

Te  
UVG  
Fis  
@74  
1988

ESTUDIO SOBRE LA CONSTRUCCION Y EFICIENCIA DE UN  
CALENTADOR SOLAR

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

ESTUDIO SOBRE LA CONSTRUCCION Y EFICIENCIA DE UN  
CALENTADOR SOLAR

VICTOR MARCELINO CORTEZ PINEDA

Trabajo de investigación presentado para optar al  
grado académico de Licenciado en Física

Guatemala

1988

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

ESTUDIO SOBRE LA CONSTRUCCION Y EFICIENCIA DE UN  
CALENTADOR SOLAR

VICTOR MARCELINO CORTEZ PINEDA

Guatemala

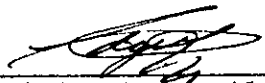
1988

Vo. Bo. :

(f)   
Licenciado Edgardo Alvarez  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Doctor Jorge R. Antillón Matta

(f)   
Licenciado Edgardo Alvarez

(f)   
Licenciado Anibal Cifuentes

Fecha de aprobación: 18 de agosto de 1988

## RESUMEN

Esta tesis trata sobre la construcción y eficiencia de un calentador solar plano, el calentador se construyó con base en argumentos teóricos para obtener una eficiencia aceptable y a un bajo costo.

Para la construcción se utilizó una lámina de hierro de 3 mm de grosor a la cual se le soldaron 12 tubos de cobre de 3/8" de diámetro con estaño 60/40 a todo lo largo de cada tubo.

Los tubos laterales son de PVC a la entrada del agua y de CPVC a la salida y están interconectados con los tubos de cobre con adaptadores de cobre.

Se utilizó también una caja de madera con un forro interior de duro por de 3 cm de espesor y pintado de negro mate en el exterior. La lámina se pintó de color blanco brillante en el lado inferior y de una mezcla de pintura negro mate con polvo de carbón vegetal en la parte superior.

La lámina con los tubos se colocó dentro de la caja y se cubrió con un vidrio transparente de 3 mm de grosor, la eficiencia de funcionamiento del colector se pidió: la temperatura de entrada y de salida del agua, el flujo, la velocidad del viento, la humedad relativa del aire, la temperatura ambiente a la sombra, la temperatura ambiente al sol y la intensidad de la luz solar incidente sobre el colector.

Utilizando la ecuación:

$$\eta = Fr \gamma \alpha - Fr U_L (T_i - T_a) / H_t = Q_u / H_t A_c$$

Se encontró la eficiencia de funcionamiento, la cual en promedio fue de 2.5% y la más alta obtenida, variando el flujo, fue de 9.5%.

Las temperaturas más altas se obtuvieron entre las 12:00 a las 14:00 horas y la más alta fue de 69.5°C.

La construcción del calentador se hizo en 2 meses, y el mayor problema fue en la soldadura entre los tubos de cobre y la lámina de hierro.

Las medidas necesarias para encontrar la eficiencia se hicieron durante los meses de Diciembre, Enero y Febrero de los años 1986, 1987.

Luego se hizo un tratamiento por computadora para encontrar la eficiencia por hora y la eficiencia por día del colector solar.

Las medidas se hicieron cada hora de las 8:00 a las 17:00 horas durante los meses mencionados anteriormente.

## C O N T E N I D O

	Página
I. <b>INTRODUCCION</b>	1
A.    Objetivos	1
B.    Energía Solar	2
II. <b>MARCO TEORICO</b>	16
A.    Materiales conductores y aislantes	16
III. <b>CONDICIONES NECESARIAS</b>	26
A.    Consideraciones físicas de la conversión de la energía solar	26
B.    Propiedades térmicas de algunos materiales	46
IV. <b>EL EXPERIMENTO</b>	48
A.    Diseño y construcción del calentador experimental	49
B.    Metodología	57
C.    Costos del Colector	60
V. <b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	62
VI. <b>DISCUSION Y CONCLUSIONES</b>	89
VII. <b>RECOMENDACIONES</b>	92
VIII. <b>GLOSARIO</b>	94
<b>APENDICES</b>	97
A.    Pérdida de presión por un líquido al paso por un material de forma diferente	97
B.    Programa de computadora para encontrar la eficiencia de un calentador solar	98
IX. <b>BIBLIOGRAFIA</b>	105

## LISTA DE FIGURAS

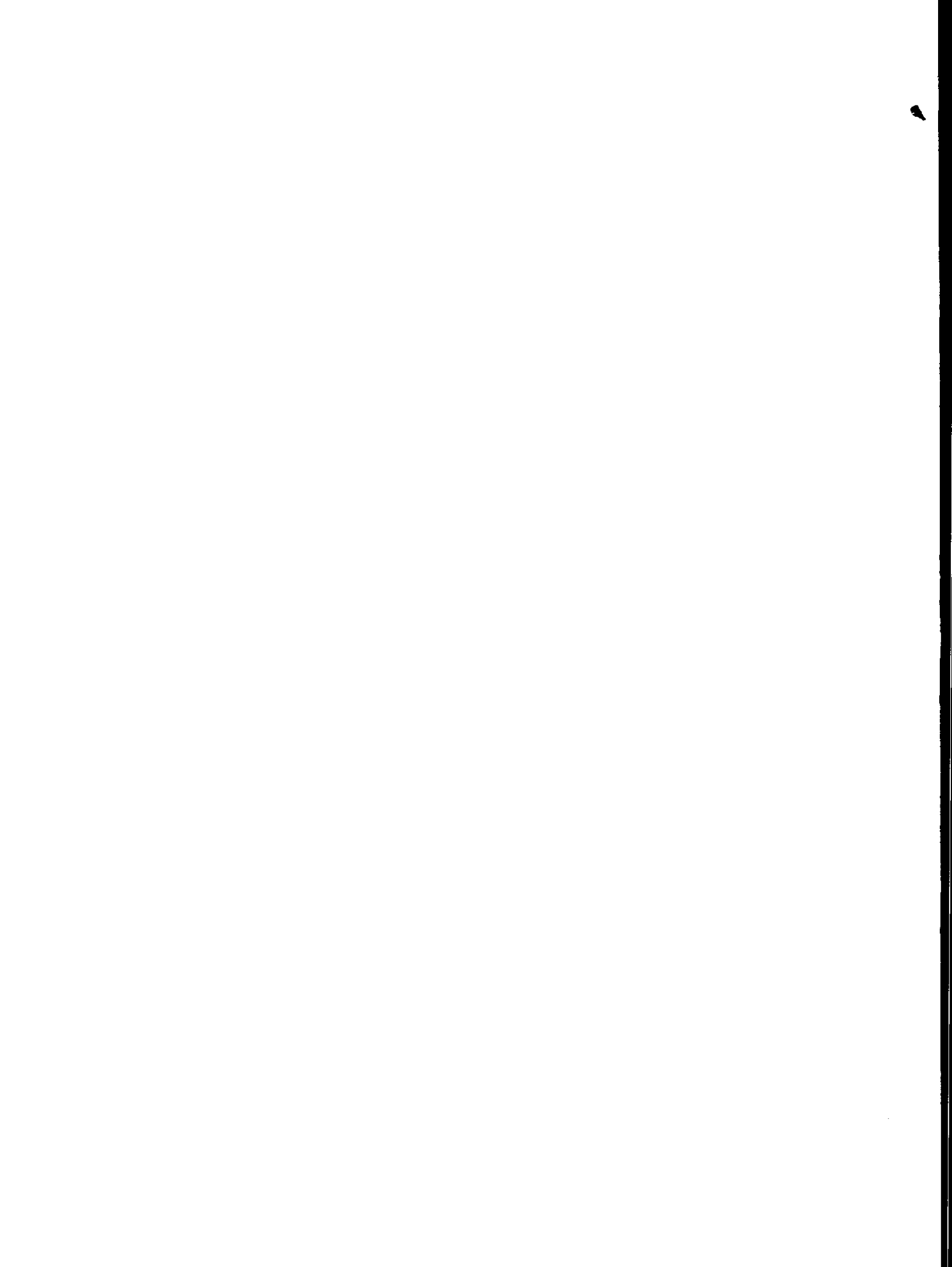
Figura		Página
1	Colector solar ideal	36
2	Sistema ideal para tratar el problema de la eficiencia	42
3	Conversión térmica	42
4	Eficiencia de conversión y temperatura óptima del colector	44
5	Eficiencia de conversión vrs. calor rechazado	45
6	Corte de las tablas del colector	49
7	Caja de madera	50
8	Unión de los adaptadores del colector	51
9	Tubería del colector	52
10	Soldadura hecha entre los tubos y la lámina de metal	53
11	Caja de madera con duropor	53
12	Colocación del vidrio sobre el duropor	54
13	Soportes del colector	55
14	Corte transversal del colector	55
15	Medida de la temperatura a la entrada y a la salida del colector	58
16	Medidor de flujo	59
17	Variación de la temperatura del líquido al pasar por la placa del colector	88

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Espectro de irradiancia solar	5
2	Medidas de insolación (ver glosario) en la ciudad de Guatemala	8
3	Conductividades térmicas	10
4	Coeficientes de convección natural	12
5	Propiedades térmicas de algunos materiales	46
	En las tablas N°6 a la N°51 se presentan medidas de tiempo, flujo, temperatura am- biente, radiación solar, eficiencia del calentador solar, ganancia útil del colec- tor, factor de eficiencia del colector y, el coeficiente de pérdida del colector	
6	.....	63
7	.....	63
8	.....	64
9	.....	64
10	.....	65
11	.....	65
12	.....	66
13	.....	66
14	.....	67
15	.....	67
16	.....	68
17	.....	68

Tabla	Página
18 .....	69
19 .....	69
20 .....	70
21 .....	70
22 .....	71
23 .....	71
24 .....	72
25 .....	72
26 .....	73
27 .....	73
28 .....	74
29 .....	75
30 .....	75
31 .....	76
32 .....	76
33 .....	77
34 .....	77
35 .....	78
36 .....	78
37 .....	79
38 .....	79
39 .....	80
40 .....	80

Tabla	Página
41 .....	81
42 .....	81
43 .....	82
44 .....	82
45 .....	83
46 .....	83
47 .....	84
48 .....	84
49 .....	85
50 .....	86
51 .....	87



## I. INTRODUCCION

### A. OBJETIVOS

#### 1. Generales:

- a) Estudio de un calentador solar plano
- b) Describir los elementos de un colector solar para calentar agua
- c) Identificar los parámetros más importantes que afectan el diseño y construcción del sistema

#### 2. Específicos:

- a) Definir la eficiencia del colector
- b) Encontrar la eficiencia de un calentador
- c) Identificar los parámetros que afectan la eficiencia de un colector
- d) Encontrar la eficiencia dependiente de la temperatura y flujo de entrada y salida
- e) Determinar los costos del calentador solar
- f) Comparar la eficiencia del calentador solar con otros tipos de convertidores de energía
- g) Reconocer las ventajas y desventajas de colectores para calentar agua

## B. ENERGIA SOLAR

Todos sabemos que las fuentes de energía existentes en el globo terrestre son limitadas. Por mucho tiempo fue utilizado el carbón mineral y el carbón vegetal y aún en la actualidad hay reservas de esas fuentes de energía. Como un sustituto al carbón surgió el petróleo, el cual ha sido utilizado de muchas formas, siendo las más conocidas la gasolina, aceites, grasas, etc.; a la par del uso del petróleo ha estado también el uso del gas natural, pero estas fuentes de energía no son inagotables y las reservas de petróleo durarán sólo unos años más. En nuestra época es necesario que se piense en sustitutos de estas fuentes de energía, principalmente en países donde no se puede utilizar la energía nuclear, que es también otra fuente de energía utilizada por países de tecnología avanzada. Es sencillo observar nuestro derredor y ver que existen otras fuentes de energía, el agua en movimiento, el viento, la energía solar, etcétera.

De estas fuentes de energía la más utilizada es el agua en movimiento, ríos, lagos, embalses, etc., la cual se utiliza para generar energía eléctrica; ésta a su vez es transportada a grandes distancias para ser utilizada en formas diversas, después de haber sido transformada en energía calórica, mecánica, electromecánica, etcétera, en la industria y en el hogar.

La energía eléctrica se utiliza en un porcentaje considerable en calentar agua. Por estudios realizados se sabe que la eficien-

cia de un calentador eléctrico es de menos del 3%, ref. (11) y con riesgo de un corto circuito. Para poder darnos una idea de cuánta energía calórica se consume, podemos suponer lo siguiente: en Guatemala existen poco más o menos 8 millones de habitantes si es necesario calentar un metro cúbico de agua por cada cien personas al día se deben calentar unos ochenta mil metros cúbicos de agua al día.

¿Será posible tener una manera de calentar agua con una fuente de energía barata y transportable a todas partes y a todas horas?

Una fuente de energía utilizable en todas partes pero no a todas horas, es el sol. Es gratis y no necesita ser transportada porque automáticamente llega a todo lugar, sólo hay que buscar un método para captarla y transformarla.

El sol es una estrella y en ella ocurren reacciones nucleares que producen grandes cantidades de energía y una pequeña parte de ella es la que llega a nuestro planeta en forma de ondas electromagnéticas. De la energía total liberada en el sol sólo una billonésima parte es la que llega a nuestro planeta.

A esta pequeña cantidad de energía puede atribuírsele casi la totalidad de los procesos meteorológicos y biológicos que se dan en la Tierra.

Desde hace mucho tiempo se han venido investigando las propiedades de las ondas electromagnéticas y actualmente se ha desarrollado toda la teoría necesaria para poder construir elementos de captación de la energía solar.

En países como Israel, Estados Unidos, Japón, etc. existen en la actualidad gran cantidad de esos elementos ya sea en uso domiciliario o en investigación. Muchos de esos proyectos son ambiciosos pero cuestan mucho dinero y en países como el nuestro, en el cual no contamos con capital para hacer investigación para el futuro, podemos utilizar esos elementos de captación para fines domésticos e industriales a pequeña escala, actividades agrícolas, etc.

El centro del sol está a una temperatura de millones de grados Celsius, mientras que su capa externa está entre unos 5800 a 6300 grados Celsius. Esto permite que el sol emita energía hacia el espacio en forma de ondas electromagnéticas. Todas las ondas electromagnéticas tienen la misma naturaleza. Según sus características pueden clasificarse en:

ONDAS VISIBLES: son las que pueden percibirse por nuestros ojos.

ONDAS INFRARROJAS: las que producen calor en los cuerpos.

Una de las características de la onda es su longitud de onda, la cual es la que más interesa, pues de ella depende la cantidad de energía transportada por la onda y su poder de penetración. Entre más pequeña es la longitud de onda, la energía transportada y el poder de penetración son mayores.

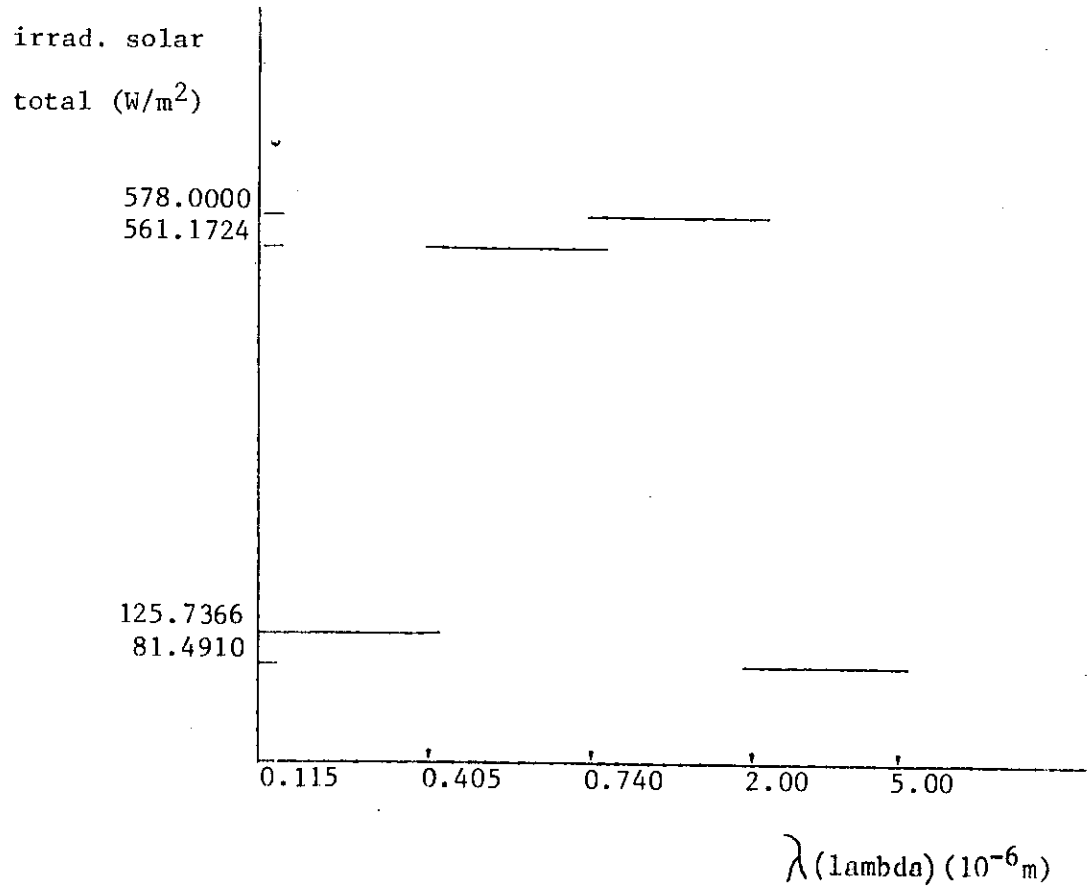
La energía solar que recibe la Tierra antes de atravesar la atmósfera es:

Espectro de irradiancia solar a varias longitudes de onda basado sobre una constante solar de  $1353 \text{ W/m}^2$ .

TABLA N° 1

longitud de onda ( $\lambda$ ) rango: ( $1 \times 10^{-8}$ m)	irradiancia solar total ( $W/m^2$ )	porcentaje de constante solar (%)	
ultravioleta			
0.115-0.405	125.7366	9.293	
visible			
0.405-0.740	561.1724	41.476	
0.115-0.740	686.9090	50.769	total
infrarrojo			
0.740-2.000	578.0000	42.720	
0.115-2.000	1264.9090	93.489	total
2.000-5.000	81.4910	6.023	
0.115-5.000	1346.4000	99.512	total
0.115-1000	1353.0000	100.000	total

Ref. (4)



Se puede concluir que debemos tratar de capturar las ondas de 0.405 a 2.00  $\mu$  ( $\mu$  = micras) para aprovechar la energía solar porque representan el 84.489% de la energía que llega a la Tierra.

Muchas de estas ondas electromagnéticas son absorbidas en la atmósfera terrestre y sólo nos llega la luz visible y rayos infrarrojos cercanos, pero muy atenuados (ver apéndice A).

CONSTANTE SOLAR: la constante solar representa la mayor cantidad de calor teóricamente aprovechable por unidad de área y por unidad de tiempo, medida fuera de la atmósfera. Su valor es de:

$C = 1367 \text{ W/m}^2$  medida por Hiekey en 1976 (Furlán, página 62). Se de

nomina "insolación" a la cantidad de energía solar recibida por unidad de área y por unidad de tiempo.

#### TIPOS DE INSOLACION:

- a) Directa: es aquella que llega en línea recta desde la fuente. Un día claro tiene entre el 80 y el 85% de luz directa.
- b) Difusa: es aquella que no procede directamente de la fuente, porque ha sufrido refracciones o reflexiones, parece venir de todas partes. En un día claro un 20% es de ese tipo.
- c) Reflejada: es aquella que llega reflejada por superficies de cuerpos sólidos cercanos.

Este tipo de energía es de baja intensidad (ver apéndice A) y para captarla se necesitan superficies grandes. Su intensidad es variable e incontrolable, es intermitente porque está disponible sólo en horas del día y debe contarse con un sistema de almacenamien-to si se desea aprovechar durante la noche o en días nublados.

El grado de insolación es afectado por el tiempo que dura la iluminación solar expresada en horas y por el ángulo de incidencia. ver tabla (2). La insolación óptima es aquella que es perpendicular a la superficie. De toda la cantidad de energía que llega al suelo y que podría captarse y utilizarse, sólo el 1% es utilizado en el proceso de fotosíntesis y el resto no es aprovechado por el hombre.

Una unidad de insolación se expresa como unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo. Se emplea mucho el Langley (ver apéndice A) que equivale a  $4.19 \times 10^4 \text{ J/m}^2\text{s}$

TABLA N° 2

Medidas de insolación en la ciudad de Guatemala

Registros de 1981-1982 en Langley por día

Enero	417	Mayo	467	Septiembre	367
Febrero	435	Junio	407	Octubre	365
Marzo	532	Julio	410	Noviembre	424
Abril	532	Agosto	456	Diciembre	407

Ref(9)

Propagación de la temperatura:

La temperatura se propaga en forma de ondas electromagnéticas y dependiendo del medio en que se propague podemos decir en general que se propaga por conducción, convección y radiación.

Propagación del calor por Conducción:

Si en una llama se coloca un extremo de una barra metálica y en el otro extremo se coloca un termómetro, puede observarse que la temperatura va aumentando poco a poco, aunque esta parte de la barra no está en contacto con la llama. Podemos decir que el calor llega al extremo frío de la barra por conducción a través de ella. Tenemos que las moléculas del extremo a alta temperatura aumentan su vibración, "chocan" con sus vecinas que se mueven lentamente y de esta manera le transmiten parte de su energía cinética y las vecinas a su vez, la transmiten a sus otras vecinas hasta llegar al extremo frío. Entonces la energía térmica se transmite de molécula en molécula.

cula, pero cada molécula se mantiene en su posición original. Los metales son buenos conductores del calor, esto se debe a que en su estructura atómica existen los llamados electrones libres que forman parte también del fenómeno de propagación del calor. La conducción del calor sólo se produce si el cuerpo tiene diferentes temperaturas. El flujo de calor va de las partes de mayor temperatura a las partes de menor temperatura.

Si cada punto del cuerpo permanece en estado estacionario la ecuación que rige el comportamiento del flujo calorífico es:

en tres dimensiones  $h = -k \nabla T$

donde

- $k$  - es el coeficiente de conductividad térmico
- $A$  - es el área transversal de propagación del calor
- $/h/ = dQ/Adt$  - cambio del calor con el tiempo
- $\nabla T$  - gradiente de temperatura

La ecuación anterior se reduce a  $dQ/Adt = -k dT/dx$  cuando el calor se propaga sólo en una dimensión y

$dT/dx$  - es el gradiente de temperatura

TABLA N° 3

## Conductividades Térmicas

	k (Jm/sm <sup>2</sup> K)	k (calcm/scm <sup>2</sup> °C)
metales:		
acero	50.232	0.12
aluminio	205.114	0.49
cobre	385.112	0.92
latón	108.836	0.26
plata	406.042	0.97
Otros Sólidos:		
corcho	0.04186	0.0001
fieltro	0.4186	0.0001
ladrillo rojo	0.6279	0.0015
madera	0.12558-	0.0003-
	0.04186	0.0001
vidrio	0.8372	0.002
Gases		
aire	0.0238602	0.000057
hidrógeno	0.138238	0.00033
oxígeno	0.0234416	0.000056

La tabla N° 3 es sin referencia específica

### Propagación del calor por convección

Propagación del calor de un lugar a otro por un movimiento real de la sustancia caliente. Si la sustancia caliente es obligada a moverse, se llama convección forzada, en tanto que si la sustancia se mueve por diferencia de densidades, se denomina convección natural.

El calor ganado o perdido por una superficie a determinada temperatura, en contacto con un fluido a menor temperatura, depende de:

1. que la superficie sea plana o curva
2. que sea horizontal o vertical
3. que el fluido en contacto con la superficie sea un líquido o un gas
4. la densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica del fluido
5. que la velocidad del fluido sea suficientemente pequeña para producir un régimen laminar o lo bastante grande para originar un régimen turbulento.
6. si tiene lugar evaporación o condensación.

Un parámetro útil es el coeficiente de convección  $h$  que se define por medio de la fórmula:

$$H = hAdT \quad (1)$$

donde:

- $H$  - corriente calorífica de convección (calor ganado o perdido por convección por una superficie, por unidad de tiempo)
- $A$  - es el área de la superficie

$\Delta T$  - diferencia de temperatura entre la superficie y la masa principal del fluido.

TABLA N° 4

Coefficientes de convección natural en el aire a presión atmosférica

dispositivo	coeficiente de convección h en $J/sm^2K$	coeficiente de convección h en $cal/scm^2^{\circ}C$
lámina horizontal, mirando hacia arriba	$0.02491(\Delta T)^{1/4}$	$0.59 \times 10^{-4}(\Delta T)^{1/4}$
lámina horizontal, mirando hacia abajo	$0.01314(\Delta T)^{1/4}$	$0.31 \times 10^{-4}(\Delta T)^{1/4}$
lámina vertical	$0.01775(\Delta T)^{1/4}$	$0.424 \times 10^{-4}(\Delta T)^{1/4}$
tubo horizontal o vertical (diámetro D)	$0.04186(\Delta T/D)^{1/4}$	$1.00 \times 10^{-4}(\Delta T/D)^{1/4}$

#### Propagación del calor por radiación

Cuando colocamos la mano en contacto directo con un radiador de calefacción de agua caliente, el calor alcanza la mano por conducción a través de las paredes del radiador. Si la mano se mantiene encima del radiador, pero no en contacto con él, el calor alcanza la mano por medio de un movimiento de convección hacia arriba de las corrientes de aire.

Si se coloca la mano a un lado del radiador todavía se calienta, aunque la conducción a través del aire es despreciable y la mano no está en la trayectoria de las corrientes de convección; entonces la energía alcanza la mano por radiación. Radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuer

pos. Esta energía se denomina energía radiante y se encuentra en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz y se transmiten a través del vacío lo mismo que a través del aire. Cuando inciden sobre un cuerpo que no es transparente a ellas son absorbidas y su energía es transformada en calor. La energía radiante emitida por una superficie, por unidad de tiempo y por unidad de área, depende de la naturaleza de la superficie y de su temperatura. A bajas temperaturas, la radiación por unidad de tiempo es pequeña y la energía radiante es casi toda de longitud de onda relativamente grande. Cuando la temperatura aumenta, la radiación por segundo crece muy rápidamente y su longitud de onda es relativamente pequeña.

Josef Stefan dedujo, en 1879, que la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo puede expresarse como:

$$R = e\sigma T^4 \quad \text{ley de Stefan (2)}$$

donde:

R - cantidad de energía radiante emitida por segundo y por unidad de superficie, erg/s cm<sup>2</sup> o watt/m<sup>2</sup>

$\sigma$  - es constante y es igual a  $5.6699 \times 10^{-5}$  erg/scm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>  
o  $5.6699 \times 10^{-8}$  Watt/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

T - temperatura de la superficie en grados kelvín

e - emisividad del material que depende de la naturaleza de la superficie; su valor está comprendido entre cero y la unidad.

Para el cobre es 0.3

En general la emisividad es mayor para las superficies ásperas que para las superficies pulidas.

La cantidad neta de energía perdida o ganada por unidad de superficie y por unidad de tiempo es:

$$R_{\text{neto}} = e \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

donde  $T_2$  es la temperatura de los cuerpos que lo rodean y  $T_1$  es su propia temperatura.

#### Captación de la energía solar

La forma de captación más común, como dijimos antes, se da en las plantas verdes; éstas reciben, captan y después aprovechan la energía mediante el proceso de fotosíntesis. Con esto la energía lumínica es transformada en energía bioquímica en una forma altamente eficiente.

Los dispositivos hechos por el hombre para captar la energía solar se llaman generalmente colectores solares.

Un colector solar es un sistema diseñado para absorber la radiación solar y transferir la energía a un fluido que circula en su interior. La conversión se hace absorbiendo la radiación solar por medio de una placa que está en contacto con el fluido. El agua es uno de los fluidos que generalmente se emplean en los colectores solares.

Los colectores solares se clasifican en:

- a. planos
- b. concentradores

Los planos aprovechan tanto la insolación directa como la difu

sa. Podemos decir entonces que ellos pueden funcionar en días claros, soleados, o en días nublados. Los concentrados utilizan únicamente la radiación solar directa y poseen la ventaja, sobre los colectores planos, de producir altas temperaturas.

Los colectores planos pueden instalarse fijos, aunque a veces pueden moverse cada cierto tiempo para ajustarlos según sea la estación del año o la posición instantánea del sol.

Los calentadores concentrados casi siempre se instalan de manera que pueden moverse durante todo el día siguiendo la trayectoria del sol.

## II. MARCO TEORICO

### A. Materiales conductores y aislantes.

Un conductor es un material en el cual los portadores de carga son libres de moverse; en la mayoría de conductores los portadores de carga son los electrones, en otros casos la carga puede ser transportada por iones positivos o negativos. Un aislante (no conductor) es un material que no cumple las condiciones anteriores.

Propagación del calor en líquidos:

Desde el punto de vista macroscópico podemos decir que la propagación del calor en los líquidos tiene un comportamiento de propagación como en los sólidos, pues al calentarse las moléculas de agua aumentan su movimiento respecto de su posición de equilibrio, transmitiéndose de molécula en molécula hasta que todo el líquido esté a la misma temperatura. En los líquidos tiene lugar otro fenómeno y es el de transmisión del calor por diferencia de densidades del líquido al sufrir calentamiento.

Los conceptos fundamentales en el estudio de la captación de la energía solar, son:

- a. Cuerpo negro
- b. Efecto de invernadero

El mecanismo de captación de la energía solar, es el siguiente:

Si un cuerpo oscuro y ligeramente rugoso se interpone en la trayectoria de la luz se puede capturar parte de la energía transporta

da por los rayos luminosos. A todo material que atrape energía solar en esta forma se le llama "cuerpo negro". Un "cuerpo negro" perfecto es aquel capaz de absorber toda la energía que incide sobre él.

Los rayos solares, luz visible y ultravioleta, al chocar con un cuerpo ceden parte de su energía a los electrones exteriores de éste. Esta energía aumenta la amplitud de la vibración de los átomos del material y lo calienta progresivamente. El remanente de energía que no es absorbido, es reflejado en forma de ondas de mayor longitud de onda, rayos infrarrojos.

Los materiales transparentes, como el vidrio, el plástico, etc, permiten el paso de ondas luminosas visibles y ultravioleta, pero no el de todas las infrarrojas. Por eso, si una cámara cerrada tiene paredes transparentes y en el fondo un absorbente, la luz ingresa a través de las paredes y es parcialmente absorbida por ésta. Los rayos no absorbidos se reflejan como ondas infrarrojas que no pueden salir de la cámara, porque las paredes no se lo permiten. estas ondas infrarrojas quedan atrapadas y calientan el aire del interior de la cámara. Este es el llamado efecto de invernadero.

Un colector solar está compuesto de:

Una cubierta transparente consistente en una o varias placas transparentes de vidrio o de plástico. El propósito principal de las cubiertas es reducir la pérdida de calor por convección.

Su función es:

- a. provocar el efecto de invernadero
- b. reducir la pérdida de calor del aire encerrado
- c. proteger al absorbente de los efectos de la intemperie

Un absorbente que capta la energía y cambia la longitud de onda de los rayos incidentes que son reflejados de su superficie.

Puede ser una placa metálica, plástico negro, arena, cemento, etc. Ref (11)

La absorción de la energía solar produce un aumento en la temperatura de la superficie de metal y así la temperatura del fluido también aumenta al pasar por la placa. Bajo condiciones estables, el calor útil entregado por el colector solar es igual a la energía absorbida en la superficie de metal menos el calor perdido en la superficie de metal menos el calor perdido en la superficie misma y la pérdida en los alrededores. Esta relación la podemos escribir:

$$Q_u = A_c (H_t \tau \alpha - U_L (T_p - T_a)) \quad (4)$$

donde:

$Q_u$  - Es la energía útil entregada por el colector, J/h

$A_c$  - Es el área total del colector,  $m^2$

$H_t$  - Es la energía solar recibida sobre la superficie superior del colector y que incide perpendicularmente en la superficie del colector,  $J/h \ m^2$

$\tau$  - Es la fracción de la radiación solar incidente que se transmite en el material, adimensional.

$\alpha$  - Es la fracción de energía solar que se absorbe, absorptividad, adimensional.

$U_L$  - Es el coeficiente total de calor perdido, expresado en joules, transferido a los alrededores por hora y por  $m^2$  de la superficie del colector expuesto a la diferencia de la temperatura promedio de la superficie del colector y la temperatura ambiente.

$T_p$  - Es la temperatura de la superficie superior de la placa absorbente, K

$T_a$  - Es la temperatura ambiente, K

Calor perdido por el colector:

Para que el funcionamiento del colector sea económicamente práctico, el diseño y los factores de funcionamiento deben tomarse muy en cuenta; para ello se debe maximizar el primer término del lado derecho de la ecuación 4 y debe minimizarse el valor del segundo término. Esto quiere decir: aumentar la absorción de energía en la superficie de la placa y disminuir la pérdida de calor de esa superficie (lo mejor sería recuperar parte de esa energía y utilizarla).

Si una superficie metálica, a la intemperie, se utiliza como colector y con valores de  $U_L$  entre 6.306 y 31.53 J/s  $m^2$  la razón de pérdida de calor es muy grande, si la temperatura de la placa absorbente es de uno 10 a 20 grados celcius sobre la temperatura ambiente. Esta debería ser la  $Q_u$  máxima obtenida con una radiación de 945.9 J/h  $m^2$ , bajo estas condiciones nada de calor podría recuperarse del colector porque la pérdida de calor debería ser igual al calor solar

absorbido por la placa.

Para reducir la razón de pérdida de calor que ocurre por radiación y convección, se colocan una o más superficies transparentes, como vidrio, sobre la superficie metálica.

El vidrio transmite el 90 por ciento de la radiación solar que incide sobre él y reduce mucho el coeficiente de pérdida de calor  $U_L$ . Esto se debe a que suprime la pérdida por convección, por que el aire queda en reposo entre la superficie de metal y el vidrio. Además el aire absorbe radiaciones con longitudes de onda larga y la radiación térmica emitida por el metal caliente es de este tipo.

El coeficiente de pérdida de calor se reduce y su valor queda entre 5.8 y 11.36 J/s m<sup>2</sup>K utilizando una cubierta de vidrio. Si se utilizan dos cubiertas de vidrio puede reducirse hasta 4.06 J/S m<sup>2</sup>K. Como hay pérdida en el fondo y a los lados del colector se hace necesario utilizar un aislante adyacente a los lados y en el fondo, colocado en el interior del colector para aislarlo del medio ambiente y cuya resistencia térmica debería ser al menos de 10, para temperaturas medidas y para colectores planos. Todo lo anterior es imprescindible para aumentar la eficiencia del colector.

Además, de la ecuación 4, puede observarse que las pérdidas de energía decrecen debido a la diferencia de temperatura entre la placa y el medio ambiente. La temperatura ambiente queda fuera de nuestro control, pero la diferencia de temperaturas varía con el tiempo y con la localización geográfica, esto significa que la eficiencia

del colector también depende de esos factores. Entonces, un colector será más eficiente a bajas temperaturas de la placa que a altas temperaturas. Además, la temperatura de la placa depende de la temperatura del fluido que circula por él y que está en contacto directo con ella, de la velocidad del fluido en circulación y del tipo de fluido. La temperatura del fluido depende de la temperatura ambiente y la temperatura de la placa del sistema así como de la cantidad de radiación incidente y la transmitividad, la absorptividad y el área dependen del diseño del colector y de las condiciones de funcionamiento del colector mencionadas anteriormente.

Absorción de energía solar:

En la ecuación 4 el primer término es la energía solar absorbida en la superficie absorbente de la placa, que depende de la energía solar incidente sobre la superficie del colector y sólo está afectada por la orientación del colector, puede calcularse por la posición del colector.

La transmisividad del vidrio,  $\tau$ , es una función de la calidad de éste y el ángulo al cual la radiación solar llega a su superficie. Con una incidencia perpendicular a la superficie del vidrio, éste refleja cerca del 8 por ciento de la radiación. Un vidrio de 0.003 metros de grosor absorbe un 5% de radiación y el valor de  $\tau$  es de 0.88 si se toma en cuenta la variación del movimiento del sol durante todo el día. Esto es, porque la radiación varía conforme el Sol recorre la superficie terrestre en un día solar medio. La absorpti-

vidad solar de la radiación recibida en la superficie depende de las propiedades ópticas del material expuesto a la radiación solar. Las superficies que aparecen negras a los ojos tienen alta absorptividad para la luz visible del espectro y la mayoría de las veces son buenos absorbentes para la región infrarroja de la radiación solar.

Carbón negro vegetal, óxidos metálicos y las pinturas negras tienen absorptividades arriba de 0.95; esto quiere decir que ellas absorben el 95% de la radiación solar que llega a su superficie y el resto de la radiación se refleja hacia el vidrio.

La eficiencia del colector depende mucho de la absorptividad de esta superficie. Los tipos más comunes de superficies absorbentes son muy resistentes a altas temperaturas, por ejemplo, la pintura negra de aerosol puede soportar entre 149 y 200 grados Celsius.

Superficies selectivas: La mayoría de superficies que son buenos absorbentes para radiación solar son también buenos radiadores de calor y si tienen un  $\alpha$  de 0.95 para radiación solar, también radiarán calor a una razón de 95% del de un radiador perfecto. Ciertas combinaciones de superficies son capaces de absorber radiación solar con mucha efectividad y al mismo tiempo radiar calor a una baja velocidad; estas combinaciones se conocen como superficies selectivas y tienen absorptividades solares de 0.95 y una emisividad de 0.1.

Cuando se utiliza este tipo de superficies el coeficiente  $U_L$  tiene un valor pequeño.

Funcionamiento del colector:

Encontremos primero la ecuación que rige el funcionamiento. Hasta ahora hemos visto los factores de diseño más importantes que afectan el funcionamiento de un colector solar, específicamente los que controlan la pérdida de calor y los que se relacionan con la absorción de la radiación solar. Si todos los valores de la ecuación 4 se conocen, podemos calcular  $Q_u$ . Nótese que podemos medir la radiación solar, la temperatura promedio de la placa absorbente y la temperatura ambiente. La temperatura de la placa absorbente es muy difícil de determinar, porque está influida por las condiciones de funcionamiento del colector y por la temperatura del fluido que circula por él para calentarse. Este fluido controla en gran parte la temperatura de la placa absorbente y puede notarse en la ecuación 4. En un colector común la temperatura promedio de la placa es entre 5 y 10 grados Celsius sobre la temperatura del líquido que entra al colector, ref (7).

Es conveniente modificar la ecuación 4 sustituyendo la temperatura del fluido al entrar al colector por la temperatura promedio de la placa, aplicando también un factor de corrección al resultado para obtener el calor útil; entonces la ecuación puede escribirse así:

$$Q_u = F_r A_c (H_t \tau \alpha - U_L (T_i - T_a))$$

donde:

$T_i$  - es la temperatura del fluido que entra al colector y es igual

a la temperatura promedio de la placa.

Fr - es el factor de corrección y tiene un valor entre 0 y 1.0, de tal manera que el calor recuperado útil sea igual al obtenido con la ecuación (4). Esto es porque no hay razón alguna para que el resultado cambie.

El factor de corrección para la recuperación de calor, Fr, debe interpretarse como la razón del calor recuperado realmente al que podría ser recuperado si la placa del colector estuviera funcionando a una temperatura igual a la del fluido que entra al colector.

Esto puede lograrse si el fluido circulara tan rápido por el colector que podría ignorarse el aumento de la temperatura que atraviesa el colector y el coeficiente de transferencia de calor fuera tan alto que la diferencia de temperaturas entre la superficie absorbente y el fluido pudiera ignorarse.

Patrones de temperatura del colector:

El mejor coeficiente de transferencia de calor entre la placa de metal y el fluido, o sea el que se obtiene cuando las temperaturas son casi iguales para cualquier posición del colector, esto se obtendrá cuando se tenga el mejor valor de Fr. También, cuando el gasto sea mayor. Mientras más pequeño sea el cambio de temperatura de entrada y salida, la temperatura promedio de la placa se aproximará más a la temperatura del fluido que entra al colector.

Eficiencia del colector:

La ecuación (5) también puede escribirse como la eficiencia de

colección solar, o sea, la razón de calor útil captado dividido por la radiación solar total. Al dividir ambos lados de la ecuación por  $H_t$  y por  $A_c$

$$Q_u/H_t A_c = F_r \tau \alpha - F_r U_L (T_i - T_a)/H_t = \eta \quad (6)$$

Para un colector que funciona con una circulación de fluido constante  $A_c$ ,  $F_r$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  y  $U_L$  pueden obtenerse de la radiación solar y las condiciones de temperatura. Asumiendo que ellos son constantes, entonces la ecuación (6) representa una línea recta en una gráfica de eficiencia vrs  $(T_i - T_a)/H_t$ . Las características de esta línea son:

El intercepto es igual al valor numérico de  $F_r \tau \alpha$  y la pendiente de la línea es igual a  $-F_r U_L$ .

Entonces, si los datos experimentales sobre el calor recibido por el colector se hizo a varias temperaturas y las condiciones solares se plotean en una gráfica con la eficiencia en el eje vertical y  $(T_i - T_a)/H_t$  en el horizontal. La mejor línea recta que pasa por esos puntos es una representación total del funcionamiento del colector sobre todo su rango de operación.

La línea que interseca el eje vertical corresponde a la temperatura del fluido que entra y que es la misma que la temperatura ambiente y la eficiencia del colector está en su máximo. La línea que interseca el eje horizontal, significa que la eficiencia es cero. Esto corresponde a una baja radiación o una alta temperatura del fluido que entra al colector, el calor perdido es igual a la absorción solar y no hay calor útil obtenido por el colector.

BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD NACIONAL

### III. CONDICIONES NECESARIAS

#### A. Consideraciones físicas de la conversión de la energía solar.

La energía radiante puede convertirse en trabajo útil, energía mecánica, electricidad, etc., por medio de un proceso de conversión térmica. Como el ciclo de Carnot representa la máxima eficiencia para la conversión de energía térmica por medio de una máquina de calor que opera entre dos temperaturas cualesquiera, las consideraciones termodinámicas establecen un límite máximo para la eficiencia con la cual una máquina de conversión radiante puede dar trabajo útil de la energía radiante para un espectro de frecuencias e intensidades dadas. Los sistemas de conversión térmica involucran fundamentalmente diferentes mecanismos de interacción y tienen diferentes eficiencias máximas. La conversión de radiación por un proceso térmico se muestra en la figura (5). En conversión térmica, la energía radiante se absorbe en el colector como calor, calor a la temperatura del colector,  $T$ , determinada por el balance entre la radiación de entrada, la emisión radiante del colector y el calor extraído por la conversión; este último es utilizado para operar una máquina de calor y producir el trabajo útil de salida, con un poco de calor rechazado a un reservorio de baja temperatura  $T_0$ . Se calcula la radiación neta de entrada, menos la radiación térmica perdida, para una máquina de calor ideal (de Carnot), para convertirla en trabajo útil y optimizarla respecto del coeficiente

de absorción del colector y de su temperatura, para determinar la eficiencia de conversión máxima para un sistema de conversión térmico.

Balance detallado de las interacciones Radiación-Materia.

1. Flujo de radiación térmica.

De la ley de Planck, el flujo de fotones del espectro de cuerpo negro en equilibrio dentro de un volumen a una temperatura  $T$  y se expresa en unidades de fotones que cruzan en una dirección una unidad de área normal a la trayectoria de la radiación por unidad de frecuencia a una frecuencia  $(\nu)$  por unidad de ángulo sólido por unidad de tiempo:

$$I(\nu, T) = 2n^2 \nu^2 / c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1} \quad (7)$$

donde:

$n$  - es el índice de refracción del medio

$h$  - es la constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34}$  Joule seg)

$k$  - es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  Joule/K)

$c$  - es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

El flujo de fotones de cuerpo negro en equilibrio es isotrópico y el área proyectada es perpendicular a la trayectoria de la radiación. La radiación total incidente oblicuamente varía con el coseno del ángulo de incidencia del área normal, el flujo de fotones a través de un área unitaria dado como una función del ángulo  $\theta$  del área normal es:

$$I(\nu, \theta, T) = I(\nu, T) \cos \theta \quad (8)$$

## 2. Absorción y emisión

De un flujo de fotones arbitrario,  $I(\nu, \theta, \phi)$ , incidente sobre una superficie, por unidad de frecuencia (a una frecuencia  $\nu$ ) por unidad de tiempo, por unidad de ángulo sólido, por unidad de área normal a la trayectoria de la radiación, a una dirección y a un ángulo  $\theta$  a la superficie normal y a un ángulo azimutal  $\phi$ , una parte dada por:

$$I_{\text{abs}}(\nu, \theta, \phi) = I(\nu, \theta, \phi) \alpha(\nu, \theta, \phi, T) \cos \theta \quad (9)$$

es absorbida.

donde:

$\alpha(\nu, \theta, \phi, T)$  es la absorbtividad espectral direccional de la superficie a una temperatura  $T$ , el resto de fotones es reflejado o transmitido.

En general, la superficie emite tan bien como absorbe y al escribir la emisión como el producto de la emisividad espectral direccional,  $\xi(\nu, \theta, \phi, T)$ , por el flujo de fotones térmicos de cuerpo negro en equilibrio a la temperatura de la superficie,  $I(\nu, \theta, T)$ , el flujo de fotones emitidos por unidad de área de la superficie por unidad de frecuencia a otra frecuencia  $\nu$  por unidad de ángulo sólido en la dirección de  $\theta, \phi$  por unidad de tiempo es:

$$I_{\text{ems}}(\nu, \theta, \phi, T) = I(\nu, \theta, T) \xi(\nu, \theta, \phi, T) = I(\nu, T) \xi(\nu, \theta, \phi, T) \cos \theta \quad (10)$$

La relación entre  $(\nu, \theta, \phi, T)$  y  $(\nu, \theta, \phi, T)$  de la superficie se evalúa considerando cuando la superficie unitaria está localizada, encerrada dentro de un cuerpo negro, donde la temperatura es la de la superficie. El flujo de fotones de cuerpo negro en equilibrio,  $I(\nu, T)$ , dentro del recipiente es isotrópico, el flujo de fotones incidente,  $I(\nu, \theta, \phi)$ , en la ecuación (8) es  $I(\nu, T)$  independiente de la dirección y la ecuación (9) está dada por:

$$I_{\text{absbb}}(\nu, \theta, \phi, T) = I(\nu, T) \alpha(\nu, \theta, \phi, T) \cos \theta \quad (11)$$

Además, como el recipiente y la superficie están en equilibrio termodinámico, el flujo de fotones transferidos de cualquier unidad de área del recipiente a la superficie debería ser igual para todas las frecuencias del flujo de fotones emitidos de la superficie al área unitaria del recipiente. Si éste no fuera el caso, entonces debería ser posible en equilibrio una transferencia de fotones o de la superficie; haciendo una elección conveniente de filtros; esto violaría la segunda ley de termodinámica, entonces al igualar las ecuaciones (10) y (11) tenemos:

$$\begin{aligned} I_{\text{absbb}}(\nu, \theta, \phi, T) &= I(\nu, T) \alpha(\nu, \theta, \phi, T) \cos \theta \\ &= I_{\text{ems}}(\nu, \theta, \phi, T) = I(\nu, T) \mathcal{E}(\nu, \theta, \phi, T) \cos \theta \end{aligned} \quad (12)$$

de lo cual seguido de la ley de Kirchoff para una superficie se tiene que:

$$\alpha(\nu, \theta, \phi, T) = \mathcal{E}(\nu, \theta, \phi, T) \quad (13)$$

Es decir, la emisividad espectral direccional y la absorbtividad espectral direccional de una superficie son iguales a cualquier temperatura. Este resultado no depende de la super-

ficie son iguales a cualquier temperatura. Este resultado no depende de la superficie que está en equilibrio con la radiación incidente; la absorbtividad y la emisividad son propiedades de la superficie a una temperatura dada. Por la forma en que y están definidas, la radiación incidente en equilirbio dentro de un recipiente que actúa como cuerpo negro nos permite evaluarlas. Hay que enfatizar que su uso no depende o restringe la anturaleza de la superficie absorbente o el proceso de interacción de la radiación.

### 3. Equilibrio de Temperatura

En equilibrio para una interacción radiación-materia dada, cuando no ocurre un cambio neto en la temperatura del sistema, composición química, intensidad de radiación, etc, la entropía total del sistema radiación-materia es un máximo, y el cambio en entropía debido a la interacción es cero. En realidad el equilibrio termodinámico está caracterizado por un máximo absoluto de la entropía del sistema y la condición que  $\Delta S = 0$  para interacciones entre cualesquiera grados de libertad. Existe también un equilibrio más restringido, en el cual la interacción permite equilirbio solamente entre ciertos grados de libertad. En estos casos, en equilibrio, la entropía es algo relativo más que un máximo absoluto, pero el criterio que  $\Delta S = 0$  para la interacción, todavía sirve para definir las condiciones del sistema en el equilibrio restringido que se obtiene vía la interacción. La absorción de un fotón de frecuencia ( $\nu$ ) de un campo de radiación de cuerpo negro en equilibrio representa una energía térmica de  $h\nu$  del campo de radiación y un decrecimien-

to en entropía del campo de radiación de

$$\Delta S_r = -hv/Tr \quad (14)$$

donde:

Tr - Es la temperatura que caracteriza el campo de radiaciones como en la ecuación (7).

En un sistema de interacción térmica, la energía  $hv$  es absorbida como calor y resulta en un aumento de la entropía del medio, que es:

$$\Delta S_t = dQ/T = hv/T \quad (15)$$

donde:

T - es la temperatura del medio térmico

Cuando se obtiene el equilibrio, el cambio en entropía debido a la interacción es cero; de las ecuaciones (14)y(15) se tiene:

$$hv/T = hv/Tr \quad (16)$$

de donde se obtiene que  $T = Tr$

es decir un medio térmico y un campo de radiación en equilibrio tienen la misma temperatura. Este resultado se deduce de la relación  $dS=0$ .

La figura (3) muestra tres aspectos térmicos a bajas temperaturas con un aumento en la frecuencia. Los resultados obtenidos con las ecuaciones (7), (28) muestran la energía termodinámica mínima perdida que puede lograrse por el sistema. Por simplicidad se asumirá que la absorbtividad y la emisividad son independientes de la dirección, es decir, se asumen superficies espectrales difusas; entonces:

$$\alpha(v, \theta, \phi, T) = \alpha(v, T) = \xi(v, \theta, \phi, T) = \xi(v, T) \quad (17)$$

#### 4. Proceso de Conversión Térmica

La potencia térmica neta recibida por unidad de área por

un sistema de conversión térmica solar es la diferencia entre la potencia radiante incidente y la pérdida térmica

$$Q_{\text{neta}} = Q_{\text{incidente}} - Q_{\text{perdida}} \quad (18)$$

La potencia radiante incidente está compuesta de radiación solar directa y de radiación ambiente

$$Q_{\text{incidente}} = \int_0^{\infty} \int_{\Omega} I_s(\nu, \theta) h\nu \alpha(\nu, T) \cos\theta d\nu d\Omega + \int_0^{\infty} \int_{\Omega} I_a(\nu, \theta) h\nu \alpha(\nu, T) \cos\theta d\nu d\Omega \quad (19)$$

donde:

$I_s(\nu, \theta)$  - Es el flujo de fotones solares incidentes en el colector.

$I_a(\nu, \theta)$  - Es el flujo de fotones ambientales incidentes en el colector

$h\nu$  - Es la energía de un fotón de frecuencia  $\nu$

$\alpha(\nu, T)$  - Es la absorbtividad espectral de la superficie del colector

$d\Omega$  - Es el diferencial del ángulo sólido sobre el hemisferio a  $2\pi$  Sr, en la superficie del colector.

Sólo se tomará en cuenta la radiación directa del sol a través de una atmósfera transparente. La entrada ambiental se aume por radiación de cuerpo negro a la temperatura ambiente

de los alrededores. Si se representa el sol como un cuerpo negro.

$$\mathcal{E}(v, T) = \alpha(v, T) = 1 \quad (20)$$

Como fuente de radiación térmica a una temperatura  $T_s$ .

El flujo de fotones por unidad de frecuencia a una frecuencia  $v$  por unidad de tiempo por unidad de ángulo sólido en dirección  $\theta'$ ,  $\emptyset$  por unidad de área en la superficie del sol es:

$$I(v, \theta', \emptyset, T_s) = I(v, T_s) \cos \theta' \quad (21)$$

La proyección del área unitaria que emite en la dirección de propagación es:

$$1/\cos \theta' \quad (22)$$

Y el flujo de fotones por unidad de frecuencia a una frecuencia  $v$  por unidad de tiempo, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área del disco solar es

$$I = I(v, T_s) \quad (23)$$

que es independiente del ángulo. En el colector, este flujo es incidente sobre el ángulo sólido subtendido por el disco solar, entonces:

$$I_s(v, \theta) = I(v, T_s) \quad (24)$$

Sustituyendo este resultado en el primer término de la ecuación (19) e integrando sobre el ángulo sólido del disco solar como se ve desde el colector, la potencia solar incidente por unidad de área del colector es:

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\infty} \int_{\Omega} I_s(v, \theta) hv \propto (v, T) \cos\theta d\Omega dv \\
 = & \int_0^{\infty} I(v, T_s) hv \propto (v, T) dv \int_0^{\text{Sen}^{-1}(R_s/R_{eo})} \cos\theta \text{Sen}\theta d\theta \int_0^2 d\theta \\
 = & \int_0^{\infty} I(v, T_s) hv \propto (v, T) (R_s/R_{eo})^2 \pi dv \quad (25)
 \end{aligned}$$

donde:

$R_s$  - es el radio solar

$R_{eo}$  - es el radio de la órbita terrestre

$(R_s/R_{eo})^2 = 2.16 \times 10^{-5}$  (adimensional)

y el ángulo sólido del disco solar es:

$$\Omega = \pi (R_s/R_{eo})^2 = 6.80 \times 10^{-5} \text{ estereradianes}$$

Para un cuerpo negro isotrópico a una temperatura ambiente  $T_a$ , la radiación ambiente que incide sobre el colector a través

de un ángulo sólido de  $2\pi$  sobre la superficie es:

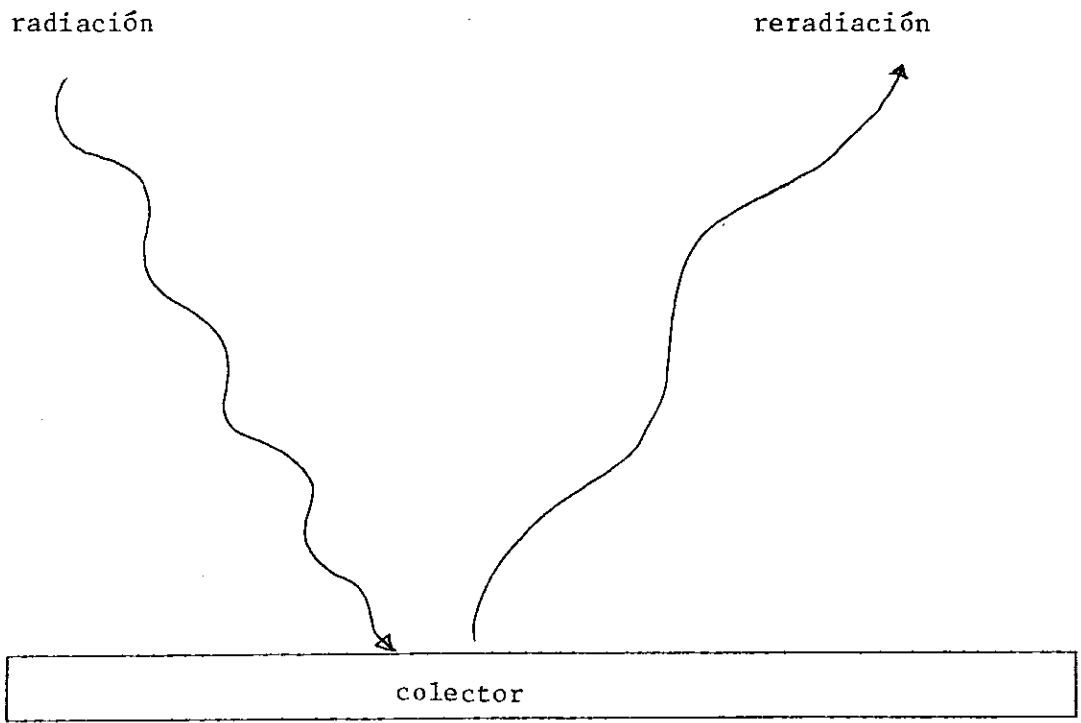
$$I_a(v, \theta) = I(v, T_a)$$

Sustituyendo este resultado en el segundo término de la ecuación (19), la potencia de radiación ambiente incidente por unidad de área sobre el colector es:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \int_{\Omega} I_a(v, \theta) h\nu \propto(v, T) \cos\theta \, d\nu \, d\Omega \\ = & \int_0^{\infty} I(v, T_a) h\nu \propto(v, T) \, d\nu \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \\ = & \int_0^{\infty} I(v, T_a) h\nu \propto(v, T) \pi \, d\nu \end{aligned} \quad (27)$$

Se asume un colector ideal sin pérdidas más que por rerradiación de cuerpo negro a la temperatura del colector y sólo a través de la superficie del colector, como se ve en la figura (1) y al utilizar la ecuación:

FIGURA No. 1



$$I_{thEMS}(v, \theta, \phi, T) = I(v, T) \alpha(v, \theta, \phi, T) \cos \theta \quad (28)$$

La pérdida de potencia radiante por unidad de área superficial del colector es:

$$\begin{aligned} Q_{perdida} &= \int_0^{\infty} \int_V I(v, T) hv \alpha(v, T) \cos \theta dv d\Omega \\ &= \int_0^{\infty} I(v, T) hv \alpha(v, T) \pi dv \end{aligned} \quad (29)$$

Combinando las ecuaciones (18), (19), (25), y (27) la potencia térmica neta recibida por unidad de área recibida por el convertor térmico es:

$$Q_{neta\ abs} = Q_{entrada} - Q_{perdida}$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} (I(v, T_s) (R_s/R_{eo})^2 + I(v, T_a)) hv \alpha(v, T) \pi dv \\ &\quad - \int_0^{\infty} I(v, T) hv \alpha(v, T) \pi dv \\ &= \int_0^{\infty} (I(v, T_s) (R_s/R_{eo})^2 + I(v, T_a) - I(v, T)) hv \alpha(v, T) \pi dv \end{aligned} \quad (30)$$

El calor  $Q$  colectado por el colector a una temperatura,  $T$ , puede convertirse en trabajo útil,  $w$ , con una eficiencia máxima dada por una máquina de calor de Carnot y para esta eficien-

cia máxima el proceso de conversión térmica es:

$$W = Q (1 - T_0/T) \quad (31)$$

donde:

$T_0$  - es la temperatura del reservorio dentro del cual el calor desechado  $Q - W$  es absorbido.

Combinando las ecuaciones (30) y (31), la potencia útil de salida de un sistema de conversión de energía solar térmica es:

$$P_{\text{útil}} = W = Q_{\text{neto abs}} (1 - T_0/T) \\ = \int_0^{\infty} (I(\nu, T_s) (R_s/R_{e0})^2 + I(\nu, T_a) - I(\nu, T)) h\nu (1 - T_0/T) \alpha(\nu, T) \pi d\nu \quad (32)$$

y dividiendo por la potencia solar incidente, la eficiencia de conversión es:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} (I(\nu, T_s) (R_s/R_{e0})^2 + I(\nu, T_a) - I(\nu, T)) h\nu (1 - T_0/T) \alpha(\nu, T) \pi d\nu}{\int_0^{\infty} I(\nu, T_s) (R_s/R_{e0})^2 h\nu \alpha(\nu, T) \pi d\nu} \quad (33)$$

Con un sistema como el que se muestra en la figura (2), el colector está caracterizado por una sola temperatura y de

las ecuaciones (7), (25), (27) y (29) la emisión térmica, flujo solar de entrada, y el flujo de entrada ambiente en la ecuación (33) tiene la forma de la figura (3). El espectro de la entrada solar es el de la fuente de alta temperatura, pero su magnitud por el factor de ángulo sólido ( $R_s/R_{eo}$ ) y a bajas frecuencias hace que la emisión térmica de la superficie del colector exceda la entrada solar. Seleccionando una absorbtividad del colector que sea pequeña a bajas frecuencias, como se muestra en la figura (3), la entrada solar absorbida se reduce sólo un poco, pero la radiación térmica perdida disminuye notablemente dando una eficiencia de conversión aumentada, con una función por pasos para la absorbtividad e independiente de la temperatura esta dada por:

$$\alpha(v, T) = \begin{cases} 0 & \text{si } v < v_0 \\ 1 & \text{si } v > v_0 \end{cases} \quad (34)$$

sustituyendo la ecuación (7) para la entrada solar, entrada ambiente y el flujo de emisión térmica en la ecuación (33) la eficiencia de conversión para el sistema de colección térmica está dada por:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} \frac{2\pi n^2 v^2}{c^2} \left\{ \left( \frac{R_s}{R_{eo}} \right)^2 \left[ e^{-\frac{hv}{KT_a}} - 1 \right]^{-1} + \left[ e^{-\frac{hv}{KT_a}} - 1 \right]^{-1} - \left[ e^{-\frac{hv}{KT}} - 1 \right]^{-1} \right\} hv \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dv}{\int_0^{\infty} (2\pi n^2 v^2 / c^2) (R_s / R_{eo})^2 (e^{hv/kTs} - 1)^{-1} hv dv} \quad (35)$$

El límite inferior de la integral del numerador refleja la absorbtividad dada como una función por pasos. Optimizando la ecuación (35) respecto de la temperatura del colector para diferentes valores de la frecuencia de corte,  $V_0$ , y con:

$$T_s = 6000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_a = T_o = 300 \text{ } ^\circ\text{K}$$

La temperatura óptima del colector y la frecuencia de conversión resultante como una función de  $V_0$  se muestra en la figura (4). Para valores pequeños de  $V_0$ , la pérdida radiativa se suspende sólo para bajas temperaturas del colector para el cual el término de Carnot es pequeño y la eficiencia de conversión es una función creciente de la frecuencia de corte. Para altas frecuencias de corte, poca de la radiación solar de entrada es absorbida y la eficiencia de conversión decrece con el aumento de la frecuencia de corte. Como se muestra en la figura (4), la eficiencia de conversión está optimizada para una frecuencia de corte intermedia y para un sistema térmico de un solo colector con una absorbtividad como una función por pasos, la eficiencia de conversión máxima, para una radiación solar sin enfocar, es:

$$\eta_{\text{teórica}} = 0.540 \quad \text{o} \quad 54\%$$

y se obtiene a una frecuencia de corte y a una temperatura del

colector de:

$$V_o = 2.22 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$T = 863 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Inherente al proceso de conversión térmica está el calor rechazado y que llega al reservorio que está a una temperatura  $T_o$ .

Como se muestra en la ecuación (35), la eficiencia de conversión depende directamente de la temperatura del reservorio a través del término que contiene  $T_o$  en el factor de Carnot e indirectamente a través de su efecto sobre la operación del colector a una temperatura dada,  $T$ . La eficiencia de conversión térmica como una función de la frecuencia de corte para diferentes valores de temperatura del reservorio,  $T_o$ , se muestra en la figura (5).

La eficiencia máxima de conversión térmica varía un 4% para todos los cambios de 50 K en la temperatura del reservorio.

FIGURA No. (2)

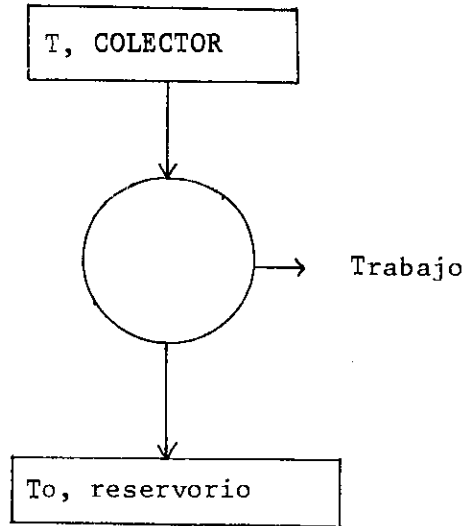


FIGURA NO. (3) Ref. (26)

Conversión térmica

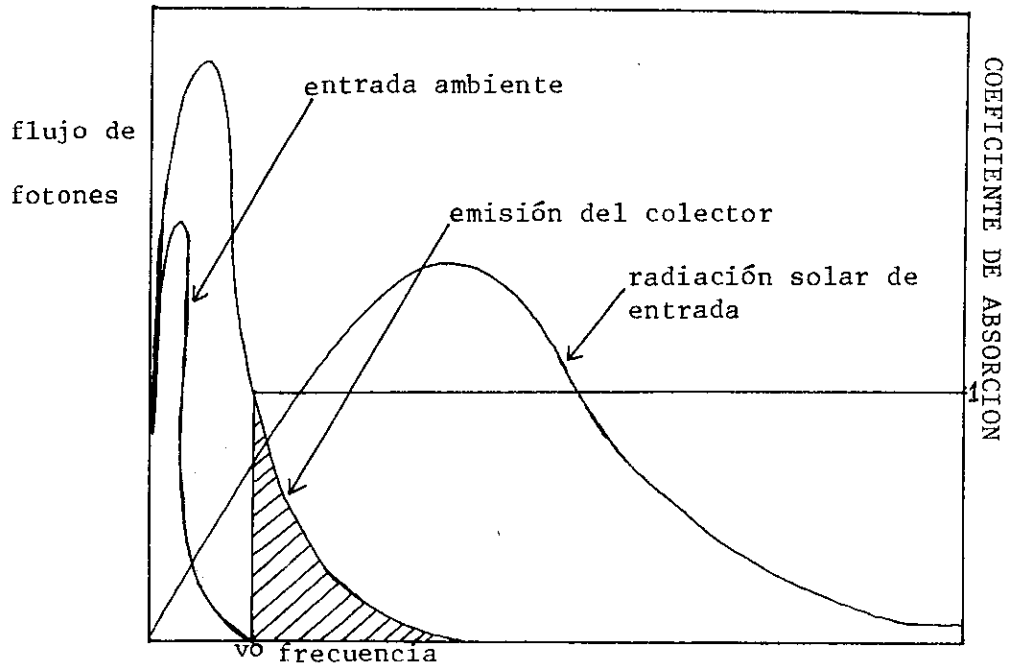


FIGURA No. (4) Ref. (26)

Eficiencia de conversión y temperatura óptima del colector para un sistema térmico de colección simple.

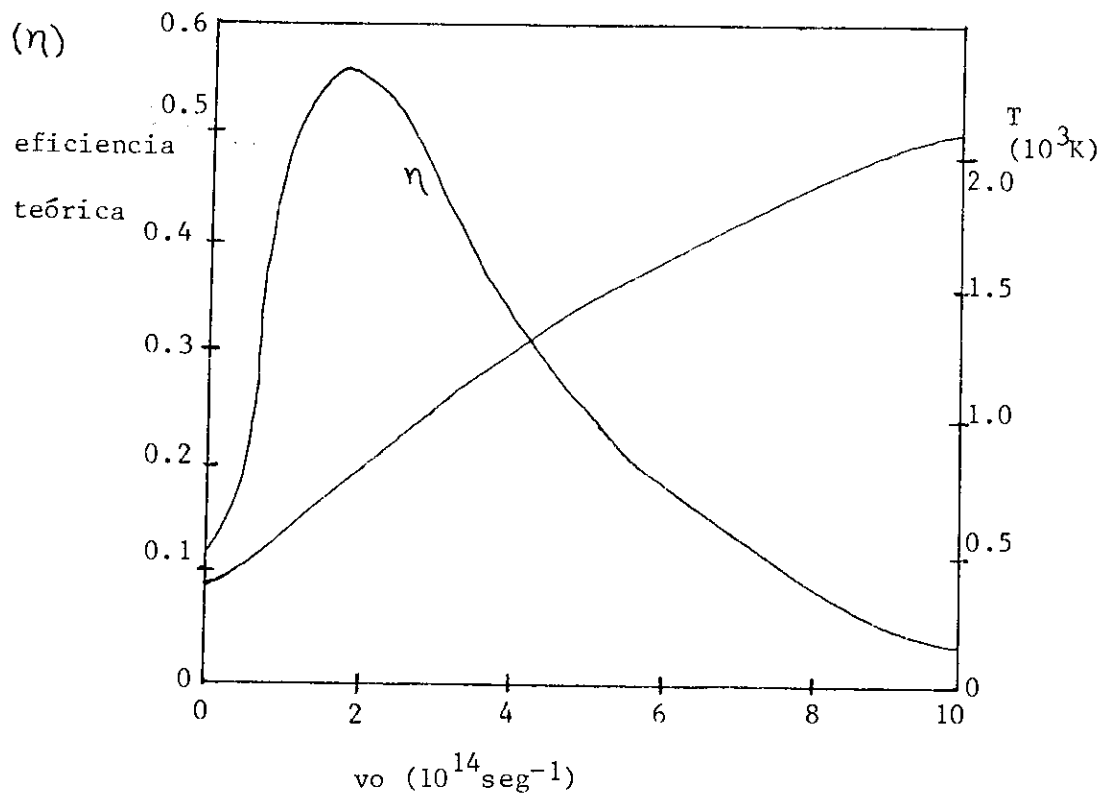
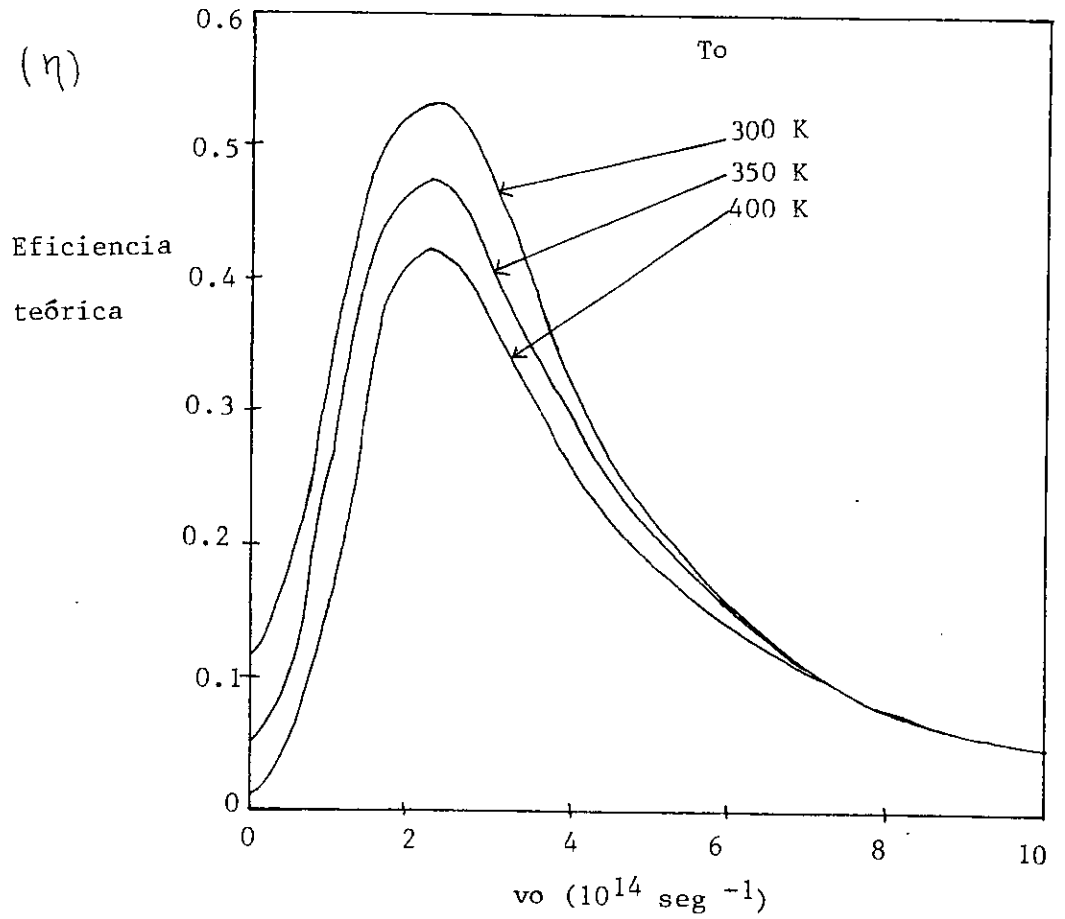


FIGURA No. (5)

Eficiencia de conversi3n versus calor rechazado a temperatura  $T_0$  para un sistema t3rmico de colector simple.



Ref. (26)

TABLA No. (5)

## B. propiedades térmicas de algunos materiales

Material	$\delta$ (Kg/m)	$C_p$ (KJ/KgC)	K (W/mC)	$\alpha$ (m/s) $\times 10^{-5}$	$\epsilon$ (A)	$T$ (A)	Abso (A)
Plata	10525	0.2340	407	16.503	0.022-		0.07
					0.031		
Cobre	8954	0.3831	366	11.234	0.15		0.25
Aluminio	2707	0.896	204	8.418	0.08	0.02	0.15
Hierro	7897	0.452	73	2.034	0.60-		0.8
					0.70		
Estaño	7304	0.2265	64	3.884	0.043-		
					0.044		
Plomo	11373	0.130	35	2.343	0.28		
Pintura negra					0.91		0.94
							0.98
Carbón							
Vegetal							
Duropore	15		0.037				
Agua	0.9974	4.179	0.604	----	0.95		0.94
Aire	1.1774	1.0057	0.026	0.0222			
Vidrio	2700	0.84	0.78	0.034	0.98	0.3	
Ciprés	460	----	0.097	----			
Pino amarillo	640	2.8	0.147	0.0982			
Vapor de agua	0.5863	2.060	0.025				

Donde:

$C_p$  : capacidad calorífica

$\delta$  : densidad

$k$  : conductividad térmica

$\alpha$  : difusividad térmica

$\epsilon$  : emisividad

$\tau$  : transmitividad

Abso : absorptividad

Ref. (6)

#### IV. EL EXPERIMENTO

##### A. Diseño y construcción del calentador experimental

El diseño se hizo con base en la teoría sobre calentadores solares y principalmente se tuvo en cuenta la pérdida de presión del fluido al pasar por la tubería de cobre, para ello se trató que el fluido recorriera el menor camino para reducir al mínimo esta pérdida de presión (ver apéndice B)

Construcción del calentador solar

Colector para líquido

Materiales:

Dos tablas de pino cepillado de 0.025x0.20x1.43 m(No. 1)

Dos tablas de pino cepillado de 0.025x0.20x1.38 m(No. 2)

Cinco tablas de pino cepillado de 0.025x0.3048x1.43 m

Dos reglas de pino cepillado de 0.0762x0.0762x0.95 m

Dos reglas de pino cepillado de 0.0762x0.0762x0.60 m

Cuatro reglas de pino cepillado de 0.0508x0.0508x0.25 m

Una libra de clavo de 0.0508 m

Una libra de clavo de 0.0889 m

Un cuarto de galón de cola blanca

Doce tubos de cobre de 3/8"x 1 metro de largo

Un tubo de cpvc de 1/2"x1.5 metros de largo

Un tubo de pvc de 1/2"x1.5 metros de largo

Dos codos de 1/2" , 90°

Veintidós tees de 1/2"

Veinticuatro adaptadores de 3/8" a 1/2" de cobre

Veinticuatro uniones de 1/2" de metal

Una llave de chorro de 1/2"

Una unión para el chorro de 1/2"

Una plancha de hierro de 3/16"x0.93x0.95 metros

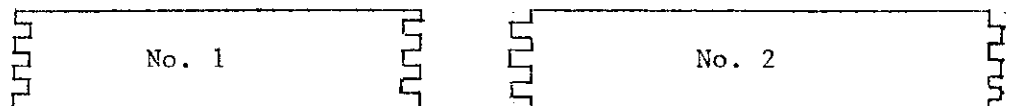
Un vidrio de 0.003x1.34x1.39 metros

Diez libras de estaño 60/40

Procedimiento:

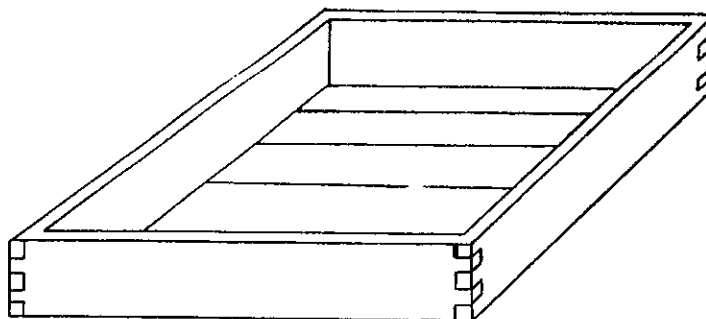
Se cortaron las tablas No. 1 y No. 2 como indica la siguiente figura:

FIGURA No. (6)



Las salientes deben coincidir exactamente entre las tablas. Se dio el mismo corte para las dos tablas No. 1 así como para dos tablas No. 2. Se armó el marco de madera como indica la figura, teniendo cuidado de echarle suficiente cola blanca y que quedara bien clavados.

FIGURA No. (7)



Se cubrió el fondo del marco con las tablas restantes para obtener un cajón, debe tenerse mucho cuidado de tener la madera seca para que no haya desajustes posteriores. Para todas las uniones en madera es necesario utilizar pegamento de contacto para madera en una cantidad suficiente para evitar fisuras en las uniones y que por ellas haya escapes de aire. Hay que recordar que el efecto de invernadero es producido por el aire encerrado en el sistema.

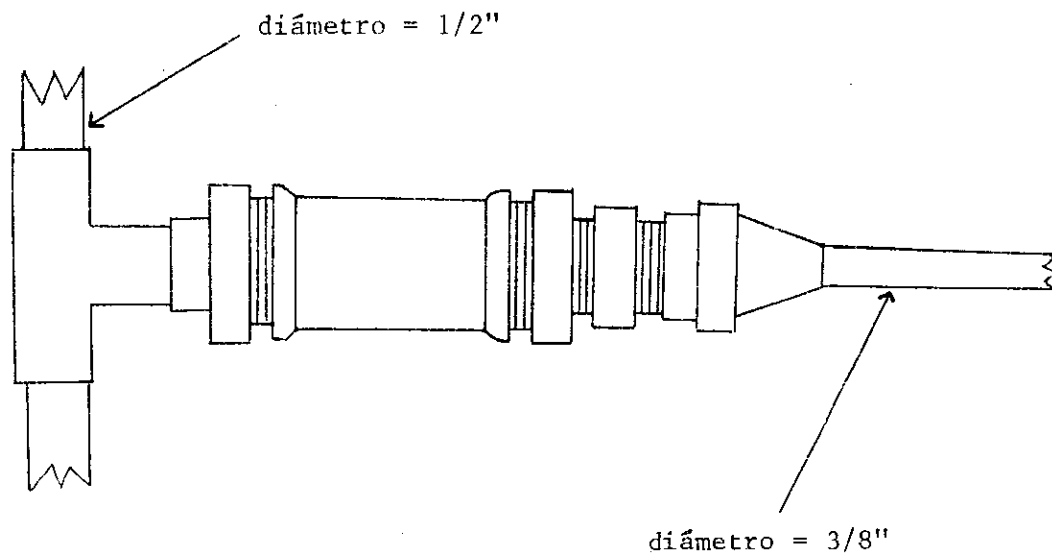
Se cubrió el fondo de la caja con un material aislante, en este caso se utilizó duropor de 0.03 m de espesor y se pegó una plancha del tamaño del fondo de la caja. Debe tenerse cuidado que la plancha de duropor no esté rajada para evitar fugas de aire o que el aire esté en contacto directo con el fondo de madera. Se cortó una tira de duropor del largo del interior de la caja y de un ancho entre 0.04 y 0.1 metros (tomar en cuenta que falta colocar la lámina de metal con la tubería soldada en ella) en este caso se utili-

zó un ancho de diez centímetros; se pegaron estas tiras en los lados correspondientes de la caja, teniendo cuidado que el contacto sea bueno entre el duropor y la madera. Se hizo lo mismo para los lados restantes.

El ancho de la caja es 1 cm más alta que el duropor, sobre este marco de duropor va colocado el vidrio; también debe tenerse mucho cuidado que el tamaño del vidrio sea un poco menor que el tamaño de la caja, ya que éste por causa de la dilatación va a ser sometido a mucha presión (hay que dejarle unos 3 mm de juego en cada lado de la caja).

Se procedió a armar el conjunto de tubos, como indica la figura:

FIGURA No. (8)



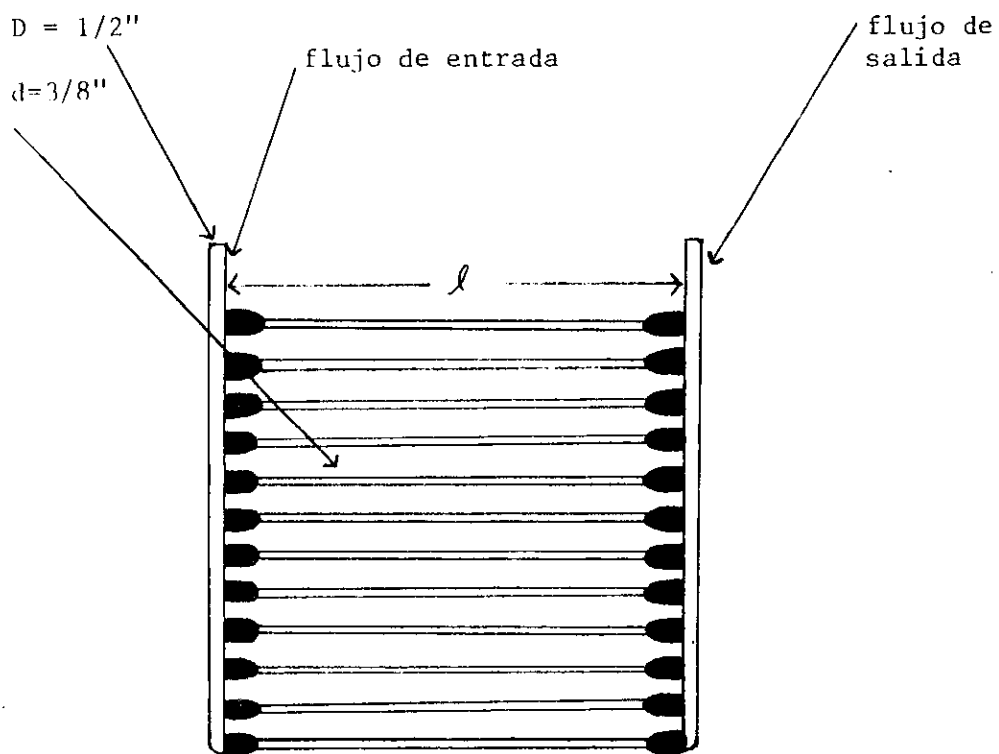
Este diseño es particularmente para el utilizado en el experimento. Al final se obtuvo un sistema como lo muestra el esquema de la figura siguiente:

FIGURA No. (9)

$$l = 0.10\text{m}$$

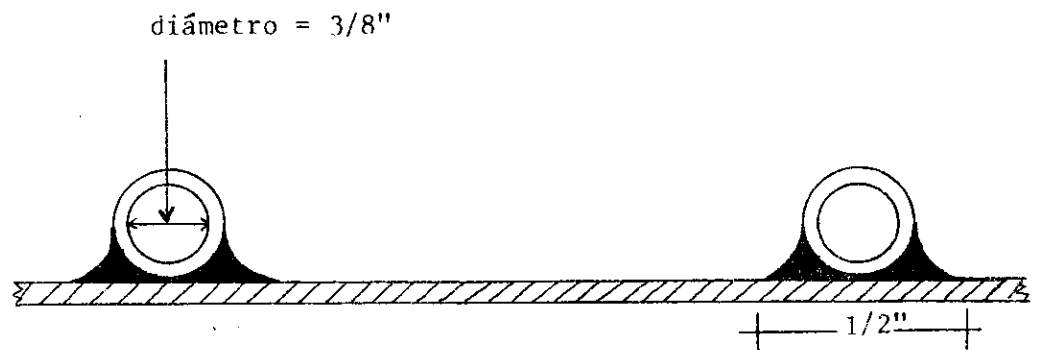
$$D = 1/2''$$

$$d = 3/8''$$



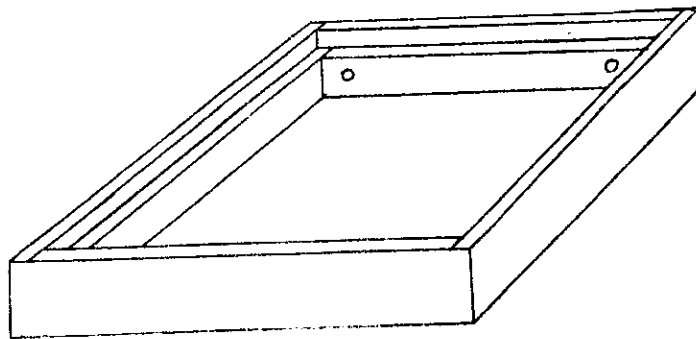
Se procedió a soldar los tubos con la lámina de hierro, teniendo mucho cuidado que el contacto fuera lo suficientemente bueno entre la soldadura, el tubo y la lámina.

FIGURA No. (10)



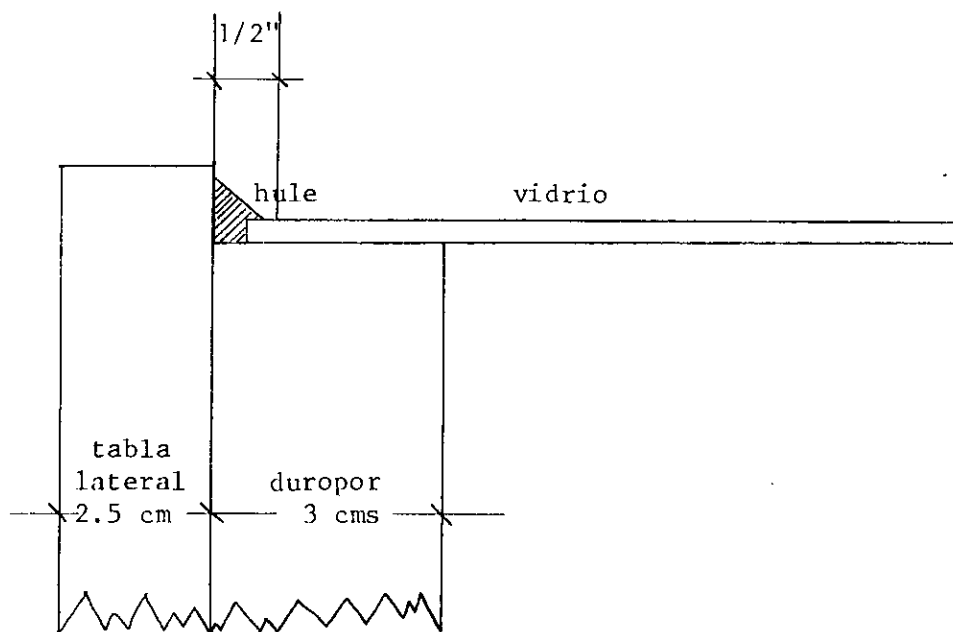
Se abrieron dos agujeros en la tabla correspondiente y se introdujeron en ellos los extremos de los tubos del conjunto de tubos que se habían construido

FIGURA No. (11)



Se procedió a colocar el vidrio y a cubrir la orilla con hule suave para el libre juego del vidrio por causa del calentamiento.

FIGURA No. (12)

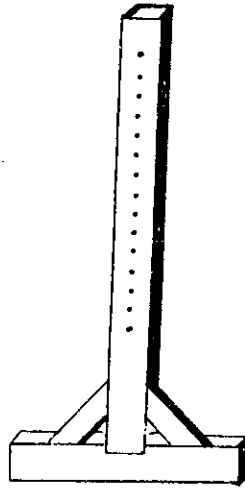


En un extremo se puso un adaptador para chorro con su respectivo chorro y en el otro una terminal para manguera.

Se construyó un calentador de agua solar sin depósito especial, por lo tanto sólo puede obtenerse agua caliente en las horas del día.

Se construyeron dos soportes para mantener el calentador inclinado en la dirección del sol, se abrieron unos 15 agujeros a una distancia de 5 cm entre ellos como indica la siguiente figura:

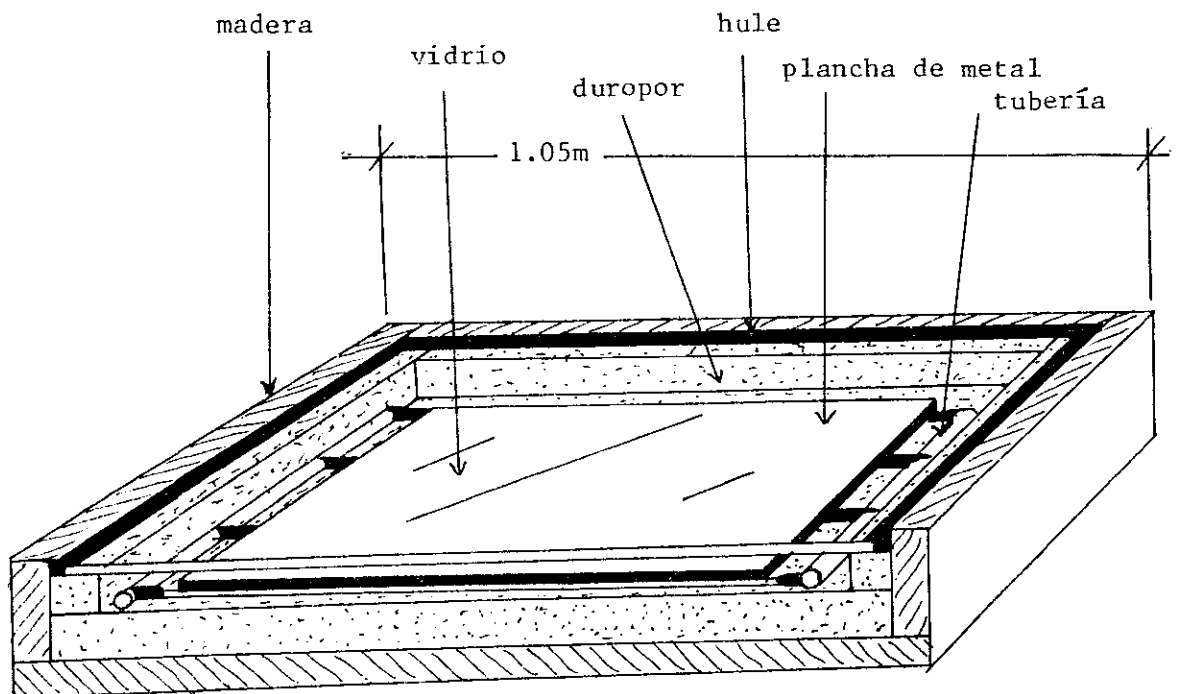
FIGURA No. (13)



Se colocó en la parte posterior del calentador un hierro del diámetro de los agujeros de los soportes y se aseguró que estuviera bien engrapado a la madera del fondo de la caja, (deben sobrar unos 15 cm de hierro de cada lado de la caja).

Se obtuvo así el sistema completo.

FIGURA No. (14)



La figura No. (14) muestra el diagrama de un colector solar plano para líquidos. Puede observarse una cubierta de vidrio que cubre la placa metálica y una caja de madera que contiene la placa absorbente y el arreglo de los tubos, también puede verse el aislante utilizado.

Las dimensiones del colector son:

0.15x1.3x1.4 metros, la distancia entre la cubierta y la placa es de 0.10 m y 0.03 m de grosor para el aislante.

El flujo volumétrico aconsejable es de  $1.58 \times 10^{-5}$  m/s m<sup>2</sup> de área superficial del colector. ref (3)

El modelo del calentador utilizado es el de la figura (14).

El calentador se construyó con una lámina de hierro a la cual se le soldó tubería de cobre y ésta a su vez se unió con tubería de plástico PVC y CPVC para la entrada y salida del agua respectivamente, la soldadura se hizo con estaño (60/40) y el conjunto se cubrió con carbón vegetal molido hasta un diámetro aproximado de 0.001 milímetro. Para su adhesión a la placa se hizo una mezcla de 10% de pintura de hule color negro mate y el 90% restante de carbón molido. Después sobre la placa se colocó un vidrio transparente de 3 milímetros de grosor y se selló con tiras de hule suave. Como aislante térmico en el fondo y a los lados del colector se utilizó una capa de duropor (poliestireno) de 3 cm de grosor. (ver figura No. 14)

Las variables que debieron medirse para la presente investiga

ción fueron: la temperatura de entrada y salida del líquido, la temperatura ambiente al sol y a la sombra, velocidad del viento, humedad relativa, dirección del viento, flujo, intensidad de la luz solar.

Para ello fue necesario utilizar el equipo siguiente:

Un anemómetro

termómetro

veleta

un medidor de flujo

un medidor de humedad relativa del aire

un medidor de intensidad de la luz solar incidente.

#### B. Metodología

Se instalaron los termómetros en la entrada y salida del agua del colector, uno más para medir la temperatura ambiente al sol y otro para medir la temperatura ambiente a la sombra. La lectura de todos los instrumentos se tomaba cada hora.

FIGURA No. (15)

Disposición de los termómetros a la entrada y a la salida del líquido en el colector.

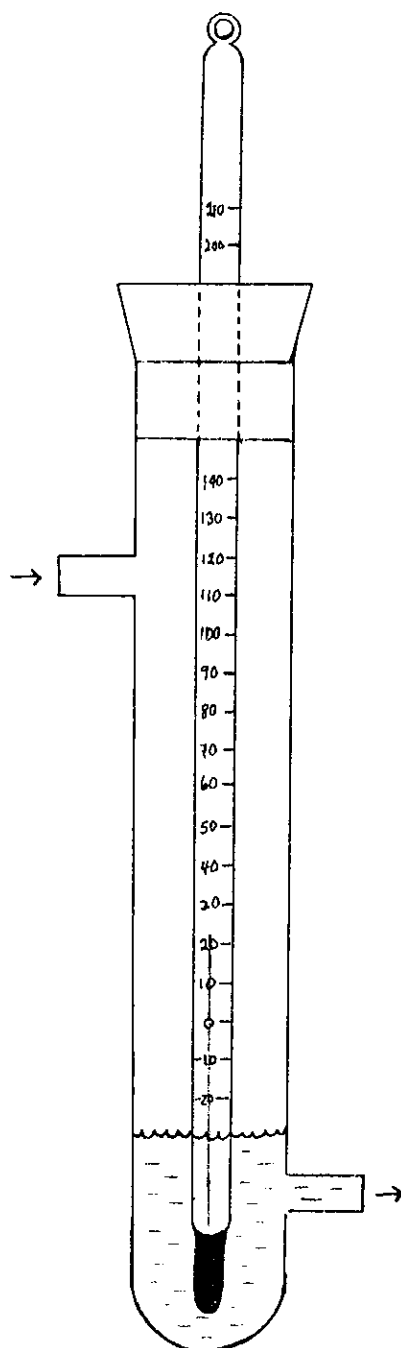
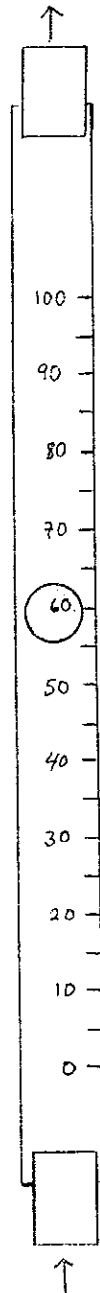


FIGURA No. (16)

Medidor de flujo, utilizado durante el experimento.

Marca: Gilmont



## C. Costos del colector:

Vidrio.....	Q 75.00
Madera.....	40.00
Lámina de hierro.....	150.00
Tubos de cobre.....	100.76
Estaño.....	70.00
Tubo PVC.....	6.00
Tubo CPVC.....	18.00
Tees.....	44.00
Codos.....	4.00
Accesorios adicionales.....	100.00
Chorros.....	14.00
Duopor.....	35.00
Mangueras.....	42.00
Pinturas.....	20.00
Carbón vegetal.....	2.00
Cola blanca.....	17.00
Pegamento para PVC.....	10.00
Pegamento para CPVC.....	10.00
Otros.....	<u>20.00</u>
Total.....	Q 777.76

Tiempo de construcción: un mes

Valor total estimado del colector.....Q1200.00

Comparación de costos de los sistemas solar y eléctrico:

Conforme el cuadro, resulta que después de 3.2 años el calentador solar principia a producir ahorro, es decir, que de allí en adelante es cuando comienzan a manifestarse las ventajas económicas de un calentador solar respecto de un calentador eléctrico.

Año	Calentador eléctrico				Calentador solar			Diferencia \$ C.A.
	Inv.	Mant.	Elect.	total Acumulado	Inv.	Mant.	total Acumulado	
1	448.00	32.00	218.80	698.80	1120.00	50.00	1170.00	-471.20
2	501.76	72.96	501.05	1075.77	1254.40	114.00	1368.40	-292.63
3	561.97	124.77	860.69	1547.43	1404.93	194.96	1599.89	- 52.46
3.2	574.85	136.63	943.32	1654.80	1437.14	213.49	1650.63	- 4.17
4	629.41	189.70	1314.41	2133.52	1573.52	296.40	1869.62	263.90
5	704.94	270.40	1882.15	2857.49	1762.34	422.50	2184.84	672.75
6	789.53	370.06	2587.71	3747.30	1973.82	578.22	2552.04	2295.26
7	884.27	492.43	3459.49	4836.19	2210.68	769.42	2980.10	1856.09
8	990.39	641.96	4531.30	6163.65	2475.96	1003.06	3479.02	2684.63
9	1109.23	823.91	5843.37	7776.51	2773.08	1287.35	4060.43	3716.08
10	1242.34	1044.47	7443.49	9730.30	3105.85	1631.98	4737.83	4992.47

Ref (9)

## V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los datos de las tablas 6 a la 28 fueron obtenidos cuando el vidrio no se había colocado sobre el calentador.

Significado de cada símbolo en las tablas siguientes:

- t : tiempo
  - H : radiación solar incidente sobre el colector,  $w/m^2$
  - T : temperatura absoluta (ambiente), K
  - f : flujo del líquido en el colector,  $m^3/s$
  - E : eficiencia de conversión del colector obtenida por medio de la ecuación (6), %
  - G : ganancia de energía útil del colector, ver apéndice C., J
  - F : factor de eficiencia del colector, ver apéndice C., adimensional
  - P : coeficiente de pérdida de calor del colector (adimensional), ver apéndice C.
- Adim : adimensional

TABLA No. 6

Fecha: Guatemala, 3/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	773	294.6	0.0228	1.8	15.529	0.018
9	499	293.5	0.0217	1.8	9.809	0.018
10	639	293.5	0.0208	1.8	12.648	0.018
11	889	293.5	0.0235	1.8	17.923	0.018
12	499	295.3	0.0267	1.9	10.368	0.018
13	406	295.8	0.0187	1.9	8.593	0.018
14	406	293.8	0.0232	1.9	8.480	0.018
15	328	293.5	0.0198	1.8	6.473	0.018
16	75	293.5	0.0180	1.9	1.604	0.018

P = 3.960

TABLA No. 7

Fecha: Guatemala, 4/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	889	292.6	0.0263	1.8	17.860	0.018
9	738	293.0	0.0288	1.8	14.816	0.018
10	810	293.8	0.0285	1.8	16.764	0.018
11	889	296.0	0.0279	1.8	17.900	0.018
12	810	297.5	0.0252	1.9	17.220	0.018
13	738	298.5	0.0252	1.9	15.912	0.018
14	609	295.0	0.0252	1.8	12.469	0.018
15	451	273.0	0.0245	1.1	5.681	0.019
16	31	293.0	0.0288	1.8	0.622	0.018

P = 4.040

TABLA No. 8

Fecha: Guatemala, 5/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1064	295.0	0.0235	1.8	21.336	0.018
9	609	293.0	0.0270	1.8	12.569	0.019
10	973	295.0	0.0252	1.8	19.598	0.018
11	889	296.0	0.0235	1.9	18.669	0.018
12	552	292.0	0.0205	1.8	11.074	0.018
13	406	294.0	0.0202	1.8	8.179	0.018
14	499	293.0	0.0217	1.8	10.242	0.018
15	328	293.0	0.0205	1.8	6.564	0.018
16	99	291.5	0.0208	1.6	1.793	0.019

P = 3.796

TABLA No. 9

Fecha: Guatemala, 6/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1064	291.0	0.00350	1.7	20.531	0.018
9	1064	296.2	0.00417	1.8	21.299	0.018
10	973	295.0	0.00367	1.7	18.971	0.018
11	973	296.4	0.00300	1.7	18.854	0.018

P = 3.898

TABLA No. 10

Fecha: Guatemala 8/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	973	300.0	0.00967	1.9	20.802	0.018
9	810	298.5	0.00700	1.9	17.091	0.018
10	973	303.0	0.00833	1.9	20.710	0.018
11	973	298.0	0.00567	1.9	19.563	0.018
12	973	304.5	0.00467	1.9	20.397	0.018
13	366	297.5	0.00667	1.9	7.649	0.018
14	263	296.8	0.000533	1.4	4.130	0.018
15	263	295.2	0.00533	1.9	5.620	0.018
16	980	292.8	0.00450	1.5	-0.016	0.019

P = 3.753

TABLA No. 11

Fecha: Guatemala, 9/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	609	293.0	0.0143	1.8	12.433	0.018
9	499	293.2	0.00967	1.8	10.148	0.018
10	738	294.0	0.00933	1.8	15.020	0.018
11	609	296.0	0.0746	1.9	13.023	0.018
12	609	299.0	0.00833	1.9	12.885	0.018
13	609	296.8	0.00725	1.9	12.711	0.018
14	328	295.4	0.00633	1.9	6.937	0.019
15	328	294.8	0.00467	1.8	6.751	0.019
16	22	293.4	0.0467	2.2	0.531	0.019

P = 3.759

TABLA No. 12

Fecha: Guatemala 10/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1064	302.0	0.0190	2.0	23.274	0.018
9	1502	302.0	0.0172	1.9	31.748	0.018
10	810	304.0	0.0172	2.0	18.145	0.018
11	810	304.0	0.0143	1.9	17.633	0.018
12	609	306.0	0.0143	2.0	13.926	0.018
13	609	300.0	0.0143	2.0	13.334	0.018
14	165	298.5	0.0139	2.1	3.914	0.018
15	499	298.2	0.0135	2.0	10.995	0.018
16	18	295.0	0.0122	3.7	0.736	0.019

P = 3.774

TABLA No. 13

Fecha: Guatemala 11/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	1064	297.0	0.00317	1.8	21.235	0.018
8	671	294.0	0.00250	1.7	12.897	0.018
9	973	303.0	0.00267	1.8	19.207	0.018
10	609	300.0	0.00300	1.7	11.502	0.018
11	810	301.0	0.00300	1.6	14.603	0.018
12	889	305.0	0.00233	1.6	16.342	0.018
13	738	299.2	0.00750	1.3	10.518	0.018
14	671	297.0	0.00175	1.7	12.454	0.018
15	609	297.0	0.00233	1.6	11.202	0.018
16	15	295.0	0.000750	5.7	0.095	0.018

P = 3.777

TABLA No. 14

Fecha: Guatemala, 12/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	738	295.5	0.0133	1.8	15.110	0.018
9	889	300.5	0.0100	1.9	18.626	0.018
10	973	299.6	0.0161	1.8	19.991	0.018
11	499	297.0	0.0154	1.8	10.097	0.018
12	889	299.5	0.0161	1.8	18.091	0.018
13	263	297.0	0.0133	1.9	5.628	0.018
14	451	294.5	0.0135	1.8	9.332	0.018
15	451	294.5	0.0135	1.8	9.277	0.018
16	113	293.0	0.0139	1.8	2.320	0.019

P = 3.756

TABLA No. 15

Fecha: Guatemala, 15/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	2064	298.0	0.0213	1.8	21.634	0.017
9	1162	299.8	0.0165	1.9	24.641	0.018
10	973	299.3	0.0133	1.8	19.753	0.018
11	973	297.8	0.0154	1.8	20.004	0.018
12	609	296.5	0.0107	1.8	12.247	0.018
13	889	295.0	0.0115	1.8	18.039	0.018
14	499	293.8	0.00633	1.8	9.799	0.018
15	451	293.6	0.00633	1.8	8.997	0.018
16	86	292.0	0.00633	1.8	9.725	0.018

P = 3.800

TABLA No. 16

Fecha: Guatemala, 16/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	671	290.5	0.0198	1.8	13.516	0.019
9	609	291.5	0.0292	1.8	12.366	0.019
10	973	293.0	0.00942	1.8	19.824	0.019
11	1064	296.0	0.00792	1.7	20.501	0.017
12	366	292.0	0.00942	1.8	7.329	0.018
13	609	293.5	0.00792	1.8	12.274	0.018
14	609	293.2	0.0177	1.8	12.505	0.018
15	31	292.0	0.0180	1.3	0.450	0.019
16	128	290.5	0.0292	1.6	2.320	0.018

P = 3.933

TABLA No. 17

Fecha: Guatemala, 17/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7:30	1162	295.8	0.0190	1.8	24.064	0.018
8:30	1162	296.8	0.0190	1.8	24.041	0.018
9:30	889	299.0	0.0133	1.9	18.509	0.018
10:30	973	299.8	0.0117	1.8	19.869	0.018
11:30	973	298.0	0.0198	1.8	19.650	0.018
12:30	738	298.0	0.0217	1.8	14.862	0.018
13	609	300.5	0.0161	1.9	13.190	0.018
14	209	295.5	0.0161	1.9	4.516	0.018
15	165	294.9	0.0160	1.9	3.453	0.018
16	57	293.8	0.0180	2.1	1.315	0.018
17	10	291.8	0.0107	1.5	0.167	0.019

P = 3.798

TABLA No. 18

Fecha: Guatemala, 19/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1064	294.0	0.0133	1.8	22.045	0.018
9	1064	300.0	0.0103	1.8	21.540	0.018
10	973	299.2	0.0190	1.9	20.493	0.018
11	810	298.2	0.0168	1.9	16.831	0.018
12	738	302.0	0.0168	1.9	16.066	0.018
13	889	301.2	0.0180	1.9	18.497	0.018
14	889	296.0	0.0154	1.9	18.397	0.019
15	366	294.6	0.0150	1.8	7.286	0.018
16	128	293.0	0.0143	1.8	2.599	0.018
17	49	292.5	0.0150	1.7	0.909	0.019

P = 3.805

TABLA No. 19

Fecha: Guatemala, 20/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	36	297.0	0.0317	4.2	1.674	0.019
8	1064	300.0	0.0295	1.9	23.170	0.018
9	973	298.0	0.0295	1.9	20.876	0.019
10	973	299.5	0.0270	1.9	20.710	0.018
11	810	296.0	0.0235	1.8	16.676	0.019
12	889	302.4	0.0235	1.9	19.273	0.018
13	889	297.0	0.000	---	-----	0.001
14	406	295.6	0.0279	1.9	8.628	0.018

P = 3.835

TABLA No. 20

Fecha: Guatemala, 22/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1064	296.0	0.00350	1.8	21.510	0.018
9	1064	302.0	0.00725	1.9	22.333	0.018
10	810	305.5	0.00317	1.8	16.695	0.018
11	889	298.5	0.00700	1.8	17.753	0.018
12	738	300.5	0.00833	1.8	14.953	0.018
13	810	301.2	0.00667	1.7	15.457	0.017
14	499	297.6	0.00567	1.7	9.474	0.017
15	366	296.2	0.00633	1.7	7.055	0.017
16	209	294.5	0.00725	1.7	3.937	0.017
17	57	293.0	0.00567	1.6	1.048	0.017

P = 4.599

TABLA No. 21

Fecha: Guatemala, 23/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	973	295.0	0.00350	1.7	18.642	0.018
9	889	297.5	0.00208	1.6	15.617	0.017
10	810	300.0	0.00417	1.8	15.988	0.018
11	889	297.0	0.00375	1.6	15.843	0.018
12	889	296.8	0.00725	1.6	15.794	0.017
13	609	297.0	0.00600	1.7	11.460	0.017
14	366	296.0	0.00467	1.8	7.227	0.018
15	406	294.4	0.00475	1.6	7.405	0.017
16	113	293.5	0.00350	1.7	2.139	0.017

P = 4.496

TABLA No. 22

Fecha: Guatemala, 6/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	1064	295.8	0.00833	1.9	22.339	0.019
8	1064	296.5	0.00933	1.9	22.102	0.018
9	973	305.8	0.00833	2.0	21.366	0.018
10	810	299.8	0.00933	1.9	16.788	0.018
11	671	303.8	0.00792	1.9	14.244	0.018
12	738	306.5	0.00833	1.9	16.052	0.018
12:30	810	301.0	0.00833	1.7	15.564	0.017
13:30	889	298.0	0.00833	1.7	17.175	0.018
14	499	296.0	0.00833	1.7	9.416	0.017
15	451	295.0	0.00942	1.7	8.413	0.017
16	75	293.0	0.00833	1.7	1.416	0.017

P = 4.450

TABLA No. 23

Fecha: Guatemala, 29/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	Flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	609	293.0	0.0154	1.8	12.614	0.019
9	973	302.5	0.0198	2.0	21.331	0.018
10	889	304.2	0.0161	2.0	19.667	0.018
11	810	299.8	0.0133	1.9	16.910	0.018
12	889	297.5	0.0172	1.9	18.572	0.018
12:30	810	299.8	0.0168	1.9	16.877	0.018
13:30	328	296.5	0.0150	1.9	6.992	0.019
14	128	296.3	0.0139	2.1	3.028	0.018
15	406	295.8	0.0139	1.7	7.877	0.017
16	42	294.0	0.0150	1.8	0.836	0.018

P = 4.049

TABLA No. 24

Fecha: Guatemala, 30/12/86 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	406	292.2	0.0245	1.9	13.438	0.019
8	889	302.0	0.0285	2.0	17.801	0.018
9	889	299.2	0.0290	1.9	18.063	0.018
10	889	300.0	0.0255	1.9	18.641	0.018
11	889	298.0	0.0252	1.8	19.853	0.018
12	889	297.0	0.0245	1.8	18.864	0.018
13	810	297.0	0.0230	1.8	19.878	0.017
14	451	296.2	0.0217	1.8	18.227	0.018
15	406	294.6	0.0223	1.7	15.103	0.017
16	165	293.0	0.0256	1.6	13.086	0.017

P = 4.450

TABLA No. 25

Fecha: Guatemala, 2/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	1162	294.3	0.00350	1.8	23.214	0.018
8	609	289.5	0.00267	1.7	11.511	0.018
9	738	290.0	0.00633	1.8	14.555	0.019
10	1162	296.8	0.00533	1.8	23.386	0.018
11	973	298.0	0.00467	1.8	19.138	0.018
12	889	300.5	0.00417	1.7	17.264	0.018
13	810	294.0	0.00417	1.6	14.661	0.018
14	209	293.5	0.00208	1.5	3.467	0.018
15	328	293.5	0.00233	1.6	5.778	0.018
16	99	291.0	0.00233	1.4	1.536	0.018

P = 3.792

TABLA No. 26

Fecha: Guatemala, 5/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1162	293.5	0.00567	1.8	23.421	0.018
9	1162	294.0	0.00375	1.7	22.765	0.018
10	810	297.0	0.00467	1.8	16.401	0.018
11	810	297.5	0.00417	1.7	15.585	0.018
12	973	297.0	0.00375	1.7	18.234	0.018
13	609	293.5	0.00417	1.7	11.346	0.018
14	186	292.8	0.00375	1.5	3.110	0.018
15	366	292.0	0.00267	1.6	6.493	0.018
16	57	290.5	0.00233	1.3	0.832	0.019

P = 3.731

TABLA No. 27

Fecha: Guatemala 6/1/87 latitud 14.5 grados norte

(horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1268	288.5	0.0133	1.8	25.977	0.019
9	1064	297.8	0.00967	1.9	22.640	0.018
10	810	296.5	0.0270	1.9	17.248	0.018
11	810	296.8	0.0103	1.8	16.423	0.018
12	449	299.5	0.0110	1.9	9.568	0.018
13	328	295.3	0.0103	1.8	6.693	0.018
14	186	294.0	0.0103	1.8	3.771	0.018
15	366	293.5	0.0100	1.8	7.555	0.019
16	75	292.0	0.0070	1.8	1.518	0.019

P = 3.745

TABLA No. 28

Fecha: Guatemala, 7/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	738	285.0	0.00942	1.8	14.614	0.019
8	1162	292.5	0.00792	1.8	23.949	0.019
9	889	301.0	0.00942	2.0	19.604	0.018
10	889	297.5	0.00792	1.9	18.575	0.018
11	810	300.0	0.00867	1.9	16.790	0.018
12	810	303.5	0.00867	1.9	17.099	0.018
13	810	298.0	0.00942	1.8	16.213	0.018
14	128	296.5	0.00792	1.9	0.276	0.018
15	366	295.0	0.00792	1.9	7.731	0.018
16	31	293.0	0.00667	2.3	0.800	0.018

P = 3.861

Resultados obtenidos con el vidrio ya instalado sobre el calentador, en las tablas 29 a 49.

TABLA No. 29

Fecha: Guatemala, 10/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	964	300.8	0.00567	2.1	22.949	0.018
9	509	296.0	0.00633	2.3	13.131	0.019
10	509	297.0	0.00633	2.2	12.820	0.018
11	399	299.0	0.00567	2.3	10.305	0.018
12	571	301.0	0.00600	2.2	13.911	0.018
13	351	298.0	0.00533	2.2	8.791	0.019
14	163	296.0	0.00667	3.2	5.865	0.019
15	46	295.0	0.00600	6.6	3.381	0.019
16	-1	293.5	0.00567	-200	2.256	0.019

P = 3.763

TABLA No. 30

Fecha: Guatemala, 12/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	28	294.0	0.0233	1.0	3.182	0.018
9	509	291.8	0.0279	2.2	12.764	0.019
10	638	294.0	0.0245	2.2	15.705	0.018
11	873	299.5	0.0232	2.2	21.044	0.018
12	964	300.0	0.0255	2.1	22.605	0.018
13	638	298.5	0.0248	2.2	15.731	0.018
14	452	296.5	0.0245	2.3	11.837	0.018
15	399	295.0	0.0245	2.4	10.605	0.018
16	163	292.5	0.0100	3.0	5.428	0.018

P = 3.807

TABLA No. 31

Fecha: Guatemala, 13/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
9	964	299.0	0.0150	2.1	22.679	0.018
10	873	300.0	0.0150	2.2	21.028	0.018
11	873	300.5	0.0128	2.1	20.794	0.018
12	710	301.8	0.0135	2.2	17.439	0.018
13	789	298.0	0.0147	2.0	17.330	0.017
14	28	296.0	0.0133	9.5	2.986	0.019
15	-1	295.5	0.0133	-200	2.475	0.018
16	-47	293.0	0.0128	-280	1.334	0.018

P = 3.908

TABLA No. 32

Fecha: Guatemala, 14/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	710	300.0	0.0135	2.2	17.882	0.018
9	710	303.0	0.0122	2.3	18.167	0.018
10	789	300.0	0.0128	2.2	19.280	0.018
11	710	301.0	0.0120	2.2	17.453	0.018
12	710	302.0	0.0120	2.1	17.071	0.018
13	789	300.0	0.0125	2.1	18.341	0.018
14	228	297.0	0.0115	2.8	7.154	0.018
15	228	296.0	0.0292	2.8	7.182	0.019
16	13	295.0	0.0298	2.1	2.067	0.019

P = 3.776

TABLA No. 33

Fecha: Guatemala, 15/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8:30	789	303.0	0.0292	2.3	20.161	0.019
9:30	789	304.0	0.0122	2.3	20.129	0.018
10	638	306.0	0.0115	2.4	17.001	0.018
11	638	302.0	0.0115	2.2	15.584	0.019
12	710	301.0	0.0122	2.1	16.717	0.018
13	571	298.5	0.0115	2.2	14.188	0.019
14	509	301.0	0.0103	2.3	12.950	0.019
15	452	297.0	0.0000167	8.9	0.453	0.016
16	-14	294.5	0.0150	-110	1.755	0.018

P = 4.331

TABLA No. 34

Fecha: Guatemala, 16/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	789	298.0	0.00942	2.1	18.828	0.018
9	964	305.0	0.00725	2.1	23.197	0.018
10	710	305.0	0.00725	2.2	17.544	0.018
11	710	300.8	0.00633	2.0	15.615	0.017
12	710	306.0	0.00533	2.1	16.977	0.018
13	710	299.0	0.00600	1.8	14.517	0.017
14	266	297.5	0.00667	2.4	7.247	0.018
15	509	296.0	0.00700	2.0	11.642	0.017
16	13	294.6	0.00567	1.6	2.336	0.018

P = 3.923

TABLA No. 35

Fecha: Guatemala 19/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	710	301.0	0.00633	2.2	17.543	0.018
9	710	300.0	0.00375	2.1	16.441	0.018
10	710	300.0	0.00417	2.0	16.061	0.018
11	710	301.0	0.00375	2.0	15.778	0.018
12	710	301.0	0.00417	2.0	15.790	0.018
13	710	300.0	0.00375	1.9	15.215	0.018
14	266	298.0	0.00350	2.4	7.273	0.018
15	509	298.0	0.00350	2.1	11.869	0.018
16	266	295.5	0.00417	2.4	7.275	0.018

P = 3.835

TABLA No. 36

Fecha: Guatemala, 20/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	638	292.0	0.00350	2.0	14.575	0.018
9	873	302.0	0.00375	2.1	20.105	0.018
10	710	301.0	0.00350	2.1	16.356	0.018
11	710	302.5	0.00317	2.0	15.783	0.018
12	710	302.5	0.00317	1.9	15.431	0.018
13	399	299.0	0.00317	2.0	8.987	0.018
14	266	297.0	0.00300	2.4	7.036	0.018
15	109	295.0	0.00317	3.3	4.041	0.018
16	900	298.0	0.0175	3.0	20.103	0.017

P = 4.434

TABLA No. 37

Fecha: Guatemala, 21/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	833	291.0	0.0237	2.1	19.201	0.019
8	873	295.8	0.0237	2.0	19.906	0.018
9	789	297.5	0.0213	2.0	17.970	0.018
10	710	299.0	0.0217	2.0	16.274	0.017
11	789	302.8	0.0233	2.2	19.735	0.019
12	873	297.0	0.0232	2.0	19.890	0.018
13	789	299.0	0.0223	2.0	17.958	0.017
14	789	298.0	0.0217	1.9	16.940	0.017
15	710	294.5	0.0208	2.0	15.856	0.017
16	228	293.0	0.0217	1.5	6.319	0.017

P = 4.413

TABLA No. 38

Fecha: Guatemala, 22/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	873	300.0	2.2	21.092	21.092	0.018
9	964	298.5	2.1	22.717	22.717	0.018
10	509	295.5	2.2	12.797	12.797	0.018
11	638	297.0	2.1	15.319	15.319	0.018
12	873	0.0172	2.1	20.493	20.493	0.018
13	789	0.0198	2.1	18.344	18.344	0.018
14	266	0.0205	2.5	7.525	7.525	0.018
15	266	0.0184	2.4	7.123	7.123	0.018
16	33	0.0183	1.4	2.049	2.049	0.018

P = 3.985

TABLA No. 39

Fecha: Guatemala, 26/1/87 latitud 14.5 grados norte

Tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	789	292.0	0.0133	2.0	17.698	0.018
9	964	296.0	0.0133	2.0	21.442	0.018
10	789	297.0	0.0133	2.1	18.445	0.018
11	873	299.0	0.0133	2.0	19.466	0.017
12	789	300.5	0.0103	2.0	18.575	0.018
13	789	296.5	0.0125	2.0	17.703	0.018
14	509	295.5	0.0120	2.2	12.825	0.018
15	399	293.0	0.00725	2.2	9.688	0.018
16	266	291.8	0.00725	2.5	7.334	0.018

P = 3.801

TABLA No. 40

Fecha: Guatemala, 27/1/87 latitud 14.5 grados norte

Tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	789	292.5	0.0288	2.1	18.579	0.018
9	789	293.0	0.0245	2.0	18.003	0.018
10	509	291.0	0.0252	2.0	11.401	0.017
11	638	302.5	0.0256	2.3	16.338	0.018
12	638	296.0	0.0248	2.0	14.579	0.017
13	789	296.0	0.0248	2.0	18.047	0.018
14	266	292.2	0.0228	2.4	7.293	0.018
15	109	290.0	0.0270	3.1	3.787	0.018
16	86	289.0	0.0270	3.6	3.468	0.019

P = 3.776

TABLA No. 41

Fecha: Guatemala 28/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
9	964	294.0	0.00567	2.0	21.694	0.018
10	964	295.5	0.00467	1.9	21.043	0.018
11	1062	301.2	0.00467	1.8	21.675	0.017
12	873	308.0	0.00475	1.9	18.963	0.017
13	873	310.0	0.00475	2.0	19.203	0.017
14	351	297.0	0.00600	2.2	8.681	0.017
15	109	293.0	0.00467	3.3	3.993	0.018
16	750	289.0	0.00467	1.3	10.864	0.017

P = 4.334

TABLA No. 42

Fecha: Guatemala, 29/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	1062	294.5	0.00567	1.9	22.844	0.018
9	1168	299.5	0.00567	1.9	24.814	0.017
10	1062	303.0	0.00267	1.9	22.821	0.018
11	964	303.0	0.00367	1.8	19.471	0.017
12	789	309.3	0.0135	2.2	19.082	0.018
13	710	309.0	0.0135	2.3	18.170	0.018
14	109	296.2	0.0139	3.6	4.399	0.017
15	509	295.0	0.0143	2.2	12.777	0.018
16	0.000	269.0	0.0133	3.3	-0.369	0.019

P = 3.722

TABLA No. 43

Fecha: Guatemala, 30/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
9	873	302.0	0.0223	2.2	21.641	0.018
10	873	305.0	0.0168	2.2	21.525	0.018
11	638	310.5	0.0133	2.5	17.870	0.018
12	638	311.0	0.0120	2.4	16.955	0.018
13	509	299.5	0.0133	2.4	13.608	0.018
14	-1	295.0	0.00867	-210	2.342	0.018

P = 3.926

TABLA No. 44

Fecha: Guatemala, 3/2/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8:15	789	298.0	0.00700	2.1	18.342	0.018
9:15	789	309.0	0.00667	2.2	19.289	0.017
10	789	316.0	0.00667	2.4	21.328	0.018
11	638	304.0	0.00667	2.3	16.091	0.018

P = 3.917

TABLA No. 45

Fecha: Guatemala, 4/2/87      latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
8	789	302.0	0.00767	2.2	19.391	0.018
9	789	307.0	0.00567	2.2	19.845	0.018
10	789	310.0	0.00600	2.2	19.645	0.018
11	73	321.0	0.00667	2.2	21.497	0.018
12	710	315.5	0.00725	2.4	18.905	0.018
13	710	312.0	0.00700	2.2	17.444	0.018
14	266	301.0	0.00567	2.5	7.536	0.017
15	351	300.2	0.00600	2.3	8.995	0.017
16	109	296.0	0.00633	3.4	4.101	0.017

P = 4.436

TABLA No. 46

Fecha: Guatemala, 5/2/87      latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	789	299.0	0.0237	2.2	19.428	0.019
8	789	313.5	0.0228	2.5	21.897	0.018
9	710	314.5	0.0237	2.5	20.277	0.018
10	638	318.5	0.0228	2.6	18.842	0.018
11	710	321.0	0.0205	2.6	20.589	0.018
12	---	317.0	0.0000202	9.1	21.211	0.017
13	399	298.8	0.0213	2.5	11.315	0.018
14	399	297.0	0.0213	2.3	10.373	0.018
15	163	297.5	0.0217	3.2	5.868	0.019
16	65	296.0	0.0217	5.4	3.896	0.019

P = 3.935

TABLA No. 47

Fecha: Guatemala, 6/2/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	873	196.0	0.00942	2.1	20.492	0.019
8	873	307.0	0.00567	2.3	20.471	0.018
9	789	312.0	0.00567	2.3	20.471	0.018

P = 3.891

TABLA No. 48

Fecha: Guatemala, 7/2/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	351	194.0	0.00725	2.4	9.249	0.018
8	452	297.0	0.00767	2.2	11.136	0.017

P = 4.444

TABLA No. 49

Fecha: Guatemala, 16/2/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (horas)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)
7	399	293.5	0.0133	2.3	10.156	0.018
8	789	305.0	0.0292	2.3	20.132	0.018
9	789	316.0	0.00933	2.3	20.621	0.018
10	789	318.0	0.00667	2.4	21.048	0.017
11	789	318.0	0.00667	2.4	20.884	0.018
12	789	307.0	0.00667	2.1	18.528	0.017
13	789	305.0	0.00667	2.0	17.253	0.017
14	266	298.0	0.00667	2.3	6.869	0.017
15	266	298.0	0.00667	2.3	6.869	0.017
16	109	295.0	0.00792	3.2	3.891	0.018

P = 4.577

En las tablas siguientes se presenta la eficiencia obtenida por día cuando el calentador no tenía el vidrio.

A - Adimensional

TABLA No. 50

Fecha: Guatemala, 3/12/86 al 7/1/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (día)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)	P (A)
3/12/86	457	294.1	0.0215	1.8	9.258	0.018	4.102
4/12/86	663	294.8	0.0267	1.8	13.65	0.018	3.992
5/12/86	602	293.7	0.0225	1.8	12.239	0.018	3.999
6/12/86	1019	294.6	0.00358	1.7	19.933	0.018	3.856
8/12/86	622	298.4	0.00635	1.9	13.076	0.018	3.879
9/12/86	483	295.0	0.00805	1.9	10.012	0.018	3.819
10/12/86	676	301.0	0.0151	2.0	14.838	0.018	3.900
11/12/86	705	298.9	0.00223	1.7	13.078	0.018	3.881
12/12/86	585	296.8	0.0139	1.8	12.101	0.018	3.976
15/12/86	745	296.2	0.0120	1.8	15.211	0.018	4.043
16/12/86	562	292.4	0.0167	1.9	11.725	0.018	3.889
17/12/86	632	296.5	0.0163	1.9	13.100	0.018	4.009
19/12/86	697	297.0	0.0154	1.9	14.463	0.018	3.958
20/12/86	796	298.3	0.0275	1.9	17.072	0.018	3.841
22/12/86	651	298.5	0.00608	1.8	12.766	0.018	4.272
23/12/86	660	296.3	0.00440	1.7	12.234	0.017	4.326
26/12/86	731	299.2	0.00858	1.8	14.704	0.018	4.250
29/12/86	588	297.9	0.0151	1.9	12.379	0.018	3.962
30/12/86	668	296.9	0.0243	1.8	13.626	0.018	4.212
2/1/87	698	294.1	0.00377	1.7	13.431	0.018	3.825
5/1/87	682	294.2	0.00388	1.7	13.090	0.018	3.904
6/1/87	601	294.8	0.0121	1.9	12.508	0.018	3.812
7/1/87	663	296.2	0.00810	1.9	13.793	0.018	3.817

TABLA No. 51

Resultados obtenidos por día cuando el calentador solar tenía colocado el vidrio.

A - Adimensional

Fecha: Guatemala, 10/1/87 al 16/2/87 latitud 14.5 grados norte

tiempo (día)	H (w/m <sup>2</sup> )	T (K)	flujo (m <sup>3</sup> /s)	E (%)	G (J)	F (Adim)	P (A)
10/1/87	390	297.5	0.00597	2.3	10.216	0.018	4.002
12/1/87	518	295.9	0.0231	2.2	12.839	0.018	4.165
13/1/87	524	298.1	0.0138	2.2	12.804	0.018	4.317
14/1/87	543	299.5	0.0151	2.3	13.722	0.018	4.083
15/1/87	565	300.9	0.0126	2.2	13.692	0.017	4.372
16/1/87	598	300.3	0.00677	2.0	13.388	0.017	4.726
19/1/87	589	299.5	0.00412	2.0	13.275	0.018	4.258
20/1/87	552	299.0	0.00330	2.0	12.525	0.018	4.066
21/1/87	742	296.9	0.0223	1.9	15.985	0.017	4.903
22/1/87	577	296.5	0.0190	2.1	13.587	0.017	4.347
26/1/87	685	295.8	0.0114	2.0	15.132	0.017	4.619
27/1/87	513	293.6	0.0256	2.0	11.745	0.017	4.627
28/1/87	649	298.6	0.00498	1.9	13.778	0.016	5.073
29/1/87	797	299.4	0.00958	1.9	17.302	0.017	4.761
30/1/87	588	303.9	0.0144	2.3	15.193	0.018	4.318
3/2/87	751	306.9	0.00675	2.1	17.843	0.017	4.704
4/2/87	598	306.3	0.00647	2.2	14.400	0.017	4.706
5/2/87	460	307.4	0.0219	2.6	13.483	0.018	4.083
16/2/87	577	304.8	0.0102	2.1	13.762	0.016	5.011



## V. DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se puede discutir en primer lugar la eficiencia del calentador solar comparando los valores obtenidos con él y los obtenidos en la bibliografía. Se estudió un calentador solar plano y lo particular es que se trabajó una parte del tiempo sin una cubierta y después se le colocó una cubierta de vidrio; luego se encontró la eficiencia del calentador con los datos obtenidos experimentalmente. Para el calentador sin la cubierta la eficiencia promedio obtenida fue de dos por ciento mientras que con la cubierta de vidrio la eficiencia subió a un promedio de tres por ciento, por ello se puede decir que la eficiencia del calentador aumentó en un cincuenta por ciento, esto significa que el viento afecta mucho la eficiencia de los calentadores porque en este estado no se da el efecto de invernadero mencionado en la teoría sobre los calentadores de este tipo.

El efecto del flujo de agua sobre la eficiencia se ve en la ecuación utilizada para obtenerla y en las tablas No. (6) a la No. (51) donde se presentan los flujos utilizados por cada hora de funcionamiento. Se puede observar que con un flujo muy pequeño la eficiencia aumenta en un alto porcentaje llegándose a tener hasta el nueve por ciento, o sea un aumento relativo de doscientos por ciento. En estudios teóricos se ha encontrado que la mayor eficiencia que se puede obtener en un colector solar de cualquier tipo colocado fuera de la atmósfera terrestre es de setenta por ciento, ref(22), la cual disminuye al colocar el colector solar dentro de la atmósfera terrestre porque la luz sufre disper-

ción y la intensidad de la misma baja en gran cantidad. Si se perdieran unos dos tercios de la energía que llega a la atmósfera, sólo tendríamos una eficiencia máxima de 23 por ciento, luego por la propia construcción del colector se perdería algo de esa energía lo que justifica la eficiencia del colector estudiado en esta oportunidad y el 9% obtenido puede considerarse adecuado.

El área del colector expuesta al sol es de mucha importancia por el efecto de invernadero que se da dentro del colector y ya sabemos que la cantidad de aire que puede calentarse dentro de él afecta positivamente la eficiencia. Al mismo tiempo si se tiene un área grande, es posible que el flujo de agua sea mayor porque el largo de los tubos se incrementa y el tiempo de paso del agua por la tubería es lo suficientemente grande para que el calor sea absorbido por el agua; sólo tendría que tenerse cuidado con el largo de los tubos porque después de cierta distancia recorrida por el flujo ya no va a poder capturar más calor y los costos aumentarían, pero la eficiencia del calentador sería igual.

Si el flujo aumenta, la eficiencia aumenta y así podríamos tener una eficiencia de hasta 23%. Ref(24)

Todo lo anterior nos obliga a diseñar eficientemente el tamaño del colector ya que no todos disponemos de grandes áreas para su colocación

Además es necesario calcular en la cantidad de agua caliente que se necesita diariamente y de allí obtener el tamaño del colector solar a construir.

Tenemos dos tipos de eficiencia: a) la que depende de la construc

ción del colector y b) la que depende de las temperaturas de entrada y salida del agua y del flujo de la misma. Hasta ahora sólo se ha hablado de la segunda. De la primera podemos decir que es constante, sólo depende de la calidad de construcción, y aquí podemos mencionar la calidad de soldadura y el absorbente sobre la placa conductora para que la conducción de calor a través de dos cuerpos se maximice; para ello es necesario que estén en contacto directo y esto se logra haciendo una unión entre ellos por altas presiones o soldándolas con un tercer material, que es lo que más se utiliza pero también en esta parte de la construcción del colector es donde se pierde eficiencia. Por otro lado si el absorbente sobre la placa conductora es de superficie especular se pierde radiación y por lo tanto se pierde eficiencia. Para evitarlo es conveniente que la superficie sea un poco rugosa de tal manera que la absorción sea mayor. Otro factor importante es la fuga de aire caliente del colector y esto depende de la manera de sellar la caja que contiene todos los elementos en su interior. En este caso se utilizó una caja de madera y fue sellada con un pegamento resistente al calor y a la intemperie a que estaba expuesto el calentador, se usó cola blanca, sin embargo la fuga del aire caliente es difícil de controlar en su totalidad ya que es un gas, y la presión aumenta con la temperatura en el interior del calentador, de suerte que la eficiencia por invernadero baja.

Por último hay que mencionar el material utilizado para aislar la placa conductora y la tubería. Para este aislamiento se utilizó poliestireno de tres centímetros de grosor y no se puede decir mucho al res-

pecto porque se debió haber probado con otros grosores del mismo material y así poder concluir algo sobre la eficiencia del aislante para no dejar salir calor del interior al exterior del colector solar.

La temperatura alcanzada en el calentador está relacionada directamente con el flujo de agua que circula por él y la mayor temperatura alcanzada fue de 68 grados centígrados con un flujo de  $1.2 \times 10^{-5}$  m/seg.

La eficiencia del colector puede determinarse mediante la fórmula:

$$\eta = Fr \gamma \alpha - Fr U_L (T_i - T_a) / H_t = Q_u / H_t A_c \quad (36)$$

Ref. (3)

que se obtiene en forma experimental.

Las temperaturas más altas se obtienen entre las 12:00 y las 14:00 horas del día ya sea con luz directa o difusa.

La eficiencia obtenida fue de 2.5% en promedio y la más alta de 9%.

La ganancia útil del colector fue de:

$$U_L \text{ promedio} = 14\%$$

La eficiencia propia del colector, debida a su construcción, fue de: 1.8%

La pérdida de calor en el fondo del colector fue de: 5.233 Joules/hora, que se debe al material con que se construyó el fondo del colector solar.

## RECOMENDACIONES :

puesto que se puede usar plástico transparente en lugar del vidrio sin que haya mucha diferencia en la eficiencia del colector, es aconsejable que se obtengan los precios de ambos y entonces decidir. Deben evaluar se las condiciones de comportamiento de los vecinos para decidir entre colocar vidrio o plástico.

Debe tenerse cuidado que siempre que haya sol, que no le haga falta fluido al colector ya que de no ser así la temperatura en el interior es lo suficientemente alta para derretir el tubo PVC y el CPVC; si la temperatura no es muy alta por lo menos deforma los tubos y esto hace que en las juntas haya fugas de líquido, lo cual es muy difícil de controlar. Hay que recordar que el flujo de fluido es el refrigerante del colector.

Para soldar los tubos de cobre con la lámina debe utilizarse un sol dador grande (500g) para facilitar el trabajo y tener mucha práctica para soldar los tubos con la lámina.

No utilice cola para las juntas de las tablas ni para pegar el duropor a ellas, porque no es resistente al calor y se derrite muy fácilmente. Debe utilizarse cola blanca.

El duropor sufre el calentamiento de la placa y el peso de la misma, los tubos, etc; el peso y la alta temperatura hacen que el duropor disminuya su grosor, es decir, la plancha se incrusta en él. Por lo tanto hay que colocar unos soportes para la estructura de metal.

La parte externa de la caja está expuesta a las inclemencias del

tiempo, por lo tanto debe dársele servicio por fuera al menos una vez al año.

Requieren un servicio completo a los cinco años de estar funcionando, el cual consiste en una limpieza total del colector, renovación de la pintura externa de la caja de madera y en especial limpieza de la tubería.

El colector debe ser reorientado cada tres meses.

Debe ponerse especial cuidado en la elección de la pintura que se echa sobre la placa de metal, porque sufre deterioro rápidamente. Es aconsejable utilizar pintura aerosol color negro mate, la cual es muy eficiente.

## GLOSARIO

Glosario de términos utilizados en el desarrollo de esta tesis.

**Absorción.** penetración de una sustancia dentro de otro cuerpo. Transformación en otras formas sufridas por el paso de energía radiante a través de una sustancia material.

**Absorbttividad:** se mide por la fracción de la energía radiante que cae sobre el cuerpo el cual es absorbido o transformado en calor entre la energía total recibida por el mismo.

**Ambiente:** atmósfera que nos rodea. Entonces, temperatura ambiente significa la temperatura de la atmósfera en un lugar en particular.

**Azimuth:** ángulo de desviación horizontal, medido en dirección del movimiento de las agujas del reloj desde una dirección standard, de norte a sur.

**Coefficiente de absorción:**  $(I_o - (I_r - I_t))/I_o$

**Conducción:** transferencia de calor por contacto con un cuerpo caliente.

**Conductividad Térmica:** razón de tiempo, de transferencia de calor por conducción, a través de un grosor unitario cruzando una unidad de área por una diferencia de temperatura unitaria.

**Convección:** transferencia de energía calórica por medio de la circulación de un líquido o un gas.

**Cuerpo Negro:** Si, para todos los valores de longitud de onda de la energía radiante incidente, toda la energía es absorbida, el cuerpo se llama un cuerpo negro.

**Emisividad:** potencia relativa de una superficie para emitir calor por radiación o la razón de la energía radiante emitida por una superficie a la emitida por un cuerpo negro - considerado para tener casi una absorción perfecta del calor recibido y por lo tanto muy baja emisividad - cuando la superficie dada y el cuerpo negro están a la misma temperatura.

La cantidad de energía que irradia es en forma de radiaciones de onda larga.

**Grados Kelvin:** escala termométrica, en la cual la unidad de medida es igual a un grado centígrado pero el punto inicial es diferente. Esto es, la escala Kelvin está construida de tal manera que el cero absoluto corresponde a  $-273.16$  C. Entonces  $0$  C corresponde a  $273.16$  K.

**Hertz (Hz):** unidad de frecuencia utilizada en medidas eléctricas o electrónicas, es igual a un ciclo, o una longitud de onda de energía eléctrica por segundo.

**Hystéresis:** tiempo de retraso mostrado por un cuerpo al reaccionar a cambios en respuesta a fuerzas que lo afectan.

**Incidente:** se refiere a radiación solar, a los rayos de luz que caen sobre o se estrellan en una superficie.

**Ley de Kirchhoff de radiación:** la relación entre la potencias de emisión y la potencia de absorción para rayos de la misma longitud de onda es constante para todos los cuerpos a la misma temperatura.

Intensidad: energía o número de fotones o partículas de cualquier radiación incidente sobre una unidad de área o fluyendo a través de un material sólido por unidad de tiempo.

Irradiancia (irradiación): radiación incidente sobre un área determinada.

$$1 \text{ Langley} = 41840 \text{ J/m}^2\text{s}$$

Pérdida por reflexión: energía que llega a una superficie y no es absorbida sino que se refleja de ella.

Pintura negra selectiva: absorbe más de la longitud de onda larga, infrarroja, de la luz solar que la pintura negra no selectiva, por lo tanto, éste es un material improvisado para cubrir la placa absorbente en colectores solares.

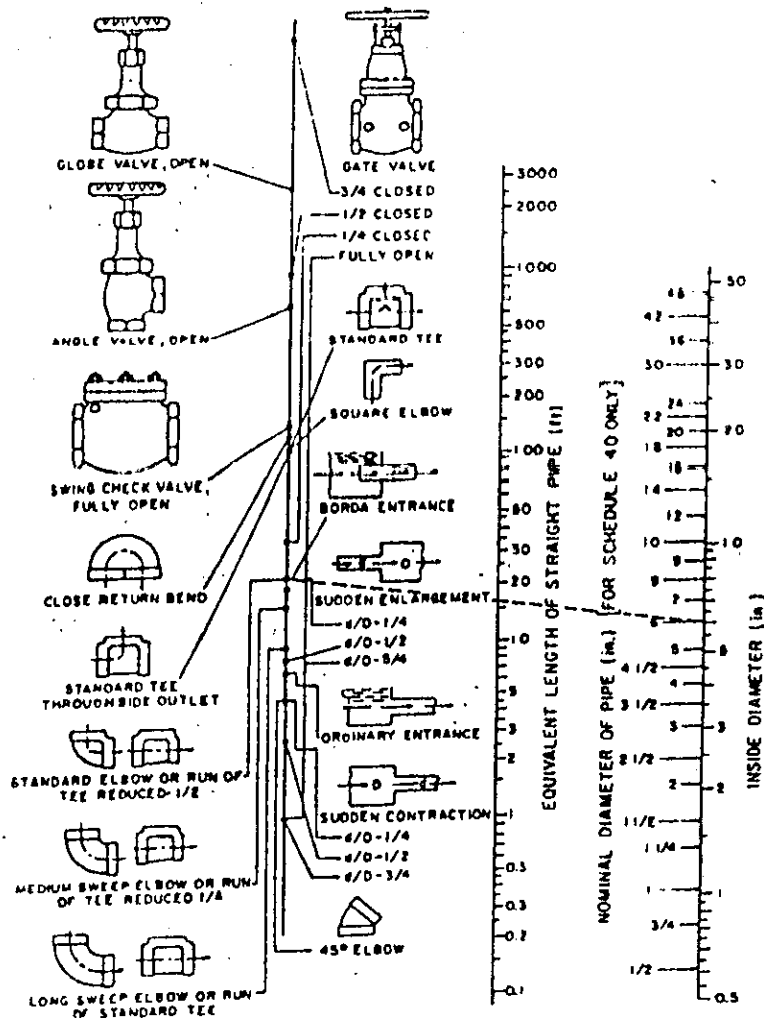
Radiación: emisión y propagación de energía a través del espacio o a través de un medio material en forma de onda.

Transmitancia: es el cociente de la radiación que atraviesa el material, entre la radiación total que recibe el material. En este caso el material que interesa es el de la cubierta del colector. El valor de la transmitancia oscila entre 0 y 1.

APENDICE A

A. Pérdida de presión al pasar un líquido en un material de formas diferentes. Ref. (15)

Para ampliaciones y contracciones súbitas. La longitud equivalente se da en pies de tubo de diámetro  $d$ , la línea entrecortada muestra la longitud equivalente de un codo standard de 6 pulgadas.



APENDICE B

B. Programa de computadora para encontrar la eficiencia de un calentador solar. Este programa fue construido por el autor de la presente tesis.

C

C COEFICIENTE DE PERDIDA DE CALOR EN LA PARTE SUPERIOR DEL CALENTADOR

C DIMENSION TIAMB(100),TPROM(100),TENT(100),TSAL(100), HUM(100)

DIMENSION S(100), FLUJ(100),HRPC(100),HRCC(100),HPC(100),HW(100)

DIMENSION UT(100),F(100),AAM(100),UTL(100),F1(100),T2AMB(100)

DIMENSION G(100),FR(100),QU(100),ANH(100),HR(100),VA(100),RED(100)

DIMENSION HFI(100),V(100)

c

WRITE(\*,10)

READ(\*,20) N

c

DO 30 I = 1, N

WRITE(\*,20) I

WRITE(\*,70)

READ(\*,45)HUM(I),TENT(I),TSAL(I),TIAMB(I)

WRITE(\*,45)HUM(I),TENT(I),TSAL(I),TIAMB(I)

WRITE(\*,75)

READ(\*,8)V(I),S(I),FLUJ(I)

WRITE(\*,8)V(I),S(I),FLUJ(I)

30 CONTINUE

```
WRITE(*,50)
READ(*,41)X
WRITE(*,60)
READ(*,41)GA1S
WRITE(*,80)
READ(*,80
READ(*,41)CKAIS
WRITE(*90)
READ(*,41)ANG
WRITE(*,100)
READ(*,41)EP
WRITE(*,110)
READ(*,41)EV
WRITE(*,120)
READ(*,41)CKVID
WRITE(*,160)
READ(*,41)W
(WRITE(*,180)
READ(*,41)DELT
WRITE(*,190)
READ(*,41)CKPLAC
WRITE(*,200)
READ(*,41)D
READ(*,41)CKB
```

```
WRITE(*,220)
READ(*,41)B
WRITE(*,230)
READ(*,41)GB
WRITE(*,300)
READ(*41)CP
WRITE(*,310)
READ(*,41)AC
SIGM=5.669E-8
TC=308
Z=(1/EP)+(1/EV)-1
DO 650 I=1,N
HR(I)=S(I)-100
TPROM(I)=(TENT(I)+TSAL(I))/2+5
T2AMB(I)=TPROM(I)-T1AMB(I)
WRITE(*,*)HR(I),TPROM(I),T2AMB(I)
650 CONTINUE
DO 130 I+1,N
T1=TC
150 T2=T1
HRPC(I)=SIGM*(TPROM(I)**2+T1**2)*(TPROM(I)+T1)/Z
HRCC(I)=EV*SIGM*(T1**2+T1AMB(I)**2*(T1+T1AMB(I)))
HPC(I)=(1-0.0018*(TPROM(I)-10))*1.14*T1**0.31/X**0.07
HW(I)=5.7+3.8*V(I)
```

```

UT(I)=1/(1/(HPC(I)+HRPC(I))+1/(HW(I)+HRCC(I)))
T1=TPROM(I)-UT(I)*T2AMB(I)/(HPC(I)+HRPC(I))
WRITE(*,*)HRPC(I),HRCC(I),HPC(I),HW(I),UT(I),T1
EPS=ABS(T2-T1)
WRITE(*,*)EPS
IF(EPS.LT.0.01) GO TO 140
GO TO 150
140 WRITE(*,320)
WRITE(*,40)T1,UT(I)
130 CONTINUE
WRITE(*,330)
UB=CKAIS/GAIS
WRITE(*,40)UB
CB=CKB*B/GB
C
C  AQUÍ SE CALCULA EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL FLUIDO Y LA PARED DEL TUBO
C
C
DO 135 I=1,N
VA(I)=FLUJ(I)/(3.14*(D/2)**2)
RED(I)=1000*VA(I)*D/4E-4
HFI(I)=(0.35+0.56*RED(I)**0.52)*2.54**0.3
135 CONTINUE
C
C  EFICIENCIA STANDARD DE LA PLACA PARA TUBOS RECTOS

```

```

C    F1 FACTOR DE EFICIENCIA DEL COLECTOR
C
WRITE(*,550)
DO 170 I=1,N
UTL(I)=UT(I) + UB
AAM(I)=SQRT(UTL(I)/(CKPLAC*DELT))
F(I)=TANH(AAM(I)*(W-D)/2/(AAM(I)*(W-D)/2))
F1(I)=(1/UTL(I))/(W*(1/(UTL(I)*(D+(W-D)*F(I))))+1/CB+1/(3.14*D**HFT(I)))
WRITE(*,40)F1(I)
170 CONTINUE
C
C    DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA EN LA DIRECCION DEL FLUJO
C
DO 270 I=1,N
G(I)=FLUJ(I)/AC
FR(I)=G(I)*CP*(1-EXP(-UTL(I)*8F1(I)/(CP)))/UTL(I)
QU(I)=AC*FR(I)*(S(I)-UTL(I)*(TENT(I)-TIAMB(I)))
ANH(I)=QU(I)/(HR(I)*AC)
270 CONTINUE
WRITE(*,500)
DO 600 I=1,N
WRITE(*,43)HR(I),TIAMB(I),ANH(I)
600 CONTINUE
WRITE(*,580)

```

```
DO 430 I=1,N
WRITE(*,290)QU(I)
430 CONTINUE
10  FORMAT(1X,`ENTRE EL NUMERO DE DATOS`)
20  FORMAT(1X,1I3)
40  FORMAT(7X,F7.3)
41  FORMAT(1X,F7.3
43  FORMAT(7X,F7.3,5X,F7.3,5X,E8.2)
45  FORMAT(9X,F7.3,8X,F7.3,6X,F7.3,5X,F7.3)
5   FORMAT(1X,F7.3,9X,F7.3,6X,F7.3,5X,F7.3)
8   FORMAT(5X,F7.3,11X,F8.3,5X,E8.3)
9   FORMAT(1X,F7.3)
50  FORMAT(1X, `DISTANCIA ENTRE LA PLACA Y EL VIDRIO= `)
60  FORMAT(1X, `GROSOR DEL AISLANTE= `)
70  FORMAT(10X, `HUMEDAD REL=  TENTRADA=  TSALIDA=  TIAMBIENTE= `)
75  FORMAT(6X, `VEL DEL VIENTO =  RADIACION =  FLUJO = `)
78  FORMAT(1X, `RAD PLACA= `)
80  FORMAT(1X, `CONDUCTIVIDAD DEL AISLANTE= `)
90  FORMAT(1X, `ANGULO DEL COLECTOR= `)
100 FORMAT(1X, `EMITANCIA DE LA PLACA`)
110 FORMAT(1X,`EMITANCIA DEL VIDRIO`)
120 FORMAT(1X,`CONDUCTANCIA DEL VIDRIO`)
160 FORMAT(1X,`DISTANCIA ENTRE LOS TUBOS=`)
180 FORMAT(1X,`GROSOR DE LA PLACA DE METAL=`)
```

```
190  FORMAT(1X,`CONDUCTANCIA DE LA PLACA=`)  
200  FORMAT(1X,`DIAMETRO DEL TUBO=`)  
210  FORMAT(1X,`CONDUCTIVIDAD DEL ESTAGNO=`)  
220  FORMAT(1X,`GROSOR DEL ESTAGNO=`)  
230  FORMAT(1X,`LONGITUD DE LA SOLDADURA CON ESTAGNO=`)  
280  FORMAT(1X,`EFICIENCIA POR HORA=`)  
290  FORMAT(1X,F7.3)  
300  FORMAT(1X,`CAPACIDAD CALORIFICA DE LA PLACA=`)  
310  FORMAT(1X,`AREA DEL COLECTOR=?`)  
320  FORMAT(1X,`TEMPERATURA DEL VIDRIO=`,1X,`COEFICIENTE DE PERDIDA DE CALOR=`)  
330  FORMAT(1X,`PERDIDA EN EL FONDEO DEL COLECTOR=`)  
500  FORMAT(1X,`HORA`,5X,`H,W/M2`,5X,`TEMP AMB`, 5X, `EFICIENCIA`)  
550  FORMAT(1X,`FACTOR DE EFICIENCIA DEL COLECTOR`)  
580  FORMAT(1X,`GANANCIA DE ENERGIA UTIL DEL COLECTOR`)  
  
END
```

## VI. BIBLIOGRAFIA

1. Aubrey, J. Brown y Marco Salvatore M.  
"Introducción to Heat Transfer". 3th. ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1958, 332 p.
2. Champeney, D.C.  
"Fourier transforms and their Physical applications".  
1th. ed. New York: Academic Press, 1973. 256 p.
3. Duffie, John A. and Beckman, William A.  
"Solar Energy Thermal Processes". New York: John Wiley & Sons, 1974.
4. Furlán, G., Rodríguez, H. Violini, G.  
"Non-Conventional Energy Sources". Vol 3  
World Scientific Publising Co. Pte. Ltd. Singapore, 1984. 676p.
5. Gosman, A.D., Pun, W.M. and Runchel, A.K.  
"Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows".  
1th. ed. 3th impression. London: Butter & Tanner,  
1978. 1362 p.
6. "Handbook of Chemistry and Physics", 53 rd, Chemical Rubber  
Publishing Co. Cleveland (1972)
7. Holman, J.P.  
"Heat Transfer". 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1963, 570p.
8. Hunt, V, Daniel  
"Energy Dictionary" New York: Van Nostrand Reinhold Company,  
1979.

9. ICAITI  
"Aplicaciones de la Energía Solar" Guatemala: ICAITI, 1983
10. Jeffreys, Harold  
"Methods of Mathematical Physics". 2th ed. Londres: Cambridge University Press, 1950, 708 p.
11. Lucas, Ted  
"How to Build a Solar Heater". New York: Crown Publisher, Inc. 1980, 242 p.
12. McAdams, William H.  
"Heat Transmission". 3th. ed. New York: McGraw-Hill, 1954, 532 p.
13. Menzel, Donald H.  
"Fundamental Formulas of Physics" 1th ed. New York: Prentice Hall. 1955. 765 p.
14. Resnick, Robert and Halliday, David  
"Física". 1th ed. tercera impresión, México: CECSA. 1976  
1964 p.
15. Solar Energy Applications Laboratory Colorado State University  
"Solar Heating and Cooling of Residential Buildings Design of Systems".  
For sale by the Superintendent of Documents, U.S.  
Government Printing Office. Washintong, D.C.  
204022, 1977

16. Sparrow, E.M. and Cess, R.D.  
"Radiation Heat Transfer". 1th ed. New York: McGraw-Hill  
1978, 366 p.
17. Weinberger, Hans  
"Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales" 1th.ed.Tr.  
Dr. Francisco Vélez Cantarella. España: Editorial Reverté  
1977. 467 p.
18. Bergthorsson, Byron  
"Temperature, transitivity and the Zero Law". American  
Journal of Physics Vol. 45, No. 3 (March, 1977) 270-271.
19. Bogy, D.B. and Naghdi  
"On Heat Conduction and Wave Propagation in Rigid Solid",  
Journal of Mathematical Physics, vol 11, No. 3 (March, 1979)  
917-923
20. Bowers, R.G. and McKerrel A.  
"The Information-Theoretic Statistical Mechanics of a System  
in Contact with a heat Reservoir". American Journal of  
Physics, Vol 46, No. 2 (February, 1978) 138-142.
21. Clausing, A.M.  
"Convective Losses From Cavity Solar Receivers—Comparisons  
Between Analytical Predictions and Experimental results",  
Journal of Solar Energy Engineering.  
Vol 105, No. 2 (February, 1983) 29-33

22. Cooper, P. I. and Sheridan, J.C.  
"The simulated and experimental Performance of a Solar Heat  
Generating System", Journal of Solar energy Engineering,  
Vol. 104, No. 9 (November, 1982) 317-325
23. Debney, B.T. and Knight, J.R.  
"Terrestrial Solar Cells-Present and Future"  
Contemporary Physics, Vol 19 No. 1 (January, 1978) 25-45
24. deFacio, B  
"Heat Conduction Model with Finite Signal Speed,  
Journal of Mathematical Physics, Vol 16. No 4 (April, 1975)  
971-974
25. Durao, D.F.G. and Whitelaw, J.H.  
"Instantaneous Velocity and Temperature Measurements in  
Oscillating Diffusion Flames", Contemporary Physics,  
Vol. 17, No. 3 (June, 1976) 249-274
26. Haught, A.F.  
"Physics Considerations of Solar Energy Conversion",  
Journal of Solar Energy Engineering, Vol 106, No. 2 (February  
1984) 3-15
27. Kudirka, A.A. and Smoak, R.H.  
"Ceramic Technology for Solar Thermal Receivers",  
Journal of Solar Energy Engineering, Vol 105 No. 2 (February  
1983) 73-79.

28. Srivastava, S.K. and Sharma, P.K.  
"Transport Coefficients of Simple Metals"  
Physics. Vol 48. No. 1 (julio, 1970) 225-236
29. Strumpf, H.J. Kotchick, D.M. and Coombs, M.G.  
"High Temperature Ceramic Heat Exchanger Element for a  
Solar Thermal Receiver"  
Journal Solar Energy Engineering. Vol 104 No 11  
(November, 1982) 395-309
30. Tichy, J.A.  
"The effect of Inlet and Exit Losses on Free Convective  
Laminar Flow in the Trombe Wall Channel"  
Journal of Solar Energy Engineering. Vol 105, No. 4  
(May, 1983) 187-193
31. Zeleanik, Frank J.  
"Thermodynamics" Journal of Mathematical Physics.  
Vol 17. No. 8 (August, 1971) 1686-1701.

