64	74	61	59	59
Querétaro, Gro.	20°36'	100°23'	1 842	35	33	40	42	47	56	61	65	65	60	52	50
Río Verde, C.L.P.	21°56'	100°08'	987	71	68	65	71	68	68	75	71	75	75	75	74
Salina Cruz, Oax.	16°10'	98°12'	17	80	81	83	82	80	89	86	87	91	85	86	83
Saltillo, Coah.	25°26'	101°08'	1 609	53	52	50	54	53	58	64	62	64	69	56	56
S. Luis Potosí, S.L.P.	22°09'	100°38'	1 877	49	40	38	38	46	55	62	60	62	62	54	51
Tampico, Tamps.	22°13'	97°51'	4	81	81	79	83	84	82	80	83	83	79	82	78
Topochula, Chi.	14°54'	82°16'	131	64	63	64	69	70	78	77	76	77	74	76	70
Tepec, Nay.	21°31'	104°54'	922	91	81	82	80	80	83	88	87	84	88	81	83
Torresón, Coah.	23°32'	102°28'	1 100	52	46	47	46	41	46	51	51	56	55	54	58
Tuxtla Gtz., Chi.	14°48'	93°06'	316	72	68	65	68	66	72	72	80	82	76	75	77
Veracruz, Ver.	18°12'	96°48'	16	83	83	83	83	82	80	80	80	79	78	78	81
Zacatecas, Zac.	21°47'	102°54'	2 616	36	33	34	28	35	59	67	62	69	62	57	51

## CAPITULO VI

Autoconstrucción de colectores solares.

### Autoconstrucción de colectores de líquido.

#### Introducción:

En principio, un colector plano es un elemento constructivo muy sencillo, en el que, sin embargo, los problemas prácticos suelen ser muy complicados y han de estudiarse detenidamente.

Está formado por una superficie absorbadora de las radiaciones que se haya en contacto con un circuito transportador del calor, por un aislamiento térmico, por unas placas transparentes y un bastidor.

Las personas bien adiestradas para los trabajos de artesanía pueden construirlos por sí mismas. (ver figura 6.1)

#### Superficie absorbadora y circuito absorbador.

Como ya se ha dicho, el poder de absorción de la superficie de un cuerpo depende de varios parámetros del material correspondientes al color, a la estructura superficial, a la estructura del material y a sus dimensiones. El elemento absorbador puede ser de cobre, aluminio o de chapa de acero. Para este objeto se pueden utilizar también radiadores de calefacción usuales.

Las placas de cobre son muy convenientes, pero relativamente caras por el elevado precio del cobre.

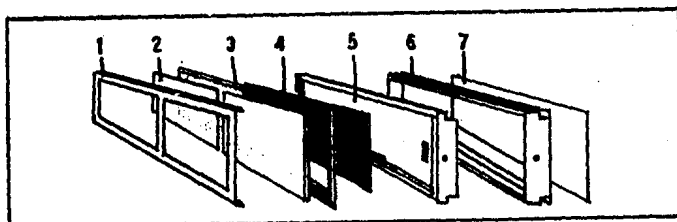
El aluminio conduce el calor casi tan bien como el cobre y es mucho más barato, sin embargo las dificultades están en que no se puede soldar y se corroe fácilmente si no se utiliza un líquido especial.

Si se utiliza la chapa de acero se tienen menos problemas, el espesor de la chapa debería oscilar entre 0.3 y 1.0 mm, según el tamaño y concepción del elemento. Es posible soldar tubos de 1/2" de diámetro, aproximadamente, por debajo de la placa. Sin embargo, para el artesano casero parece más sencillo realizar una delgada película de agua de 2-4 mm de altura con ayuda de chapas planas de hierro. Esta construcción permite un contacto térmico muy bueno entre el agua y los rayos solares. Hay que evitar que la placa absorbadora se abombe bajo la acción de la presión del agua y también prever que no se tuerzan las placas recién soldadas.

Para conseguir un buen coeficiente de absorción y evitar la reflexión, la cara anterior de la placa se pintará con una pintura mate oscura.

La primera puede ser negra, parda, oscura, o también azul oscura o verde oscura. La capa de pintura debe ser la más delgada posible y muy resistente al calor, ya que esta superficie puede calentarse hasta  $100^{\circ}$  ó  $140^{\circ}$  y más. El elemento absorbedor más sencillo puede ser un tubo de plástico negro bien enrollado; unos 50 m de tubo dan un metro cuadrado de superficie absorbidora. El inconveniente que tiene es que, sometido al efecto térmico y a las radiaciones ultravioleta, se fisura con relativa rapidez y queda inservible.

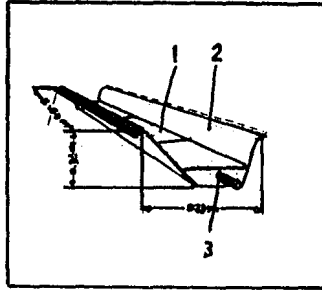
Una placa de fibrocemento pintada de negro constituye también una superficie absorbidora muy sencilla. Los colectores fabricados con estas placas onduladas tienen un buen contacto térmico de gran superficie con el líquido que por ellos fluye. (ver fig. 6.2)



Colector plano de agua (según Cerca)

- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| 1. Bastidor metálico      | 5. Aislamiento          |
| 2. Placa de vidrio        | 6. Carcasa de aluminio  |
| 3. Perfil de aluminio     | 7. Lámina de protección |
| 4. Superficie absorbidora |                         |

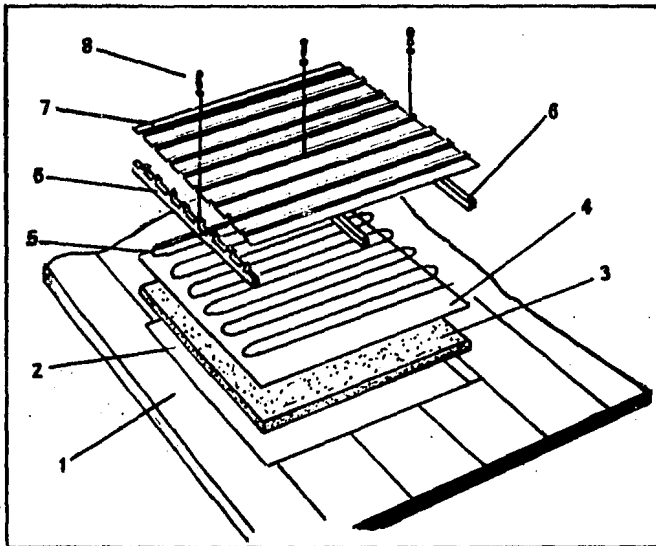
FIGURA 6-1



*Colector de cubierta Sofretes*

- 1. Placa de vidrio
- 2. Perfil de fibrocemento
- 3. Tubo metálico

**FIGURA 6-2**



*Colector plano de agua embotrado en la cubierta*

- 1. Cobertura
- 2. Lámina metálica
- 3. Aislamiento de lana de vidrio
- 4. Placa absorbadora de cobre (negra)
- 5. Tubos de cobre
- 6. Distanciador
- 7. Placa de plástico transparente
- 8. Tornillos

**FIGURA 6.2A**

### El aislamiento térmico.

Para evitar pérdidas de calor, el elemento absorbedor debe estar bien aislado por detrás y por los lados. Esta capa aislante ha de tener un espesor de 4-10 cm y debe soportar temperaturas hasta de 140°C o más.

Como las capas aislantes húmedas pierden su poder aislante, es necesario proteger bien el aislamiento contra las acciones del agua (fugas del sistema tubular, agua de condensación, lluvia, rocío, escarcha, nieve).

Los materiales aislantes pueden ser de fibra de vidrio, espuma de poliuretano, placas de corcho, aglomerados de madera, etc.

En muchos casos conviene colocar entre el aislante y el elemento absorbedor una lámina de aluminio dejando una cámara de aire. Esta lámina puede reflejar los rayos infrarrojos aumentando el rendimiento de los colectores.

### La cubierta transparente.

Un importante elemento del colector solar es su cubierta. Con ayuda de vidrios planos transparentes se realiza el efecto de invernadero. Por esta razón, la concepción de esta cubierta tiene una gran influencia sobre la calidad del colector.

La superficie absorbedora del colector irradia rayos infrarrojos que no pueden atravesar la cubierta transparente, sino que son absorbidos.

A causa de esta absorción, la cubierta se calienta en proporción a la temperatura de la superficie absorbedora y, a su vez, irradia calor.

Si se coloca otra placa de vidrio, se pueden absorber de nuevo las radiaciones perdidas y se aumenta la potencia del colector. Colocando varias placas del vidrio, en el interior se absorbe más calor, pero también se reduce la transparencia a los rayos solares, por lo que hay más pérdidas. Según la temperatura que se desea alcanzar en el agua, el número de capas de vidrio puede ser mayor en unos casos que en otros.

En la práctica, jamás se colocan más de tres placas de vidrio ya que, de lo contrario, las pérdidas de transmisión serían demasiado grandes en proporción a la ganancia obtenida. Para bajas temperaturas del agua suele bastar con un solo vidrio.

Los colectores con doble vidrio soportan mejor el efecto de enfriamiento del viento, pero son mayores los costos de materiales.

En muchos casos, desde el punto de vista económico puede ser interesante realizar los colectores mixtos, con un solo vidrio y con dos.

La cubierta transparente puede ser de vidrio normal (4-6 mm), de doble vidrio aislante o de plástico. Hay muchas cubiertas de plástico que envejecen rápidamente, en muchos casos son transparentes a las radiaciones infrarrojas y, por lo tanto, no pueden realizar el efecto de invernadero. Las juntas usuales de las ventanas soportan mal el constante movimiento térmico de los vidrios. Son mejores el neopreno o juntas de goma especialmente concebidas para este objeto.

Si se montan dos placas de vidrio, la cámara de aire delantera debe ser menor que la trasera (unos 28 mm de ésta frente a 15 mm de la otra). Se le debe montar fijo el vidrio superior. El inferior debe tener cierta movilidad para evitar la rotura térmica. La suciedad recogida en la superficie tiene poca influencia sobre el rendimiento del colector ya que, tiene algo de inclinación, los colectores se limpian con la lluvia.

La cubierta protectora ha de ser suficientemente resistente contra todo tipo de asienes como granizo, sobrecarga de nieve, calor, frío, presión del viento, etc.

#### La carcasa del colector.

Esta puede ser de chapa de acero galvanizada al fuego, de aluminio, de madera, de plástico. Las carcasas metálicas aumentan las pérdidas térmicas; el plástico y la madera suelen tener menor durabilidad. Aplicando el método de de melde, es posible fabricar la carcasa completa de un material plástico aislante. En muchos casos se utiliza el poliéster reforzado con fibra de vidrio. El colector debe montarse con total estanquidad al agua. Si se tienen dificultades para realizar la total estanquidad, en algunos casos puede ser preferible ventilar el colector. La humedad interior puede secarse por medio de orificios de ventilación convenientemente situados. Los puntos de unión con el sistema de tuberías son puntos neurálgicos del colector. Estas uniones han de estar bien aisladas tanto contra el frío como contra la humedad.

Un defecto de estanquidad puede originar que se humedezca el aire del interior y que el colector necesite más tiempo para alcanzar la temperatura deseada o de régimen.



La suciedad y el polvo reducen por el interior la transparencia del vidrio de protección y originan pérdidas en la radiación incidente.

El aislamiento húmedo aumenta las pérdidas térmicas.

Las funciones más importantes de la carcasa son;

- Protección contra las acciones mecánicas.
- Protección contra las influencias climáticas.
- Permitir el fácil intercambio de los elementos constructivos deteriorados de todo el colector.
- Permitir un enlace constructivamente lógico entre el colector y el sistema de tuberías.
- Reducir a un mínimo las pérdidas térmicas evitando los puentes térmicos.
- Permitir el montaje fuera del edificio, en taludes, del jardín, en muros de contención.
- Tener un efecto estético satisfactorio.
- Ser lo más barato posible.

#### Disposiciones contra las heladas, incrustaciones y la corrosión de los colectores de agua.

En todas las instalaciones hay que resolver estos tres importantes problemas de los colectores de agua para evitar su envejecimiento prematuro y el del sistema de tuberías correspondiente.

#### Las heladas.

Para impedir en invierno la congelación de las tuberías que se encuentran al aire libre y las consiguientes roturas, se dispone de varias posibilidades:

-Variado de los colectores y del sistema de tuberías.

Es una solución barata que, además, tiene la ventaja de que el agua caliente de los colectores puede circular en el sistema de tuberías abierto.

Como el agua no es tóxica, puede también utilizarse para usos domésticos. Sin embargo, como hay que renovar con frecuencia el agua de los colectores aumenta el peligro de incrustaciones calcáreas.

-Adición de un anticongelante.

Pueden ser freón glicol que se pone al circuito del colector.

En este caso, el agua del colector ha de circular en circuito cerrado. Es una solución práctica, en la que apenas hay peligro de incrustaciones calcáreas. Con un 30% de anticongelante y según la marca de éste, la instalación queda protegida hasta los  $-15^{\circ}\text{C}$ . Este método de evitar las heladas es más caro que el simple vaciado.

-Utilización de tuberías de plástico.

Estas deben soportar sin roturas los movimientos térmicos causados por la congelación. Este método sería ideal si se pudiesen adquirir estos materiales sintéticos a precios razonables. Hay que esperar que en pocos años la industria química sea capaz de fabricar estos colectores y sistemas de tuberías a buen precio.

#### Incrustaciones calcáreas.

Las incrustaciones calcáreas, causadas generalmente por el agua del circuito abierto, reducen la potencia del colector solar y, en consecuencia, el rendimiento de toda la instalación. Por la acción del calor producen tensiones térmicas y roturas en las tuberías y, al reducir el diámetro de éstas resultan mayores las pérdidas de presión.

Pueden evitarse trabajando con el colector en circuito cerrado y con un intercambiador de calor en el acumulador de agua caliente. Si la instalación no tiene intercambiador de calor y trabaja en circuito abierto por gravedad la tubería del agua no debería pasar de los  $55^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{C}$ . La superficie interior de los tubos debe ser completamente lisa y regular. Las tuberías más delgadas son las que más peligro corren con las incrustaciones.

#### La corrosión.

Contra la corrosión deberían utilizarse en los circuitos combinaciones de metales favorables desde el punto de vista electroquímico, como cobre-aluminio, cobre-acero, aluminio-hierro. Lo ideal sería, naturalmente, que todos los elementos fuesen del mismo metal. El hierro galvanizado y el cobre forman un par metálico muy malo, que se corroe fácilmente y debe evitarse.

(I) Las heladas solo se presentan en lugares como Chihuahua, Coahuila, etc, ya que en las demás entidades del país tenemos por lo general inviernos no tan extremos.

### Conexión de los colectores.

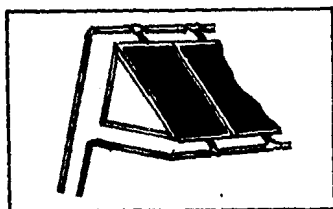
Como la construcción de elementos de colector demasiado grandes es poco favorable por diversas razones constructivas y de transporte, una superficie de colector suele componerse de varios elementos. Por estas razones hay que considerar dos posibilidades de montaje:

#### -Conexión en paralelo.

Todos los colectores tienen la misma temperatura de régimen, la resistencia a interior es menor y permite la aplicación del principio de termosifón. Si uno de los colectores no funciona por suciedad interior, cosa que es frecuente que no llegue a apreciarse e que se descubra muy tarde, puede tenerse algún inconveniente.

#### -Conexión en serie.

La misma cantidad de agua recorre todos los colectores sucesivamente y se va calentando cada vez más. Los colectores funcionan a temperaturas distintas. Cuanto mayor se va haciendo la temperatura del colector, menor resulta su rendimiento. Para evitar grandes pérdidas, algunas veces se aíslan mejor los últimos colectores y se les coloca doble cobertura de vidrio. Como la resistencia al paso del agua es mayor, este tipo de conexión de los colectores no se puede utilizar para los sistemas de circulación por termosifón. En estos casos es imprescindible la bomba de circulación. **Figura 6.3**



Colector integrado en una cubierta inclinada ► (según MIT)

1. Aislamiento
2. Placa absorbedora
3. Vidrio
4. Aluminio
5. Tubo flexible de plástico

◀ Unión de colectores sobre una cubierta plana

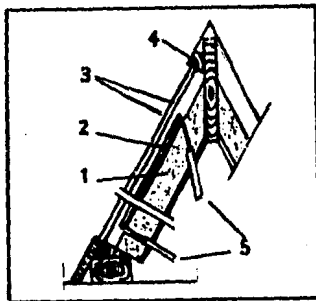


FIGURA 6.3

Montaje de los colectores solares.

-Colectores sobre cubiertas planas.

Esta modalidad constructiva, no integrada, es la menos recomendable. Sólo debe tomarse en cuenta si el edificio ya existe y no se dispone de ninguna posibilidad mejor. Sin embargo, los colectores pueden orientarse ventajosamente hacia el sur. Mediante disposiciones constructivas adecuadas puede conseguirse que estas instalaciones, frecuentemente pesadas, resulten invisibles desde la calle. Sin embargo, tanta la estructura de fijación como las tuberías quedan fuera del edificio, lo que puede originar un deterioro prematuro de la instalación.

Montaje de un colector sobre una cubierta plana (según Vogel-Noot)

1. Colector solar
2. Tubo colector
3. Angular
4. Bastidor tubular
5. Pístra transversal
6. Apoyos

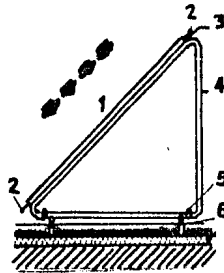


FIGURA 6.4

-Colectores sobre cubiertas inclinadas.

Si el tejado está bien orientado (sur, sureste, sudeste), esta solución es muy ventajosa. Es la modalidad constructiva que se ha preferido en muchos edificios solares. En este caso, el problema técnico se encuentra en la unión del colector a la cubierta y en la unión de varios colectores entre sí.

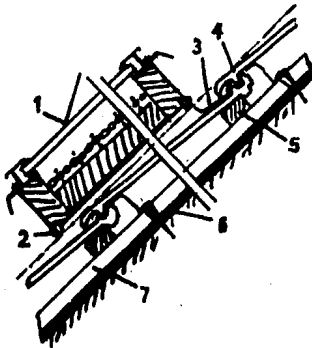


FIGURA 6.5

Montaje de colectores sobre una cubierta inclinada

1. Colector solar
2. Sujeciones de montaje
3. Estribo de montaje
4. Teja
5. Enlizado para la teja
6. Estructura de la cubierta
7. Ristreles

-Colectores combinados con los muros del edificio.

Los colectores solares colocados verticalmente permiten obtener, en invierno y en las estaciones intermedias, un rendimiento relativamente favorable. Esta colocación es, desde el punto de vista constructivo, más sencilla y barata que la posición inclinada. Debería intentarse siempre integrar el elemento del colector en el muro y no superponerle como un cuerpo extraño.

- Colector integrado en un muro (según Pleijel-Lindstrom)
1. Lámina de aluminio
  2. Placa absorbidora (radiador de calefacción)
  3. Aislamiento (lana mineral)
  4. Lámina de plástico (Testar)
  5. Vidrio (4 mm)

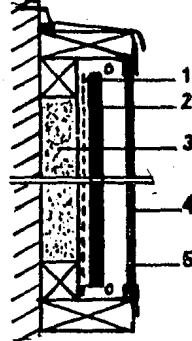


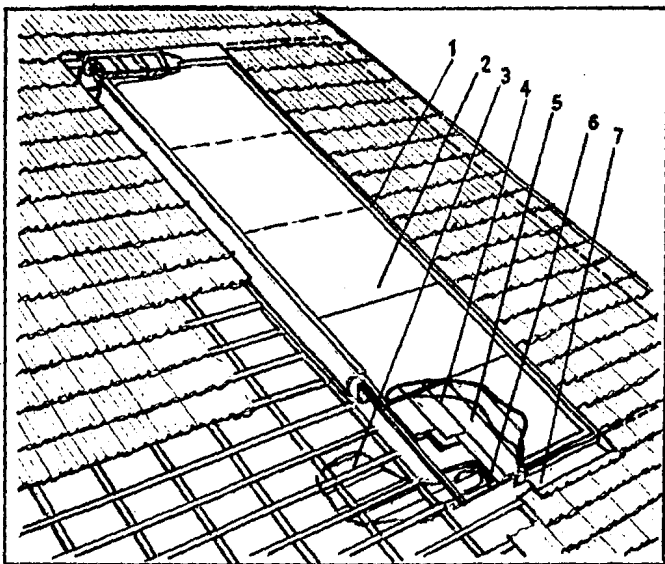
FIGURA 6.6

-Disposición del colector fuera del edificio.

Soy decididamente partidario de la integración constructiva del colector en la estructura del edificio, pero hay casos en que, por diversas razones no es posible hacerlo así; entonces la posibilidad de montar el colector solar sobre una zona de estar y del jardín, o del estacionamiento. Esta solución tiene la ventaja de que las personas e los vehículos quedan protegidos del calor del sol.

También pueden colocarse los colectores solares en un jardín sobre taludes o sobre muros de retén; naturalmente hay que cuidar de montarles en lugares en que no puedan producirse roturas.

La orientación adecuada de los colectores y su montaje determinan, no sólo el funcionamiento técnico de la instalación, sino también el valor constructivo y estético del edificio y de su exterior.



*Montaje de un colector en el tejado (según Domier)*

- |                                      |                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Bastidor de aluminio              | 5. Placa absorbente con tubos de calor |
| 2. Cobertura de plexiglás            | 6. Aislamiento                         |
| 3. Revestimiento interior del tejado | 7. Guarnición                          |
| 4. Cobertura de vidrio               |                                        |

**FIGURA 6.7**

Autoconstrucción de colectoras solares con tambes e tanques de gasolina.

Colectores con tambes.

- Se necesita un tambe de 40 o 60 litros (con tambes más grandes la cantidad de agua fría es demasiada en proporción a el área exterior del tanque y tardará mucho tiempo en calentarse).
- Pintura negra mate.
- Un pliego de plástico transparente o un aislante térmico.

Primero habrá que limpiar bien el interior del tanque, para que no le queden aceites, de petróleo o productos químicos. Además se puede pintar el interior con pintura anticorrosiva, para evitar la corrosión del metal. Se vacía la pintura dentro del tanque y después agitarlo para que la pintura cubra todo el interior. Más tarde se pinta el exterior del tanque de negro mate.

En caso de que la casa no tenga agua entubada, bastará colocar el tanque encima de una mesa para facilitar su salida.

Mejor todavía sera usar dos tanques: uno para almacenar agua, y el otro colocado más abajo, para calentarla.

Cuando se usen tubes, habrá que poner la entrada, que será de agua fría, hasta el fondo del tanque. La salida, del agua caliente deberá estar por arriba, ya que la el agua caliente pesa menos que el agua fría y cuando está dentro del tanque se caliente pasara a la parte de arriba.

Hay que colocar el tanque contra la pared que le dá más sol, en otras palabras, la pared que dá hacia el sur. La pared y la mesa o plataforma deberán estar pintadas de blanco:

El tanque se cubrirá después con el pliego de plástico o el aislante térmico, cuidando bien de que el tanque esté completamente cubierto hasta la base ya que el aire caliente entre el tanque y el plástico no debe escapar. ver figura 6.8. Otra forma para mantener el aire caliente es construir una caja con tapa de vidrio, pero en este caso se colocará el tanque acostado.

Los lados pueden ser de madera, con la parte interior pintada de blanco:

Además se construye una tapa de madera para cubrir la caja durante las noches; ver figura 6.9.

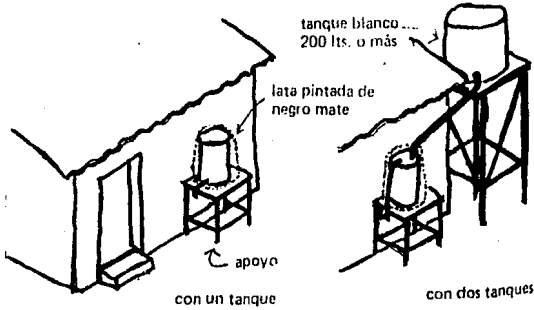


Figura 6.8

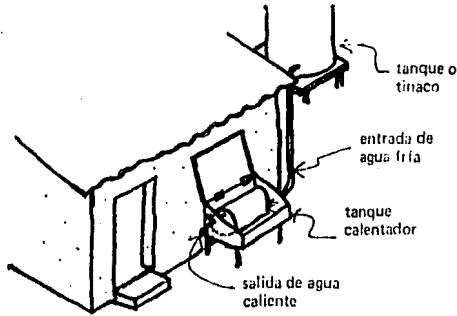


Figura 6.9

En los ejemplos anteriores se han mestrado colectores que irán fuera de la casa. Pero también es posible construir colectores que formen parte de la casa. Por ejemplo encima del baño o cocina, ya que se cuenta con tuberías, así serán más fáciles de hacer las conexiones, (figura 6.10).

Panel para cubrir el tanque durante las noches. La parte interior está pintada de blanco para guiar más rayos solares encima de los tanques.

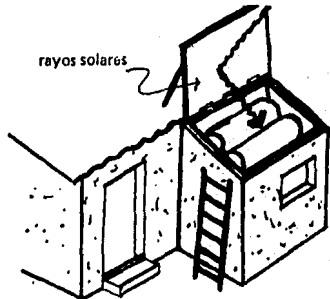


Figura 6.10



En caso de que se necesite una cantidad más grande de agua caliente, es conveniente colocar varios tanques chicos juntos que sólo uno grande (figura 6.11).

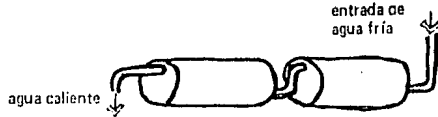


Figura 6.11

Otra forma es construyendo el colector como parte del techo principal de la casa. De nuevo se debe construir, arriba o por lo menos cerca del baño o cocina para no tener mucha tubería por toda la casa.

Ahora bien, en vez de tener una tapa aislante encima del vidrio, será más fácil para su operación, colocarla abajo del vidrio del colector, construyéndola para que se pueda abrir y cerrar desde adentro de la casa.

Dentro de la estructura del techo se construye una caja, de preferencia cerca del canto más bajo. Para facilitar la construcción a prueba del agua de las lluvias, las tejas saldrán un poco más arriba del colector, (figura 6.12).

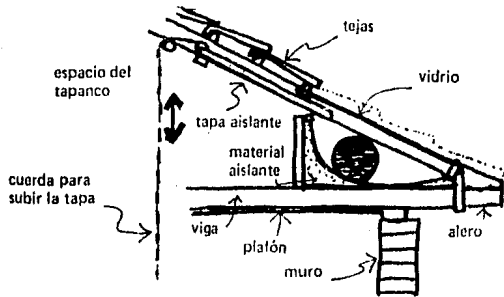


Figura 6.12

En los tanques horizontales hay que adaptar el tubo de entrada de agua fría. El tubo debe tener el extremo cerrado y tener perforaciones. La salida se construye normalmente en la parte superior del tanque, (figura 6.13).

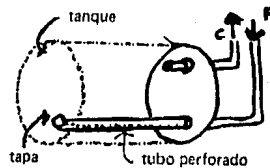


Figura 6.13

Colectores con tanques de gasolina.

Con un tanque plano de gasolina se hace un calentador más eficiente. El tanque el vidrio y el material aislante se colocan dentro de una caja. La presión en la tubería del agua fría (F) empuja al agua caliente del tanque por el tubo de salida (C). El depósito de agua fría debe estar más arriba que el calentador, figura 6.14.

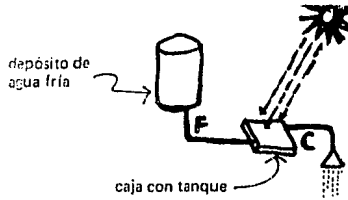


Figura 6.14

Este tipo de calentador no necesita válvula de presión porque cuando se calienta se aumenta de presión, ésta empujará el agua fría del depósito. Se puede usar un viejo tanque de gasolina de unos 40 litros o más. Estos tanques vienen en una gran variedad de formas: (figura 6.15),

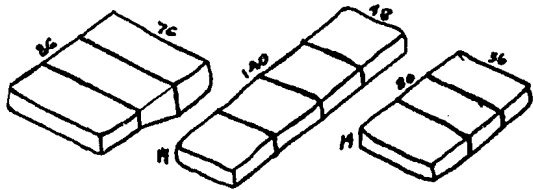
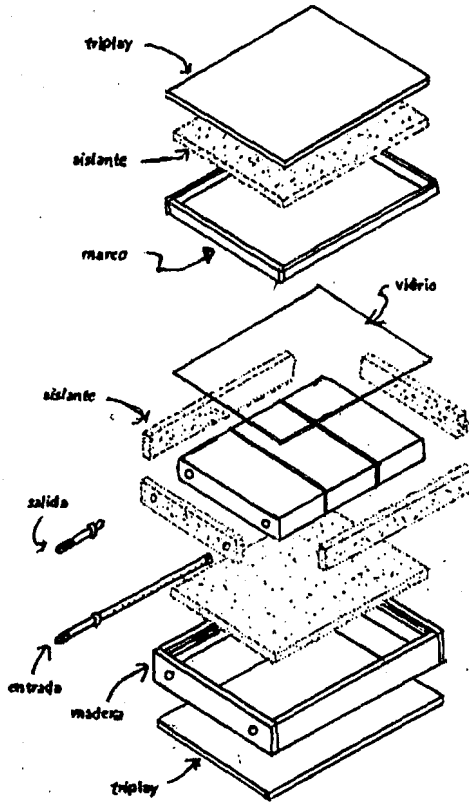


Figura 6.15

**CONSTRUCCION:**

I- Se limpia bien el interior y el exterior del tanque. Después se preparan dos tubos, uno de 12 cms. y otro de 12 cms. más largo que el tanque. La sección de este tubo, la que queda adentro del tanque, deberá cerrarse en un extremo y hacerle agujeros de unos 2 mm. a cada 3 cms. de separación en la parte que queda para abajo, (figura 6.16).



las partes de un calentador de 40 litros

Figura 6.16

Después hay que soldar los tubos en su lugar y probar con agua a presión para ver que no haya fugas. Con pintura negra mate se pinta el exterior del tanque

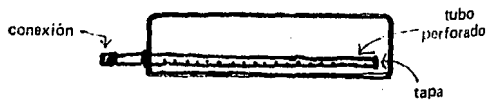


Figura 6.17

3- Se ensambla la caja y se colocan las placas de poliuretano. Después se hace la tapa de la misma manera y se pone una lámina de papel aluminio en el interior de la tapa.

La caja deberá tener a 2 cms. debajo de su borde una tira de 3 x 3 cms. para asegurar el vidrio, que se sellará bien con mastique.

Hay que cuidar que no haya fugas por los bordes del cristal, ni por los huecos donde entran y salen los tubos.

En la noche hay que cerrar la caja para que el calor ganado durante el día no escape con el frío nocturno, (figura 6.18).

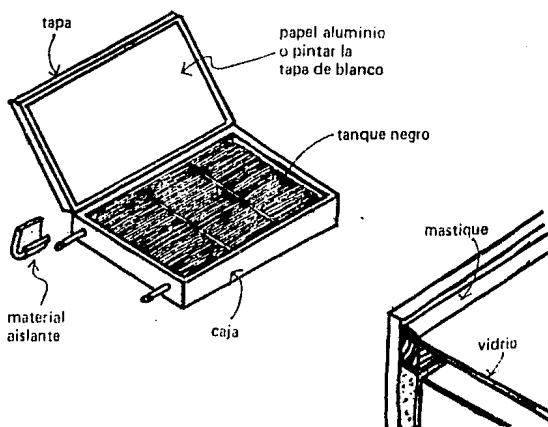


Figura 6.18

Las dimensiones interiores de la caja son iguales a las del tanque, más el espesor del material aislante, (figura 6.19).

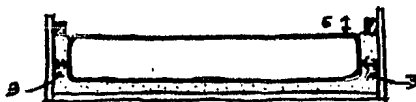


Figura 6.19

La tapa puede dejarse suelta o ser ensamblada con bisagras, de nuevo hay que cuidar bien que ésta cierra bien justa y que no haya fugas de calor. Cuando se deja abierta la tapa hay que quitarla en una posición que los rayos del sol reflejen sobre el tanque. La ubicación del calentador depende mucho del tipo de techo, la orientación de la casa y dónde está el depósito de agua.

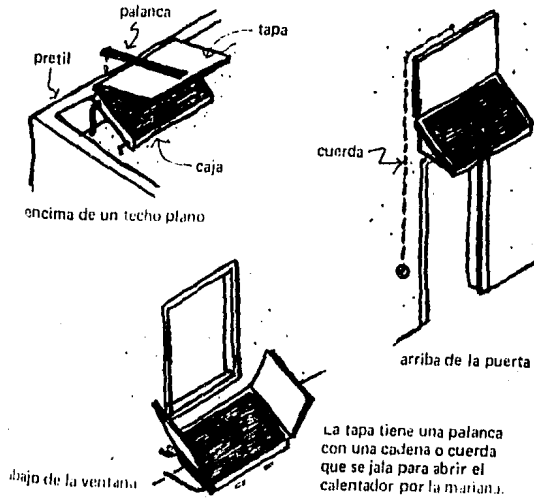


Figura 6: 20

Factores de calidad que debe reunir un colector solar.

- Si únicamente se requiere una temperatura media de utilización, el rendimiento no debe ser inferior al 50% ó 60% de eficiencia. (Todo el año, temp. no. 3a)
- Para bajas temperaturas, debería poderse llegar a rendimientos del 70 al 80 % de eficiencia. (Invierno en Chihuahua debido a heladas).
- Los materiales empleados para el aislamiento y el propio colector han de tener una inercia térmica lo más pequeña posible, a fin de alcanzar lo antes posible la temperatura de régimen del colector aunque la acción del sol dure poco tiempo. Por esta razón suelen ser preferibles los colectores que tienen poco contenido de agua por metro cuadrado de superficie colectora.
- La cara frontal del aislamiento térmico debe resistir todas las influencias atmosféricas.
- Ha de soportar altas temperaturas de funcionamiento en vacío.
- Se ha de poder integrar en montaje fijo en una estructura de edificio.
- Se ha de poder limpiar fácilmente.
- Las sujeciones y las piezas del bastidor no han de proyectar sombra propia.
- La superficie exterior del vidrio protector ha de reducir a un mínimo las pérdidas por reflexión.
- El colector ha de tener un valor K favorable, con lo que se reducen al mínimo las pérdidas propias.
- El vidrio de protección ha de ser lo más resistente posible a la rotura.
- Debe impedirse la congelación del agua en invierno.
- Debe evitarse el sobrecalentamiento en verano.
- Los movimientos térmicos no deberían causar roturas.
- El aparato debe ser anticorrosivo.
- Debería poderse cambiar con facilidad el vidrio de protección roto ó deteriorado.
- También ha de poderse cambiar un elemento completo de colector que sea defectuoso.
- Las juntas han de ser resistentes a la intemperie.
- Tiene que ser transportable sin problemas.

- Los aislamientos han de protegerse muy bien contra el agua ya que, si el aislamiento está húmedo, se reduce considerablemente el rendimiento del selector.
- Tienen que evitarse los puentes térmicos tanto en el selector propiamente dicho como en las conexiones del tubo.
- Debe tener una configuración lo más estética posible.
- Aún no están normalizadas las dimensiones de los selectores, y cada fabricante tiene sus propios tamaños. Debe procurarse que los selectores que se adquirieran se adapten al edificio, tanto constructiva como estéticamente.
- El fabricante de selectores solares debería presentar, como referencias, algunas instalaciones que funcionen satisfactoriamente.
- El selector debe tener un certificado de calidad.
- Debería ponerse a disposición del propietario una oficina de servicio y mantenimiento.

## CAPITULO VII

Conclusiones.



### CONCLUSIONES

- A) Como se ve en el desarrollo de esta tesis, en México, contamos con la información necesaria para estimar la radiación solar incidente en un colector solar así como para diseñarlo.
- B) La instalación de sistemas de captación de energía solar, para aprovecharla en el calentamiento de agua para uso doméstico o calefacción de albercas, se pueden utilizar en las comunidades rurales y urbanas.  
Esta energía ayudara a preservar en alguna medida las fuentes energéticas no renovables, dandoles un uso más eficiente en el desarrollo de nuestro país.
- C) La autoconstrucción de colectores solares para el calentamiento de agua de uso doméstico, esta al alcance de las personas de cualquier nivel económico de nuestro país.
- D) Las ventajas y desventajas de utilizar cierto tipo de sistema en el calentamiento de agua para uso doméstico o calefacción de albercas con energía solar, se encuentran descritas en los capítulos que tratan dichas temas.
- E) La energía solar como energético renovable, tiene un campo muy amplio de aplicaciones para el beneficio de la humanidad, y México es una de las naciones más favorecidas para aprovecharla al máximo.

## Bibliografía.

BIBLIOGRAFIA

- I **Energía solar y edificación.**  
SV Ssekelay.  
Editorial Blume.
- II **Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas.**  
José A. Manrique.  
Editorial Harla.
- III **Energía solar para el hombre.**  
B. J. Brinkwerth.  
Editorial Blume.
- IV **Manual del arquitecto descalzo. Como construir casas y otros edificios.**  
Jehan Van Langen.  
Editorial Concepto.
- V **Práctica de la energía solar.**  
Pierre Robert Sabady.  
Ediciones CEAC.
- VI **Cálculo de la radiación solar instantánea en la república mexicana.**  
José Luis Fernández Zayas y Vicente Estrada -Cajigal.  
Series del Institute de Ingeniería, U.N.A.M., No. 472.
- VII **Concentradores solares.**  
Rafael Almanza, Alberto Valdes y Serafin Lopez.  
Series del Institute de Ingeniería, U.N.A.M., No. D-16.
- VIII **Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de inselación.**  
Rafael Almanza y Serafin Lopez.  
Series del Institute de Ingeniería, U.N.A.M., No. 357.
- IX **Utilización de las superficies selectivas en la energía solar.**  
Rafael Almanza y Serafin Lopez.  
Series del Institute de Ingeniería, U.N.A.M., No. 378.