



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Ingeniería**

**Validación Experimental de un Modelo Matemático  
que Simula la Operación de un Calentador Solar.**

**TESIS PROFESIONAL**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

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

**Raúl Alberto Zamudio Armenta**

**México, D. F.**

**1983**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## I N D I C E

RESUMEN	1
Nomenclatura	2
1. INTRODUCCION	4
2. PLANTEAMIENTO GENERAL	8
3. BASES TEORICAS	12
3.1 Naturaleza de la energía solar	12
3.2 Radiación sobre superficies horizontales	16
3.3 Radiación solar sobre un plano inclinado	17
3.4 Factor de proyección	20
3.5 Trasmisión de radiación solar	21
3.6 Energía útil	25
3.7 Calor almacenable en el tanque	28
3.8 Modelo matemático del calentador solar	29
3.9 Programa de computadora	32
3.10 Listados de computadora	36
4. MODELO FISICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	52
4.1 Modelo físico	52
4.2 Descripción de los aparatos de medición	56
4.3 Resultados experimentales	59
5. CORRELACION DE RESULTADOS	74
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
Bibliografía	93

## RESUMEN

En este volumen se describen las características generales de un sistema solar para calentar agua con captadores planos y circulación forzada por una bomba de desplazamiento positivo. Se ordenan las ecuaciones que pueden integrar un modelo matemático capaz de describir la variación temporal de las temperaturas en el captador y en el tanque. Se describe un modelo físico similar a los de producción comercial para agua doméstica, con el cual se obtienen resultados experimentales de las temperaturas. Al comprobarse con estos resultados que la capacidad predictiva del modelo matemático es aceptable, se propone su uso tanto para determinar, en forma relativamente simple, la capacidad de pérdidas de calor del captador y del tanque, así como para auxiliar al diseñador de este tipo de instalaciones solares.

Diciembre de 1982

## Nomenclatura

(En el orden de aparición en el programa)

Variable de texto	Variable de programa	Significado	Unidades
$n$	N0	día del año	-
$\phi$	F1	latitud de la localidad	grados
$s$	S1	inclinación del captador	"
$\gamma$	G0	orientación del captador	"
$T_T$	C0	temperatura inicial del tanque	°C
$T_A$	C8	temperatura ambiente	°C
$\dot{m}$	M0	flujo másico	kg/s
$M$	M1	masa del tanque	kg
$\delta$	D2	declinación solar	grados
$L_D$	L0	longitud del día solar	horas
$\omega$	O0	ángulo horario	grados
$H_b$	H2	radiación directa	kW/m <sup>2</sup>
$H_T$	H1	radiación total	"
$H_d$	H3	radiación difusa	"
$\theta$	T0	ángulo de incidencia de radiación	grados
$\theta_z$	G1	ángulo de incidencia de radiación para $\gamma=0$ , $s=0$	"
$R_b$	R1	factor de proyección	-
$\theta_2$	T9	ángulo de refracción	grados
$\rho$	R2	reflectancia del vidrio	-
$\tau_r$	T8	transmitancia de reflexión	-
$\tau_a$	T7	transmitancia de absorción	-

Variable de texto	Variable de programa	Significado	Unidades
$(\tau\alpha)$	T6	grupo transmitancia-absortancia	-
$Q_{sol}$	Q1	energía recibida del sol	$\text{kW/m}^2$
$T_c$	C3	temperatura del captador	$^{\circ}\text{C}$
$Q_{pc}$	Q2	pérdidas del captador	$\text{kW/m}^2$
$T_2$	C2	temperatura a la salida del captador	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}_2$	C5	temperatura a la salida del captador al final del intervalo	$^{\circ}\text{C}$
$Q_{pT}$	Q3	pérdidas térmicas del tanque	$\text{kW/m}^2$
$\bar{T}_T$	C1	temperatura del tanque al final del intervalo	$^{\circ}\text{C}$
$T_{TN}$	C6	temperatura del tanque cuando no existe radiación solar	$^{\circ}\text{C}$
$\alpha$	0.93	absortancia	-
$U$	0.0015	coeficiente global de pérdidas térmicas del tanque	$\text{kW/m}^2\text{^{\circ}C}$
$A_c$	2	área de captación	$\text{m}^2$
$A_p$	2	área de pérdidas	$\text{m}^2$
$E$	$3 \times 10^{-3}$	coeficiente de pérdidas del captador	$\text{kW/m}^2\text{^{\circ}C}$
$j$	1.2	exponente de pérdidas del captador	-
$C_p$	4.18	calor específico a presión constante (agua)	$\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
$K$	0.32	coeficiente de extinción	$\text{cm}^{-1}$
$n_1$	1	índice de refracción del aire	-
$n_2$	1.5	índice de refracción del vidrio	-
$\epsilon$	0.05		
$\xi$	-1.57079	variables de comparación	-
$\sigma$	-4.7123		

## 1. INTRODUCCION

La energía solar que incide sobre la superficie de la República Mexicana es cuantiosa, debido a que nuestro país se ubica en la zona de máxima insolarción anual del planeta. Esta situación ha motivado gran interés en la energía solar por parte de los ingenieros mexicanos durante la última década, y diversos trabajos recientes han demostrado que la calefacción hasta temperaturas de 100°C es técnica y económicamente viable (ref 1).

En particular, el empleo de la energía solar para proporcionar agua caliente para baños, para la cocina y para la calefacción ambiental en viviendas ha evolucionado rápidamente, y en este país hay ya varias empresas que industrializan equipos para este fin. Por otro lado, el alza constante en los precios de los combustibles tradicionales y la necesidad urgente de contar con tecnologías nacionales para lograr la autosuficiencia industrial hacen previsible una demanda cada vez mayor de procedimientos de diseño que lleven al fabricante rápidamente a diseñar calentadores solares "óptimos".

Los calentadores solares más comúnmente utilizados a nivel doméstico son los de circulación termosifónica, es decir, aquellos que efectúan el transporte del agua calentada por el sol en el captador solar hasta un tanque aislado térmicamente, aprovechando el efecto de flotación del agua más caliente. Estos aparatos tienen ventajas por ser independientes de la energía eléctrica para el bombeo y se fabrican en el país desde hace unos 40 años. Su desventaja principal es que la circulación termosifónica es poco práctica para capacidades instaladas de más de 600 litros por día, ya que el tanque térmico debe estar a mayor altura que los captadores. Así, aunque se han hecho estudios minuciosos del funcionamiento de los calentadores solares termosifónicos (refs 2 y 3, por ejemplo) puede decirse que la mayor demanda tecnológica del futuro cercano estará asociada a los sistemas de circulación forzada y de control automático.

Al inicio de este trabajo se detectó la necesidad de evaluar en forma rápida, sencilla y precisa, la capacidad de calentamiento de captadores solares planos, ya sea para ser usados en pequeños sistemas solares termosifónicos o en sistemas de circulación forzada. Esta evaluación debería poderse hacer con las herramientas que maneja habitualmente un fabricante cualquiera de sistemas solares del país, esto es, fundamentalmente con medidores de temperatura y de flujo de agua, así como con elementos de cálculo (no de medición) de la radiación solar instantánea y de algunas características micrometeorológicas. Dado que los flujos de agua en captadores planos operando termosifónicamente son minúsculos y que corresponden a diferencias pequeñas de presión (ref 3), su medición es sumamente compleja, por lo que la evaluación de captadores planos suele hacerse con circulación forzada. Así mismo, y dada la necesidad de evaluarlos a distintas temperaturas, conviene



estudiarlos operando en circuito cerrado con un tanque térmico, esto es, en una conexión similar a la que corresponde a un calentador solar para agua doméstica de circulación forzada.

Como suele especificarse en cualquier texto especializado (ref 4, por ejemplo) la evaluación de las características de operación de un captador solar, en cuanto a los ingresos de energía solar o ganancias térmicas, es relativamente fácil. La parte difícil corresponde a las pérdidas térmicas, que en general se describen como fenómenos combinados de convección y radiación, donde además la conducción térmica puede jugar un papel de importancia. En un calentador solar conectado a un tanque térmico, subsiste así la incertidumbre de cuánto calor pierde el captador y cuánto el tanque y las tuberías.

El propósito de este trabajo es probar que se puede construir un sencillo modelo matemático de parámetros concentrados para correlacionar las características de radiación solar de una localidad cualquiera, algunas características del clima local y las propiedades esenciales del diseño de un calentador solar para predecir, con un grado de precisión aceptable, las temperaturas de operación del captador y del agua en el tanque térmico. Más aún, dicho modelo sirve también para estimar, comparando los resultados teóricos con algunos datos experimentales de fácil obtención, las características de las pérdidas térmicas del captador y del tanque.

Después de un breve enunciado de las características generales de la radiación solar y de sus formas de estimarla fácilmente, que se discuten ampliamente en la ref 5, se presentan en el capítulo 3 las bases teóricas y la

construcción del modelo matemático. . Con el aparato experimental y los resultados que de ese se obtuvieron, como se describe en el capítulo 4, se derivan las correlaciones que se discuten en el capítulo 5. Al final del trabajo se concluye que este tipo de modelos es útil para auxiliar al diseñador de sistemas solares térmicos.

## 2. PLANTEAMIENTO GENERAL

La intensidad de radiación solar que llega a la atmósfera terrestre, antes atravesarla, tiene un valor de  $1.353 \text{ kW/m}^2$  y, al ser esencialmente constante, se le designa el nombre de constante solar ( $I_{sc}$ ). La absorción por parte de la atmósfera reduce la intensidad en una medida que depende parcialmente de la longitud de recorrido a través de la atmósfera.

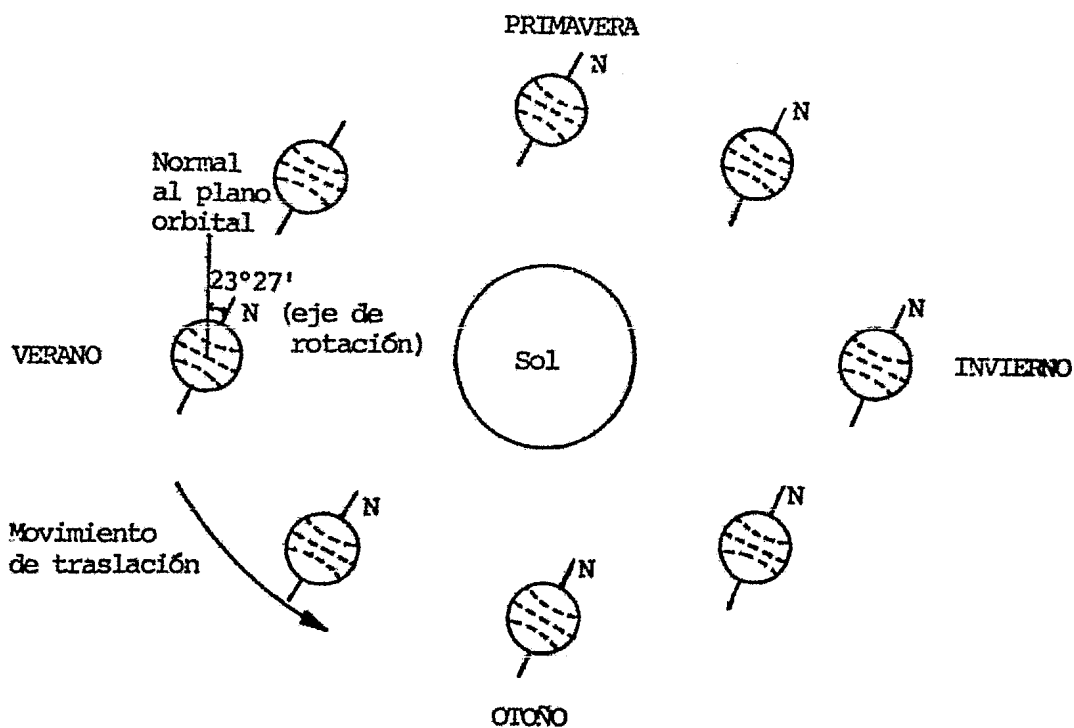
Durante el mediodía, cuando el sol se encuentra en el cenit, la radiación tendrá un recorrido más corto a través de la atmósfera y por lo tanto su intensidad será mayor que a otra hora del día, si la nubosidad es constante. En el ocaso tendrá un recorrido más largo antes de alcanzar la superficie de la tierra, por lo que la intensidad de radiación, será bastante menor. En lugares altos, sobre el nivel del mar, el recorrido de la radiación a través de la atmósfera será menor, por lo que la energía recibida será mayor.

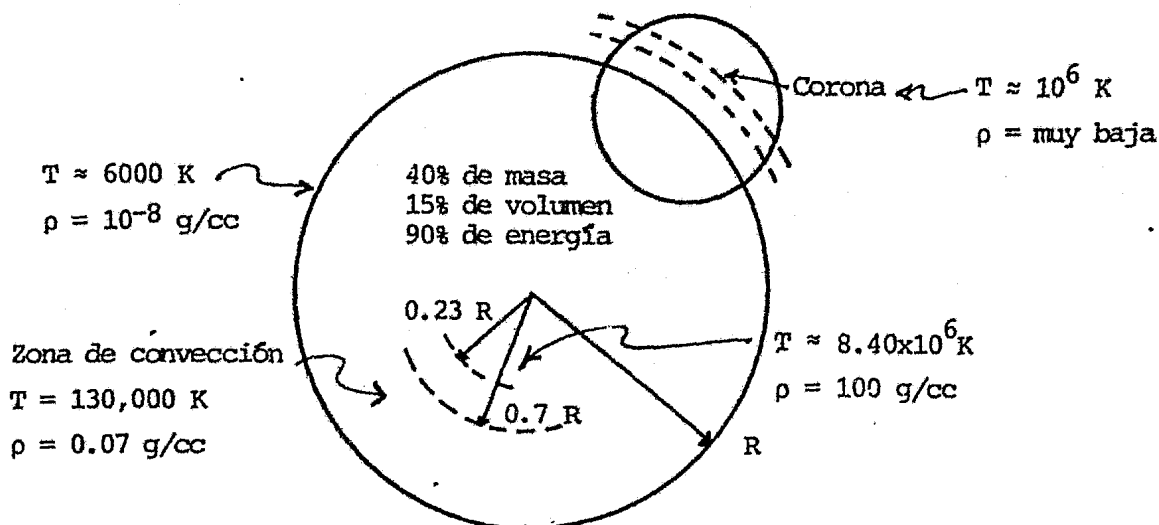
Debido a la inclinación de la tierra y a sus movimientos de rotación y tras

Conforme la tierra describe su órbita en unos 365 días, permite distinguir cuatro estaciones: la primavera, cuando el sol parece viajar del ecuador al trópico de cáncer, del 21 de marzo al 21 de junio; el verano, del 21 de junio al 21 de septiembre, cuando el sol regresa al ecuador; el otoño, cuando el sol baña la zona tropical del ecuador al trópico de capricornio, del 21 de septiembre al 20 de diciembre; y el invierno, del 20 de diciembre al 21 de marzo, cuando el sol vuelve a pasar sobre el ecuador. Los días en que el sol circula sobre los trópicos se llaman solsticios (de verano e invierno) y cuando está sobre el ecuador se llaman equinoxios.

Más aún que por la influencia estacional, la intensidad local de la radiación solar sobre la tierra depende de la transparencia de la atmósfera, que a su vez depende de la humedad, de la nubosidad y de la concentración de contaminantes físicos y químicos. Conocer la magnitud de la radiación solar sobre un aparato cualquiera es indispensable si se desea, como es el caso de este trabajo, evaluar su funcionamiento. Así, para lograr construir el modelo matemático correspondiente, se recurre páginas adelante a varias correlaciones de tipo empírico, propuestas en otros trabajos (refs 3 a 5), que luego se validarán mediante el trabajo experimental que se relata en el capítulo 4 posterior.

lación el ancho de la atmósfera que tendrá que recorrer la radiación solar para alcanzar la superficie de la tierra variará a lo largo del año. Por esto se dice que la inclinación de la tierra (o de su eje de rotación,  $23^{\circ}27'$ ) es responsable de las variaciones del clima, produciéndose así las estaciones.





Se estima que el 90% de la energía es generada en la región de  $0$  a  $0.23 R$  (donde  $R$  es el radio del sol), la cual contiene el 40% de la masa del sol. A una distancia de  $0.7R$  a  $R$  se encuentra la zona de convección, que se llama así porque en esta zona este fenómeno comienza a ser importante.

*Radiación solar sobre la superficie de la tierra.* Los siguientes conceptos son de interés en la definición de las características de la radiación solar.

*Radiación directa.* Es la radiación solar recibida sin sufrir ningún cambio de dirección.

*Radiación difusa.* Es la radiación solar recibida después de que el rayo solar ha cambiado de dirección por reflexión y difusión en la atmósfera.

### 3. BASES TEORICAS

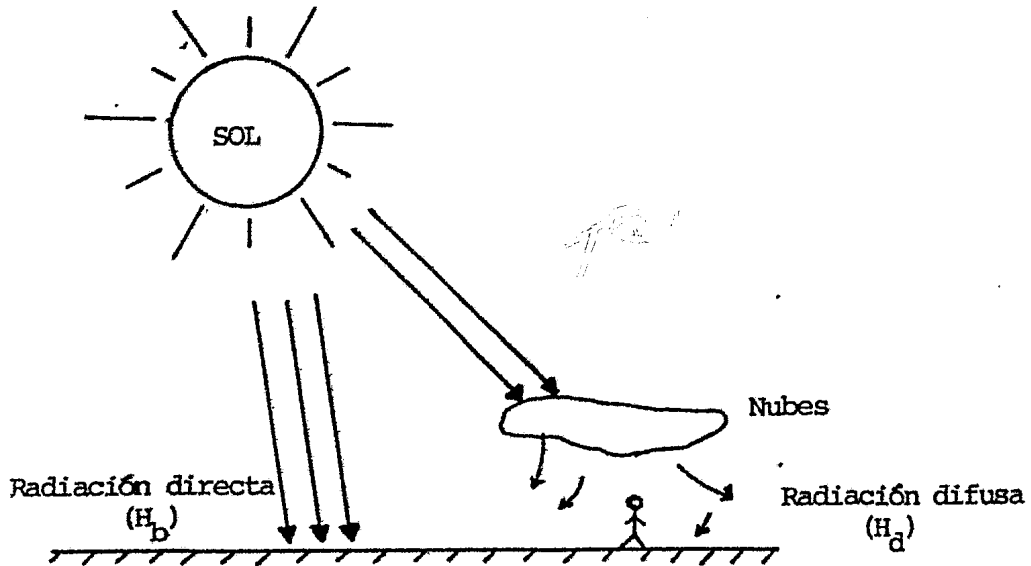
#### 3.1 Naturaleza de la energía solar

En este capítulo se explican brevemente las características de este tipo de energía sobre la superficie de la tierra, para lo que se describirá en forma breve lo que es la fuente de energía, el sol.

El sol es una esfera de materia gaseosa caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^6$  km, y se encuentra a una distancia media de la tierra de  $1.5 \times 10^8$  km. Su superficie se encuentra a una temperatura de aproximadamente 6 000 K. La temperatura en la parte central se estima entre  $8 \times 10^6$  y  $40 \times 10^6$  K y su densidad es de 80 a 100 veces la densidad del agua.

Se muestra a continuación un esquema de la estructura del sol.

A continuación se muestran esquemáticamente estas componentes.



La radiación directa está sujeta a variaciones debido a:

1. Variación en la distancia de la tierra al sol y de sus posiciones relativas
2. Atenuación en la atmósfera por moléculas de aire, vapor, etc.
3. Variación en la atmósfera por absorción de  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$  y  $CO_2$

La radiación difusa es la que llega en forma indirecta. Esto sucede cuando la radiación directa sufre una desviación por nubes o cualquier materia que no sea transparente; esto es, el rayo directo del sol se esparce y resulta en lo que se conoce como radiación difusa.



Esta relación es muy importante en el proceso de cálculo de la radiación total que recibe un plano horizontal, como se ilustra posteriormente.

Experimentalmente, la radiación se mide mediante un aparato llamado "piranómetro"; el piranómetro está formado básicamente por una celda solar térmica o fotopila. Se usan también celdas de silicio para medir la energía solar, aunque las celdas de sulfuro de cadmio y de selenio son también muy usadas. Las celdas solares de silicio tienen la propiedad de que su corriente es una función lineal de la radiación solar incidente. Sin embargo, tienen la desventaja que la respuesta espectral no es lineal; su calibración es una función de la distribución espectral de la radiación incidente y varía con el ángulo de radiación incidente y con la temperatura. Las fotopilas son, por lo mismo, más populares, pues son menos sensibles a las variaciones de temperatura.

El dato de la radiación es obtenible de varias formas, como por ejemplo:

- a. Mediciones instantáneas o integradas a lo largo de un periodo de tiempo conocido
- b. Mediciones independientes de radiación directa, difusa o total, en distintos instrumentos
- c. Mediciones sobre superficies de distintas orientaciones, aunque usualmente se hacen sobre la horizontal; algunas veces el plano de medición se inclina con una pendiente fija, o normal a la dirección de la radiación

Observando la gráfica de la distribución de la radiación a lo largo de un día y aplicando métodos estadísticos se concluye que, para correlacionar

las radiaciones incidentes en el plano horizontal, se pueden hacer las aproximaciones siguientes (ver ref 3):

Para la radiación total

$$H_T(t) = H_{Tm\acute{a}x} \cos^{1.2} 180 t/L_d$$

Para la radiación directa

$$H_b(t) = H_{bm\acute{a}x} \cos^{1.5} 180 t/L_d$$

Y para la radiación difusa, con la definición antes dada de la total,

$$H_d(t) = H_T(t) - H_b(t)$$

En las expresiones anteriores  $L_d$  es la longitud del día solar y  $t$  es el tiempo.

La longitud del día solar es la duración en horas del periodo en que el sol es visible en determinado lugar ignorando la orografía local, y depende del día del año y de la latitud. La longitud del día solar así definido está dada por:

$$L_d = 2/15 \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

donde:

$\phi$  latitud del lugar

$\delta$  declinación solar

La declinación solar es la posición angular del sol al mediodía solar con respecto al plano ecuatorial; al norte es positiva y negativa al sur. La declinación está dada por la ecuación de Cooper:

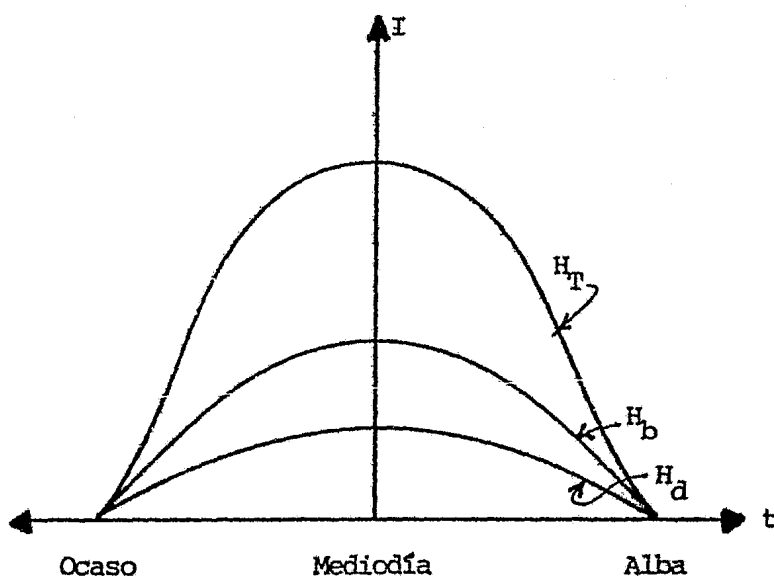
$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

donde

$n$  día del año ( $n=1,2,\dots,365$ ) y 23.45 es la máxima declinación ha-

### 3.2 Radiación sobre superficies horizontales

Si se grafica la radiación que se capta en una superficie horizontal en un plano cartesiano en que el eje de las ordenadas es la intensidad de radiación y el eje de las abscisas es el tiempo solar, la distribución en un día de turbiedad atmosférica homogénea sería



donde:

- $H_T$  radiación total
- $H_d$  radiación difusa
- $H_b$  radiación directa

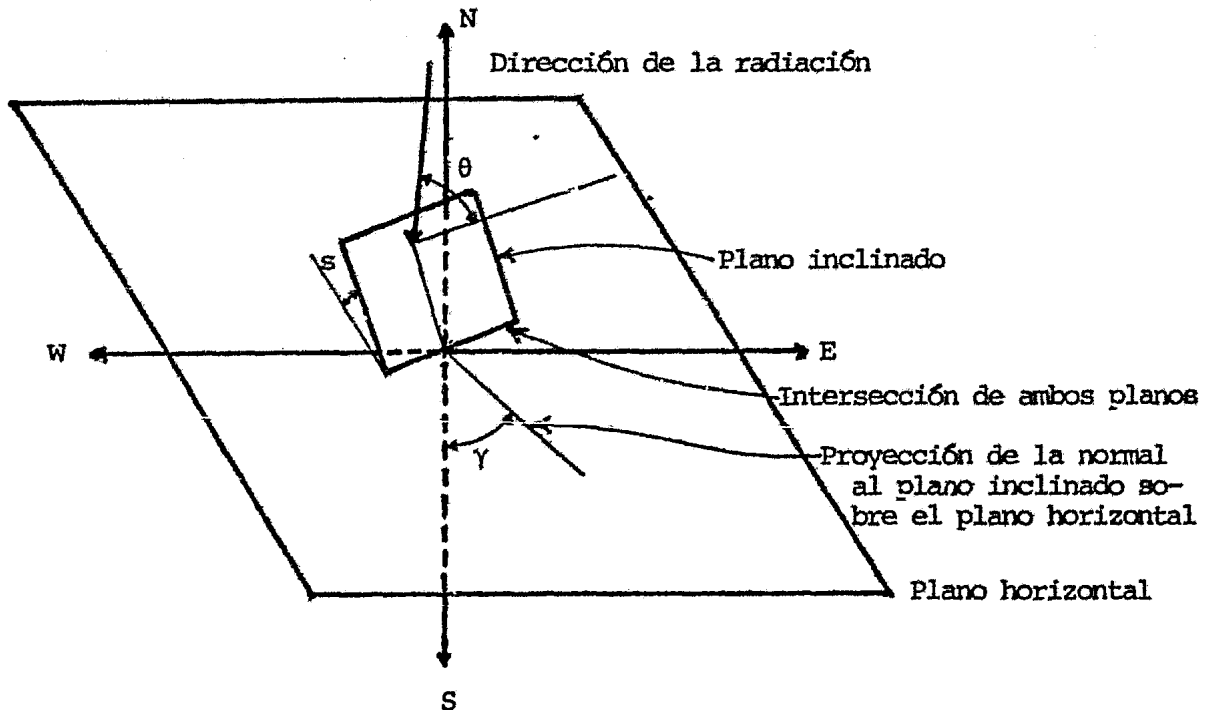
La radiación total es la suma de la radiación difusa y la radiación directa, o sea,

$$H_t = H_b + H_d$$

cia el norte.

### 3.3 Radiación solar sobre un plano inclinado

Se establece la posición de cualquier plano inclinado mediante su ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal y su ángulo de orientación con respecto a la dirección del sur como se esquematiza en el siguiente croquis.



donde

$s$  ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal y varía de  $0 \leq s \leq 180^\circ$

$\gamma$  ángulo de orientación, formado entre la proyección de la normal al plano inclinado sobre el horizontal y la dirección del sur

$\theta$  ángulo de la radiación solar directa incidente

El ángulo de orientación o ángulo de azimut de la superficie es la desviación de la normal a la superficie con respecto al meridiano local. La posición cero es hacia el sur y es positivo al este y negativo al oeste. El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre el plano inclinado se mide entre la dirección de la radiación y la normal al plano, y es función de los siguientes ángulos:

- $\phi$  latitud del lugar
- $\delta$  declinación
- $s$  inclinación
- $\gamma$  orientación
- $\omega$  ángulo horario

El ángulo horario es el ángulo formado por la dirección de los rayos solares y la vertical, y se dice que es positivo en la mañana y negativo en la tarde y cero al mediodía, y se puede determinar por la relación

$$\omega = 360/24 \times \text{hora solar}$$

La relación del ángulo de incidencia  $\theta$  entre los otros ángulos es:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \text{sen}\delta \text{ sen}\phi \text{ coss} \\ &\quad -\text{sen}\delta \text{ cos}\phi \text{ sens} \text{ cosy} \\ &\quad +\text{cos}\delta \text{ cos}\phi \text{ coss} \text{ cos}\omega \\ &\quad +\text{cos}\delta \text{ sen}\phi \text{ sens} \text{ cosy} \text{ cos}\omega \\ &\quad +\text{cos}\delta \text{ sens} \text{ sen}\gamma \text{ sen}\omega \end{aligned}$$

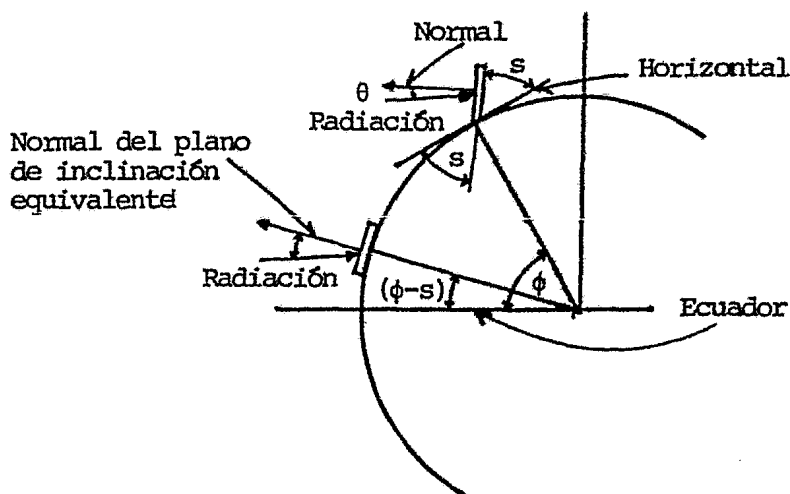
En muchos casos esta ecuación puede simplificarse. Por ejemplo, para superficies horizontales donde  $s = 0^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega$$

donde

$\theta_z$  suele también llamarse ángulo del cenit o cenital y es el ángulo formado entre el rayo del sol y la vertical

Las superficies con inclinación  $s$  al norte o al sur tienen la misma relación angular con la dirección de radiación como una superficie horizontal en una latitud de  $(\phi-s)$ . Esta relación es mostrada en la figura siguiente:



Haciendo la sustitución en la ecuación general de  $\cos\theta$  y reduciendo términos semejantes se llega a la expresión, válida en todo caso en que  $\gamma = 0$ ,

$$\cos\theta_T = \cos(\phi-s) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi-s) \sin\delta$$

El subíndice T en  $\theta$  denota que  $\gamma = 0$ .

### 3.4 Factor de proyección

Para el propósito del estudio presente es necesario transformar la radiación, conocida, sobre una superficie horizontal, a la recibida sobre un plano inclinado. Esto puede hacerse exactamente para la componente de directa, y en forma aproximada para la radiación difusa. El problema de estimar la fracción de radiación difusa, en esta aproximación, se rodea suponiendo que esa componente es isotrópica, esto es, la magnitud de radiación difusa sobre un plano inclinado es idéntica a la recibida sobre el plano horizontal,  $H_d$ . Colocando así un superíndice a la radiación sobre el plano inclinado, se acepta aquí que  $H'_d = H_d$ .

La fracción de la radiación directa sobre una superficie inclinada,  $H'_b$ , como función de la recibida sobre una superficie horizontal,  $H_b$ , se expresa en términos de los ángulos  $\theta_z$  y  $\theta$  a través del "factor de proyección"  $R_b$ , como sigue:

$$R_b = H'_b/H_b = \cos\theta/\cos\theta_z$$

Cuando  $\gamma = 0$ , el factor  $R_b$  se calcula en función de  $\theta_T$  en vez de  $\theta$ .

De este modo, la radiación total que recibe un plano inclinado cualquiera puede calcularse por

$$H'_T = H'_b + H'_d$$

$$\text{o sea, } H'_T = H_b R_b + H_d$$

Esta expresión es satisfactoria solo cuando la radiación difusa es una pequeña fracción de la total, como ocurre en un día relativamente despejado,

y se usa aquí ya que son esos días los de interés para el cálculo de calentadores solares. Algunos autores consideran también válido suponer  $H_d$  isotrópica en días de alta nubosidad, donde  $H_d \rightarrow H_T$ . En general, la expresión es aceptable cuando el ángulo de inclinación  $s$  es pequeño.

Nótese que las ecuaciones de  $\theta$  tienen solución aún cuando la radiación solar no caiga sobre la superficie en estudio, esto es, cuando  $\theta > 90^\circ$ . Ello ocasiona que  $R_b$  tome valores negativos en esos casos. Así, deben acotarse los valores de  $R_b$  de modo que

$$\begin{aligned} H'_b &> 0 & \text{si } R_b > 0 \\ H'_b &= 0 & \text{si } R_b \leq 0 \end{aligned}$$

### 3.5 Transmisión de radiación solar

Para superficies transparentes a la radiación incidente, la suma de la absorptancia, reflectancia y transmitancia es la unidad (la radiación incidente es absorbida, reflejada y transmitida). La transmitancia, como la reflectancia y la absorptancia, es una función de la longitud de onda del ángulo de incidencia de la radiación, del índice de refracción  $n$  y del coeficiente de extinción del material,  $K$ . En rigor,  $n$  y  $K$  son funciones de la longitud de onda de la radiación.

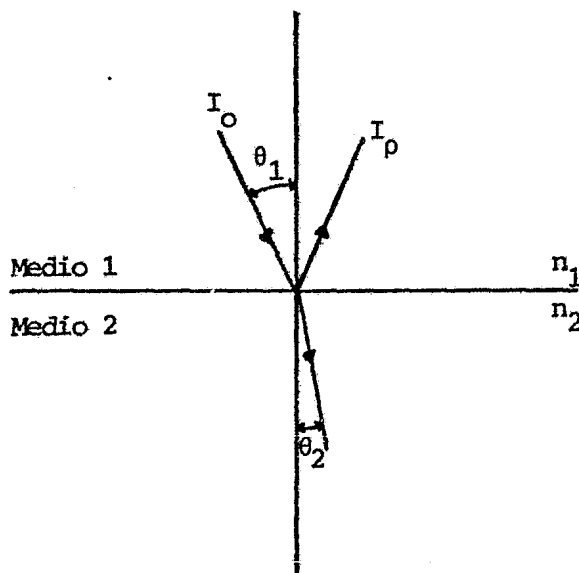
#### *Reflexión de interfaces*

La relación para la reflexión de radiación para un índice de refracción  $n$  cualquiera es, como función del ángulo de incidencia  $\theta = \theta_1$ ,



$$\frac{I_r}{I_o} = \rho = 1/2 \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]$$

donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y de refracción respectivamente, como se ilustran en la siguiente figura:

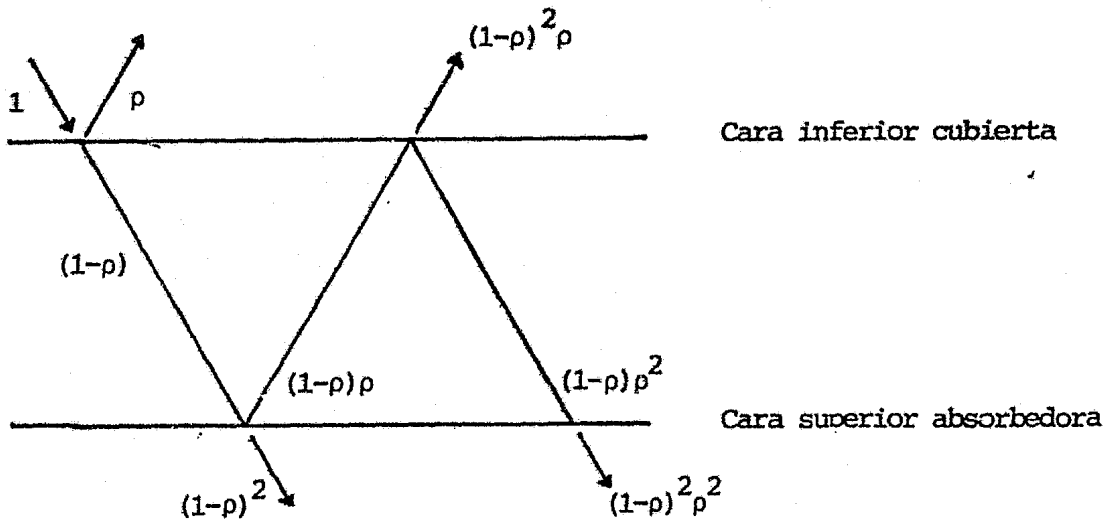


En esta expresión los dos términos representan la reflexión para cada uno de los componentes de polarización.

Los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  son constantes para cada sustancia, referidas al aire donde  $n=1$ , y se relacionan entre sí para determinar el ángulo de refracción  $\theta_2$  como función del ángulo de incidencia  $\theta_1$  a través de la ley de Snell:

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

Los materiales usados como cubiertas en las aplicaciones solares deben tener alta transmitancia a la radiación solar y alta reflectancia a la radiación infrarroja. Ya que no toda la radiación transmitida por una cubierta de vidrio se absorbe en el absorbedor y una fracción se refleja, la trasmisión



tancia global es una función de las reflexiones múltiples que se presentan en el espacio entre la cubierta y el absorbedor, como se ilustra en la figura, y puede calcularse como

$$\tau_r = (1-\rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho^2)} = \frac{1-\rho}{1+\rho}$$

Esta expresión es válida para captadores planos con una sola cubierta.

Para un sistema de cubiertas, todas de un mismo material, un análisis similar resulta en

$$\tau_r = \frac{(1-\rho)}{1+(2n-1)\rho}$$

donde  $n$  es el número de cubiertas de reflectancia  $\rho$ .

#### *Absorción de la radiación en cubiertas semitransparentes*

La absorción de radiación en cubiertas semitransparentes es descrita por la ley de Bouger la cual se basa en la suposición de que la radiación absor-

bida es proporcional a la intensidad local. La radiación disminuye en su paso a través del medio semitransparente de modo proporcional a la distancia recorrida, es decir,

$$dI = -IKdx$$

donde  $K$  es el coeficiente de extinción ( $\text{cm}^{-1}$ ) y es constante en el espectro solar. Integrando entre 0 y  $L$ , donde  $L$  es el espesor recorrido del medio, se tiene

$$\tau_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-KL}$$

La transmitancia global, entonces, considerando los efectos combinados de reflexión y absorción, se obtiene al multiplicar las dos transmitancias anteriores, o sea,

$$\tau = \tau_r \tau_a$$

Esta relación es satisfactoria cuando, como en vidrio y otras cubiertas usadas comúnmente en captadores solares, el producto  $KL$  es pequeño.

#### Producto transmitancia-absortancia

Para el análisis del sistema solar que se estudia adelante es necesario evaluar el factor  $(\tau\alpha)$ , que es de un valor tal que, multiplicado por la radiación incidente, resulta en el valor de la radiación que efectivamente absorbe el absorbedor. El proceso de reflexiones múltiples que ocurren entre la cubierta y el absorbedor debe tomarse en cuenta en la elaboración de  $(\tau\alpha)$ . Este proceso de reflexiones se ilustra en la figura siguiente, donde  $\tau$  es la transmitancia de la cubierta del sistema y es calculada por la ecuación antes definida,  $\tau = \tau_r \tau_a$  y  $\alpha$  es la absortancia de la placa absorbidora. La energía incidente  $\tau\alpha$  es absorbida por la placa y  $(1-\alpha)\tau$  es reflejada a la

cubierta del sistema. La reflexión de la placa absorbadora es probablemente más difusa que especular como que la fracción  $(1-\alpha)\tau$  que llega a la placa es radiación difusa y  $(1-\alpha)\tau\rho_d$  es reflejada a la placa absorbadora. La cantidad  $\rho_d$  se refiere a la reflexión de la cubierta a la placa por radiación incidente-difusa. La múltiple reflexión de radiación difusa absorbida es

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d}$$

La reflectancia difusa  $\rho_d$  puede ser calculada por la definición de reflectancia, para ambas componentes de polarización, si se supone un ángulo equivalente de incidencia,  $\theta_1$ , de  $60^\circ$ .

### 3.6 Energía útil

Habiendo visto los parámetros que influyen en el aprovechamiento térmico de la energía solar sin concentración se pasa ahora al cálculo de la energía utilizable en el captador; esto es, la energía útil, es la que realmente se está quedando en la placa absorbadora y es de la única que se puede disponer. La evaluación de esta energía es:

$$\dot{H}_U = (\tau\alpha) H'_T$$

donde

$H_U$  energía útil

$H'_T$  energía total sobre un plano inclinado

$(\tau\alpha) < 1$

Esta energía  $H_U$  no es aún la transferida al fluido de trabajo, pues el captador exhibe pérdidas térmicas por convección y radiación (al cielo fundamen

talmente) que son proporcionales a la diferencia de temperaturas entre el captador y el ambiente.

Un camino de evaluación de las pérdidas térmicas es definir un coeficiente global de pérdidas térmicas,  $U_{pc}$ , que dé cuenta de los procesos convectivos y radiativos al ambiente en forma global. Con esta definición,

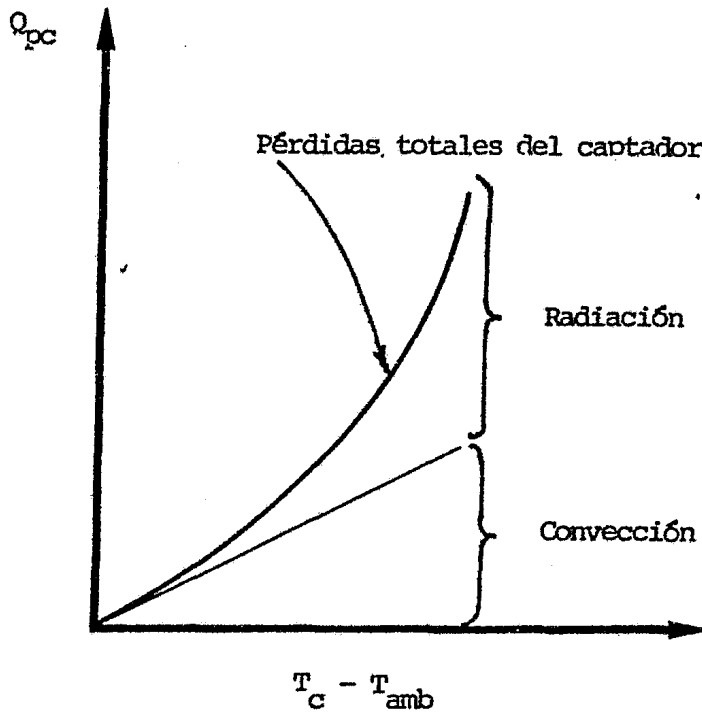
$$Q_{pc} = U_{pc} Ac (T_c - T_{amb})$$

donde  $Q_{pc}$  son las pérdidas totales del captador a la temperatura  $T_c$ , cuando la temperatura del ambiente es  $T_{amb}$ . Combinando las últimas ecuaciones se tiene que el calor utilizable por el fluido en el captador,  $Q_u$ , es

$$Q_u = Ac \left[ (\tau\alpha) (H_b R_b + H_d) - U_{pc} (T_c - T_{amb}) \right]$$

Se observa, sin embargo, que el valor de  $U_{pc}$  es difícil de calcular y que, además es función tanto de  $T_c$  como de  $T_{amb}$ . Más aún, es una función no lineal de estas temperaturas, particularmente a valores altos de  $T_c$ , cuando la radiación juega un papel de importancia creciente. Es también no lineal en tanto que la componente de convección natural es fuertemente dependiente de las propiedades físicas del aire, que varían con las temperaturas.

El problema puede rodearse si se observa que, por lo mismo de arriba, la relación de  $Q_{pc}$  vs.  $(T_c - T_{amb})$  es una función monotónicamente creciente, como ilustra la figura siguiente, cóncava hacia arriba, que en general puede aproximarse por un polinomio de cuarto orden, que resulta de sumar los efectos convectivos y radiativos. Si se determinan pares de valores experimentales de  $Q_{pc}$  y  $(T_c - T_{amb})$ , en condiciones ambientales representativos de la operación normal del captador, puede aproximarse el valor de  $Q_{pc}$  por



una función del tipo

$$Q_{pc} = Ac E (T_c - T_{amb})^j$$

donde las constantes  $E$ ,  $j$  son características de la construcción del captador y de las condiciones ambientales que gobiernan el flujo de calor del captador al ambiente.

De este modo, puede redefinirse la energía útil que el captador aporta al fluido de trabajo como

$$Q_u = Ac \left[ (\tau\alpha)(H_b R_b + H_d) - E(T_c - T_{amb})^j \right]$$

donde  $E$  y  $j$  son ahora independientes de las temperaturas. Claro está, para usar este artificio es necesario recurrir al experimento para conocer valores plausibles de  $E$  y  $j$ , como se hará en el capítulo 5.

### 3.7 Calor almacenable en el tanque

Interesa en este estudio determinar la cantidad de calor que, proporcionado por un captador solar, es almacenado en un tanque térmico. No son idénticos estos flujos de calor en tanto que el tanque pierde al ambiente una cantidad de calor proporcional a su temperatura. Aquí, a diferencia del captador, se suele tener una alta resistencia al flujo térmico, proporcionada por gruesas capas (5-10 cm) de aislante de muy baja conductividad, por lo que pueden despreciarse las pérdidas de radiación y las pérdidas del tanque,  $Q_{pT}$ , pueden describirse linealmente como

$$Q_{pT} = A_T U_T (T_T - T_{amb})$$

En la relación anterior,  $A_T$  es el área exterior del tanque térmico, en la que se define el coeficiente global de pérdidas del tanque,  $U_T$ , cuando el agua del tanque térmico está a una temperatura media  $T_T$ . El valor de  $U_T$  puede calcularse de los principios básicos de transmisión de calor o medirse experimentalmente sobre el prototipo, en un proceso no distinto del apuntado antes para evaluar  $E$ ,  $j$ , del captador. En este caso, conviene mejor evaluar directamente la conductancia global  $K_T = A_T U_T$ , ya que no es necesario desagregar  $A_T$  y  $U_T$ , o sea

$$Q_{pT} = K_T (T_T - T_{amb})$$

Ahora, la energía almacenada en el tanque se evalúa como

$$Q_{alm} = Q_u - Q_{pT}$$

Si el tanque está constituido de  $n$  componentes, cada una de calor específico  $C_i$  y de masa  $M_i$ , y su temperatura representativa es  $T_T$ , la variación de  $T_T$  en el tiempo puede expresarse como

$$Q_{alm} = \sum_{i=1}^n M_i C_i \frac{dT_T}{dt}$$

### 3.8 Modelo matemático del calentador solar

Como se apuntó antes, el sistema en estudio consta de tres elementos principales: el captador solar, el tanque de almacenamiento térmico y el sistema de circulación. En este trabajo se ha partido de la base de que los sistemas solares de gran capacidad (volumen del tanque mayor a 1000 litros), que usualmente operan por convección forzada o bombeo, suelen tener una temperatura de agua en el tanque homogénea, que aquí se representa por  $T_T$ . Estos sistemas, para los que la simulación en computadora es útil desde la etapa del diseño hasta la operación cotidiana, suelen por lo mismo tener un flujo de agua esencialmente constante.

La operación de estos sistemas puede simularse en computadora con un modelo matemático que, basándose en las ecuaciones anteriores, se apoye también en la siguiente información, que constituye las "condiciones de diseño":

- i. el conocimiento de  $H_b(t)$ ,  $H_d(t)$
- ii. una función  $T_{amb}(t)$
- iii. los parámetros de diseño ( $A_c$ ,  $E$ ,  $j$ ,  $U_T$ ,  $A_T$ , etc) que generalmente se apoyan en la experiencia o en trabajo experimental previo
- iv. el flujo que produce la bomba,  $\dot{m}$  ( $\text{kg s}^{-1}$ )

Con estos datos iniciales, las ecuaciones precedentes pueden arreglarse para proporcionar información útil al diseñador. La temperatura media del captador se define como

$$T_c = 1/2(T_1 + T_2)$$



cuando el fluido ingresa al captador a la temperatura  $T_1$  y egresa a  $T_2$ . Obsérvese que esta definición impone un cálculo iterativo de  $T_c$ , ya que

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_u}{\dot{m} C_p}$$

y, como se vio antes,  $Q_u$  es función de  $Q_{pc}$ , dependiente a su vez de  $T_c$  y por tanto de  $T_2$ .

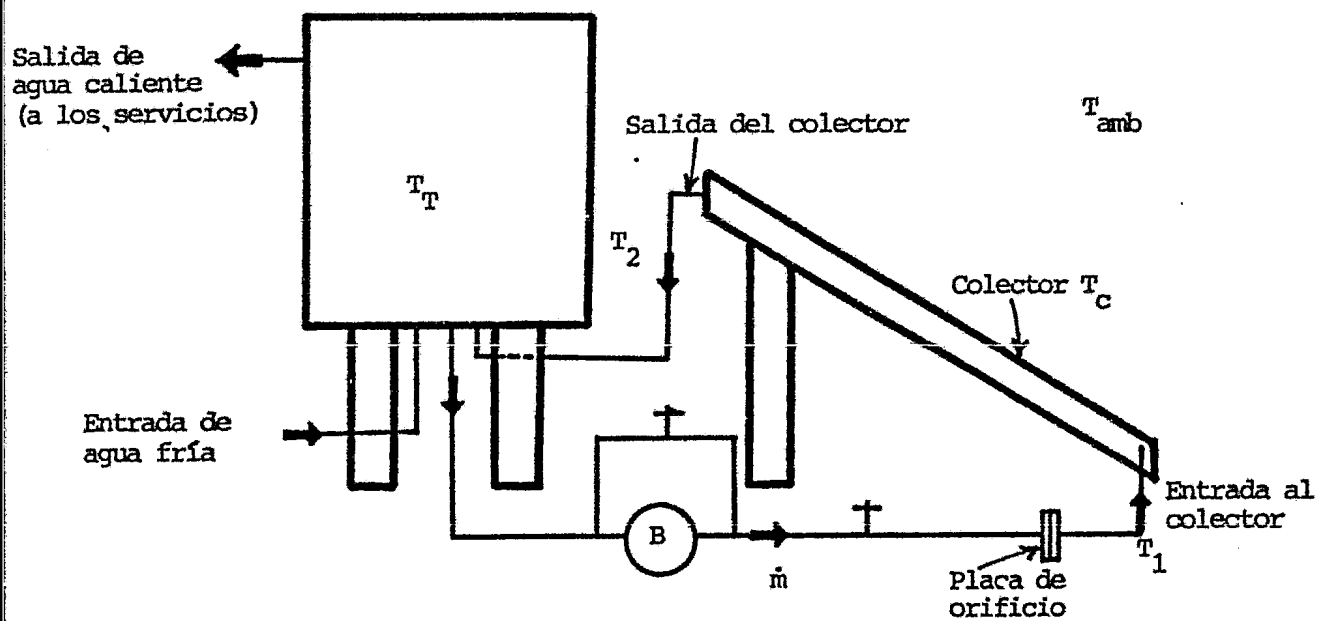
Por otro lado, la función a conocer como último objetivo suele ser  $T_T(t)$ , no  $T_2(t)$ . Así, puede decirse que la inercia térmica del tanque está dominada por el agua, de masa  $M_T$  y de calor específico  $C$ ; linealizando  $Q_{alm}$  en intervalos pequeños de tiempo  $\Delta t$ , se puede escribir finalmente

$$T_{T_{t+\Delta t}} = T_{T_t} + \frac{Q_u - Q_{pT}}{M_T C} \Delta t$$

En lo sucesivo se plantea un sencillo método para resolver  $T_T$  anterior y para proporcionar información sobre  $T_T(t)$ . Este mismo modelo se usará para, comparando con datos experimentales, ajustar valores plausibles de  $E$ ,  $j$  y  $K_T$ .

Mediante el modelo anterior puede estudiarse un sistema solar con la configuración de la figura siguiente, donde

$T_{amb}$ temperatura ambiente	$T_1$ temperatura de entrada al captador
$T_T$ temperatura del tanque	$T_2$ temperatura de salida del captador
$T_c$ temperatura del captador	$A_c$ área de captación
	$\dot{m}$ flujo másico



Sistema de calentamiento de agua por energía solar

### 3.9 Programa de computadora

El modelo matemático descrito anteriormente es resuelto mediante un programa de computadora. El lenguaje que se utiliza es Basic. Un listado típico se describe a continuación:

10 - 160\* se indican las condiciones de trabajo del sistema.

170 - 220 se calcula la longitud del día. Nótese que existen algunas variables que sólo sirven para la realización de operaciones que la computadora no puede ejecutar directamente.

290 - 540 se evalúa la radiación total en un plano inclinado.

580 - 700 se calcula la energía solar absorbida por el captador.

720 - 840 se realizan iteraciones para calcular las pérdidas del captador y del tanque, y de esta forma se determinan las temperaturas del tanque y del captador.

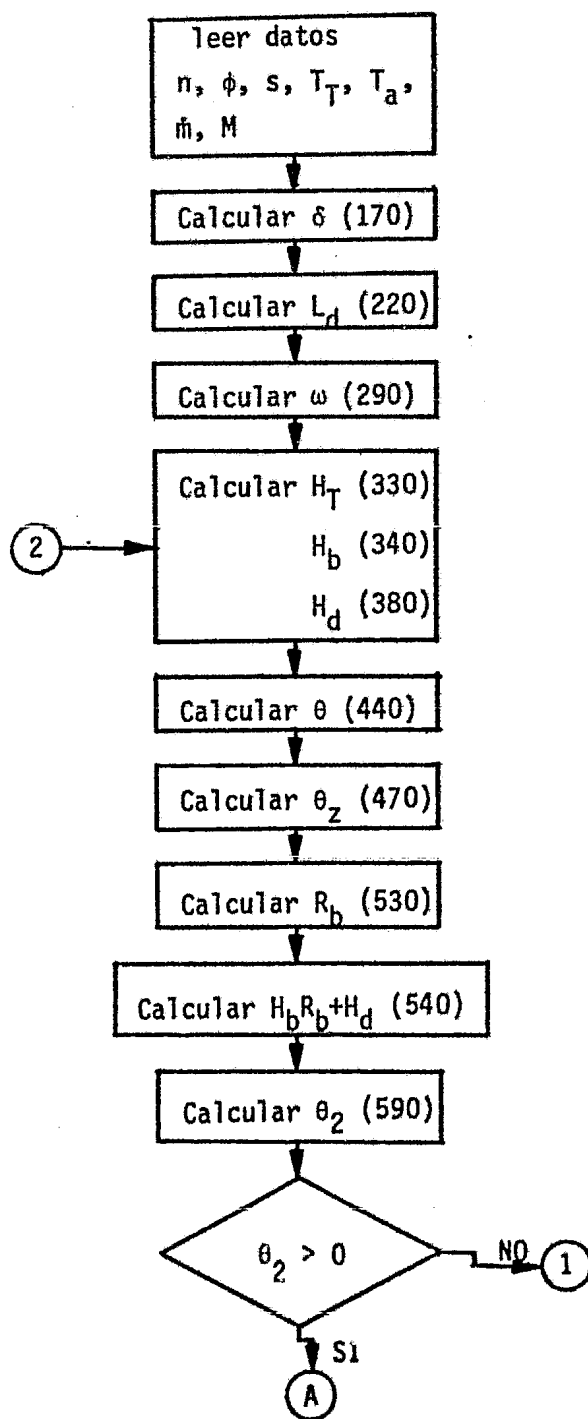
880 - 940 se estima la temperatura del tanque durante el periodo en que no existe radiación solar (noche).

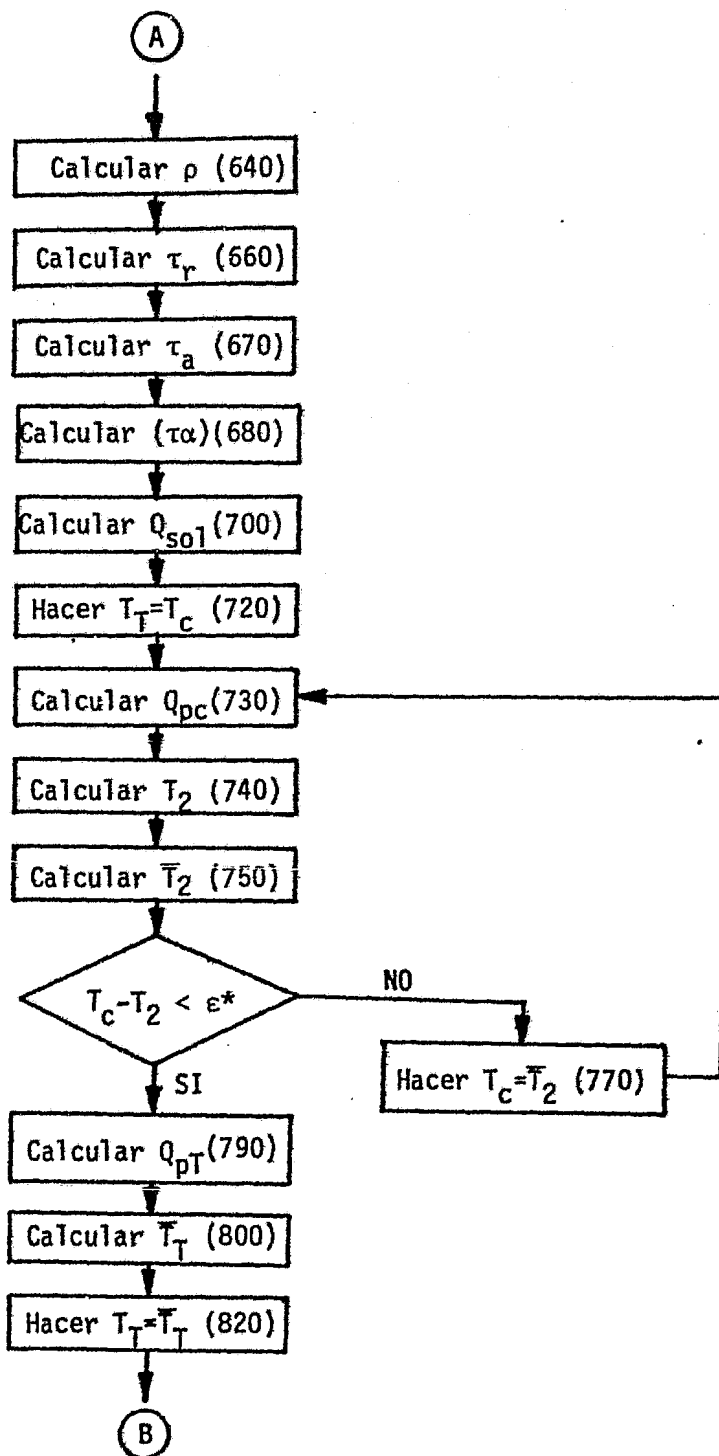
En las siguientes páginas se incluye el diagrama de bloques, una copia del listado del programa y de los resultados que el mismo produce, como son: hora, radiación, temperatura del captador y temperatura del tanque.

---

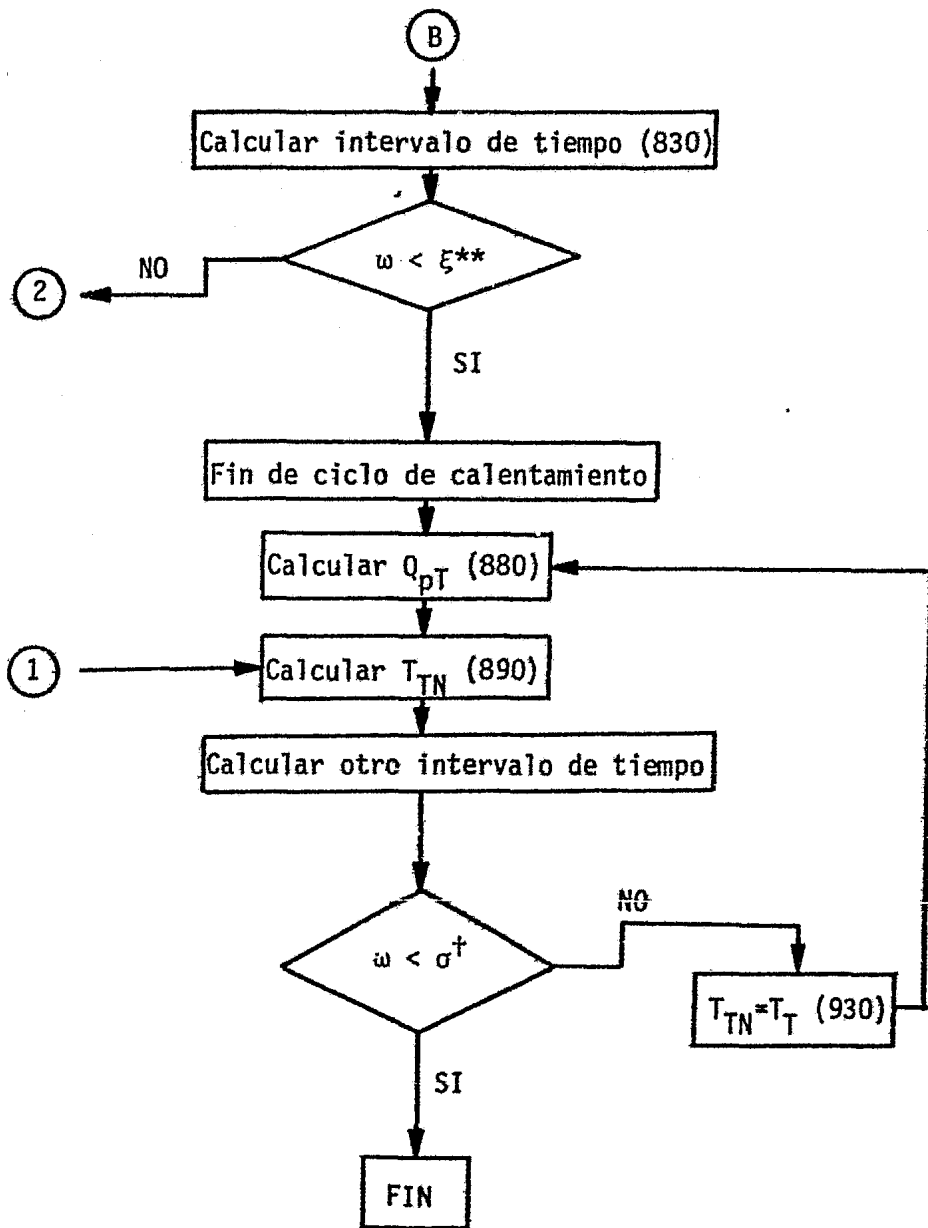
\*Nota: Estos números se refieren al número de las declaraciones del listado de computadora.

Diagrama de bloques del programa de cómputo.  
Los números en los paréntesis a la derecha de cada instrucción corresponden a la declaración del programa.





\*Nota: En este estudio se hizo  $\epsilon = 0.05$



\*\*Nota: En este estudio se hizo  $\xi = 1.5709$

† Nota: En este estudio se hizo  $\sigma = 4.7123$

## 3.10 Listados de computadora

```

10 REM RAD
20 REM FIXED 7
30 PRINT DATES:PRINT
40 REM +++CALENTADOR SOLAR CON BOMBA+++
50 REM BASIC RADIO SHACK TRSDOS MODELO II
60 NO=155
70 F1=19.54.01745329
80 D1=14.031.01745329
90 G0=0
100 REM
110 REM
120 REM
130 C0=C0
140 C0=14
150 NO=0.129
160 M1=200
170 D0=23.45*(SIN((360/365)*(C0+NO)))+D2=0.391176
180 X1=-((TAN(P1))*(TAN(D2)))
190 L9=(ATN(COR(1-X1+2)/X1))
200 IF L9>0 THEN 220
210 L0=(1.047.1416)*57.2957
220 L0=(2/15)*L9
230 I PRINT "LD=";L0;"DIA DEL AÑO=";NO
240 I PRINT
250 I PRINT
260 I PRINT "HORA          RADIACION          T CAPT          T TANQUE"
270 I PRINT
280 I PRINT
290 NO=3.00050*154.01745329
300 LET Y0=COS(12*NO/10)
310 IF Y0=0 THEN 330
320 GOTO 360
330 H1=0.9*(COS(12*NO/L0))+1.2
340 H0=0.6*(COS(12*NO/L0))+1.5
350 GOTO 380
360 H1=0
370 H0=0
380 H3=H1-H0
390 Y3=SIN(D2)*SIN(F1)*COS(S1)-SIN(D2)*COS(F1)*SIN(S1)*COS(G0)
400 X4=COS(D2)*COS(F1)*COS(S1)*COS(G0)
410 Y5=COS(D2)*SIN(F1)*SIN(S1)*COS(D0)*COS(G0)
420 X5=COS(D2)*SIN(F1)*SIN(S1)*SIN(G0)*SIN(G0)
430 Y7=Y3+X4+Y5+X6
440 T0=ATN(COR(1-Y7+X7))
450 REM TO IS THETA, G1 IS THETA 7
460 S1=SIN(D0)*SIN(F1)+COS(D0)*COS(F1)*COS(G0)
470 C1=ATN(COR(1-X1+2)/X1)
480 IF C1=0 THEN 500
490 G1=61.17.1416
500 IF C1=0 THEN 510
510 T0=T0-3.1416
520 I PRINT

```

```

530 R1=(COS(107))/(COS(61))
540 H6=H2*R1+H3
550 REM
560 REM
570 REM CALCULO DE RADIACION ABSORBIDA
580 Y1=(1/1.5)*SIN(T0)
590 T9=ATN(Y1/(SGR(1-Y1^2)))
600 IF T9>0 THEN 620
610 GOTO 690
620 Y2=T9-T0
630 Y3=T9+T0
640 R2=((SIN(Y2))^2)/((SIN(Y3))^2)+((TAN(Y2))^2)/((TAN(Y3))^2)*.5
650 REM P2 ES REFLECTANCIA, T8 ES TAU R, T7 ES TAU A
660 T8=(1-R2)/(1+R2)
670 T7=EXP(-0.32*(0.32/COS(T9)))
680 T6=(T7*T8*.93)/(1-(1-0.93)*0.16)
690 REM T6 ES TAU ALFA, Q1 ES Q SOL
700 Q1=2*T6*H6
710 REM PROCESO CALCULO TEMPERATURAS (C)
720 C3=C0
730 C2=2*3E-03*((C3-C0)+1.2)
740 C2=C0+(Q1-C2)/(4.18*0.129)
750 C5=(C0+C2)/2
760 IF (ABS(C5-C3))<0.05 THEN 790
770 C3=C5
780 GOTO 730
790 C3=2*0.0015*(C2-C0)
800 C1=(M1*C0+900*M0*(C2-C0))/(M1+900*M0)/(M1*4.18)
810 LPRINT 00/0.26179,H6,C5,C1
820 C0=C1
830 C0=C0-(0.06544)
840 IF 00<(-1.57079) THEN 860
850 GOTO 800
860 LPRINT "FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO"
870 REM EMPIEZA LA NOCHE
880 C3=2*0.0015*(C0-C0)
890 C6=C0-(900*M0)/(M1*4.18)
900 LPRINT 00/0.26179,C6
910 C0=C0-(0.06544)
920 IF 00<(-4.7123) THEN 950
930 C0=C6
940 GOTO 800
950 END

```



LD= 13.1196

DIA DEL AÑO= 155

HORA	RADIACION	T CAPT	T TANQUE
3.00063	.610377	28.0162	28.0205
2.75066	.647065	21.0005	21.0102
2.50069	.697814	22.8797	22.8604
2.25071	.720985	23.8258	24.0522
2.00074	.752159	25.0571	25.1010
1.75077	.788137	26.2141	26.344
1.5008	.80475	27.4017	27.5317
1.25083	.825870	28.6087	28.7378
1.00086	.843275	29.820	29.9553
.750884	.856951	31.0524	31.1769
.500914	.866785	32.2749	32.3955
.250943	.872715	33.4883	33.6042
9.715131-04	.874706	34.6858	34.7961
-.249	.872746	35.8604	35.9742
-.498771	.866846	37.0056	37.1021
-.748943	.857043	38.1148	38.2031
-.998914	.843705	39.1817	39.2612
-1.24889	.825908	40.2002	40.2702
-1.49887	.804927	41.1645	41.2243
1.74883	.780744	42.0689	42.118
1.9988	.752302	42.9052	42.946
-2.24877	.721232	43.6774	43.7074
-2.49874	.687071	44.3716	44.3954
-2.74871	.652162	44.9865	44.9878
-2.99869	.618623	45.510	45.5063
-3.24866	.588943	45.9422	45.9374
-3.49863	.525195	46.316	46.2770
-3.7486	.477751	46.5747	46.5246
-3.99857	.432236	46.741	46.6759
-4.24854	.385101	46.8091	46.7207
-4.49851	.336622	46.7824	46.6891
1.74849	.28791	46.6572	46.5832
1.99846	.238412	46.4446	46.3925
1.24843	.19166	46.1508	46.0953
1.4984	.14524	45.7883	45.7547
1.74837	.100921	45.3711	45.375
1.99834	.0587221	44.9091	44.9574
FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO			
-6.74832	44.7066		
1.49829	41.4812		
-6.74827	41.2822		
1.24823	37.4123		
1.4982	44.1251		
1.74817	41.114		
1.74814	41.114		

-7.97812	44.852
-8.24889	43.9614
-8.49886	43.8711
-8.74883	43.781
-8.998	43.6913
-9.24797	43.6019
-9.49794	43.5127
-9.74791	43.4239
-9.99789	43.3353
-10.2479	43.247
-10.4978	43.159
-10.7478	43.0713
-10.9978	42.9839
-11.2477	42.8967
-11.4977	42.8099
-11.7477	42.7233
-11.9977	42.637
-12.2476	42.551
-12.4976	42.4652
-12.7476	42.3797
-12.9975	42.2945
-13.2475	42.2096
-13.4975	42.125
-13.7475	42.0406
-13.9974	41.9565
-14.2474	41.8727
-14.4974	41.7891
-14.7473	41.7058
-14.9973	41.6228
-15.2473	41.54
-15.4973	41.4575
-15.7472	41.3753
-15.9972	41.2934
-16.2472	41.2117
-16.4971	41.1303
-16.7471	41.0491
-16.9971	40.9682
-17.2471	40.8876
-17.497	40.8072
-17.747	40.7271
-17.997	40.6472

```

10 REM PAD
20 REM FIXED 3
30 PRINT DATE$;PRINT
40 REM ++CALENTADOR SOLAR CON BOMBA++
50 REM BASIC RADIO SHACK TRSDOS MODELO II
60 NO=147
70 F1=19.5#.01745329
80 G1=14.03#.01745329
90 GO=0
100 REM
110 REM
120 REM
130 CO=00
140 CO=10
150 MO=0.182
160 MI=000
170 D2=23.45*(SIN((360/365)*(204+NO))) +DC=1.40741
180 X1=(TAN(F1))*(TAN(D2))
190 L9=(ATN(COS(1-X1^2)/X1))
200 IF L9=0 THEN 220
210 L9=(1.5708-ABS(L9))
220 L9=(2/15)*L9
230 LPRINT "LD=";L9;"DIA DEL AÑO=";NO
240 LPRINT
250 LPRINT
260 LPRINT " HORA          RADIACION          T CAPT          T TANQUE"
270 LPRINT
280 LPRINT
290 GO=2.75044*15#.01745329
300 LET Y8=COS(12*GO/10)
310 IF Y8=0 THEN 370
320 GOTO 340
330 H1=0.5*(COS(12*GO/10)) +1.2
340 H2=0.4*(COS(12*GO/10)) +1.5
350 GOTO 380
360 H3=0
370 H3=H1-H2
380 Y1=SIN(D2)*SIN(F1)*COS(G1)+SIN(D2)*COS(G1)*SIN(F1)*COS(GO)
390 Y2=COS(D2)*COS(F1)*COS(G1)+COS(D2)*SIN(F1)*COS(GO)
400 Y3=COS(D2)*SIN(F1)*SIN(G1)*COS(GO)+SIN(D2)*SIN(G1)*COS(GO)
410 Y4=COS(D2)*SIN(F1)*SIN(G1)*SIN(GO)
420 Y5=X1*Y1+Y2*Y3
430 W1=1/SQR(1-X7^2)/X7)
440 G1 TO F1: THETA5 G1 TO THETA 7
450 G2=1.5708-ABS(W1)*COS(D2)*COS(F1)*COS(GO)
470 G1=ATN(COS(G2)/COS(F1)*X1)
480 IF G1=0 THEN 500
490 G1=1.5708-ABS(G1)
510 TO T=1.5708-ABS(G1)

```

```

520 H2=0
530 R1=(COS(T0))/(COS(G1))
540 H2=H2*PI*H13
550 REM
560 REM
570 REM CALCULO DE RADIACION ABSORBIDA
580 Y1=(1/1.5)*SIN(T0)
590 T9=ATN(Y1/(SQR(1-Y1^2)))
600 IF T9>0 THEN 620

610 GOTO 890
620 Y2=PI/3
630 Y3=T9+T0
640 R2=((SIN(Y2))^2)/((SIN(Y3))^2)+((TAN(Y2))^2)/((TAN(Y3))^2)*.5
650 REM R2 ES REFLECTANCIA, T8 ES TAU R, T7 ES TAU A
660 T8=(1-R2)/(1+R2)
670 T7=EXP(-0.32*(0.32/COS(T9)))
680 T6=(T7*T8*.93)/(1-(1-0.93)*0.14)
690 REM T6 ES TAU ALFA, G1 ES O SOL
700 G1=ATN(H1)
710 REM PROCESO CALCULO TEMPERATURAS (C)
720 C3=C0
730 C2=C1*.93*((C3-C0)+1.2)
740 C2=C1*(C1-C2)/(4.18*.112)
750 C5=(C0+C2)/2
760 IF (ABS(C5-C3))<0.05 THEN 790
770 C3=C5
780 GOTO 730
790 C3=C3*.0015*(C2-C0)
800 C1=(11*C0+930)*C3/(11+930*C3/(11+.18))
810 LPRINT "0.06170, H6, C5, C1"
820 C0=C1
830 C0=C0-(0.04544)
840 IF C0<(-1.57070) THEN 850
850 GOTO 730
860 LPRINT "FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO"
870 REM FINITE LA NOCHE
880 C3=C0*.0015*(C0-C0)
890 C4=C0*(C0+C3)/(11+.18)
900 LPRINT "0.06170, H6, C4"
910 C0=C0-(0.04544)
920 IF C0<(-1.57070) THEN 930
930 C0=C0
940 GOTO 860
950 END

```

L.D= 13.1727

DIA DEL AÑO= 167

HORA	RADIACION	T CAPT	T TANQUE
2.75065	.649374	20.5968	20.9479
2.50073	.686023	21.5791	21.9409
2.25071	.717911	22.6105	22.9762
2.00073	.750022	23.6041	24.0002
1.75074	.778564	24.7929	25.2022
1.50079	.802962	25.9709	26.3468
1.25082	.823057	27.0000	27.5090
1.00085	.84115	28.2602	28.6041
.75087	.854706	29.4705	29.8126
.50090	.864452	30.6186	31.0103
.250935	.87033	31.7906	32.2043
0.63547E-114	.872303	32.9487	33.2576
-0.249008	.87036	34.086	34.4796
-0.498979	.864513	35.1959	35.5756
-0.748951	.854796	36.2710	36.6353
-0.998922	.841269	37.3074	37.6523
-1.24889	.824014	38.2967	38.6207
-1.49886	.803137	39.2337	39.5348
-1.74884	.778765	40.1199	40.389
-1.99881	.751049	40.9288	41.1781
-2.24878	.72016	41.6765	41.8971
-2.49875	.686295	42.3511	42.5413
-2.74872	.649766	42.9481	43.1055
-2.99869	.610511	43.4674	43.5803
-3.24866	.569636	43.893	43.9834
-3.49864	.525659	44.2336	44.2803
-3.74861	.480557	44.4022	44.5003
-3.99858	.434072	44.6764	44.7174
-4.24855	.386558	44.6946	44.6307
-4.49852	.338387	44.6573	44.5739
-4.74849	.289261	44.525	44.7050
-4.99847	.241732	44.3022	44.1388
-5.24844	.194191	43.9045	43.8000
-5.49841	.147949	43.5191	43.4003
-5.74838	.103731	43.1566	42.9485
-5.99835	.0625728	42.7156	42.4686
FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO			
6.24832	0.0230		
6.49829	0.0000		
6.74827	0.0000		
6.99824	0.0000		
7.24821	0.0000		
7.49818	0.0000		
7.74815	0.0000		
7.99812	0.0000		
8.24809	0.0000		

-8.49807	41.4987
-8.74804	41.4035
-8.99801	41.3085
-9.24798	41.2136
-9.49795	41.1195
-9.74792	41.0254
-9.99789	40.9317
-10.2479	40.8383
-10.4978	40.7451
-10.7478	40.6523
-10.9978	40.5597
-11.2477	40.4675
-11.4977	40.3756
-11.7477	40.2839
-11.9977	40.1926
-12.2476	40.1015
-12.4976	40.0108
-12.7476	39.9203
-12.9975	39.8301
-13.2475	39.7402
-13.4975	39.6506
-13.7475	39.5613
-13.9974	39.4723
-14.2474	39.3836
-14.4974	39.2952
-14.7473	39.207
-14.9973	39.1191
-15.2473	39.0316
-15.4973	38.9445
-15.7472	38.8572
-15.9972	38.7705
-16.2472	38.684
-16.4971	38.5978
-16.7471	38.5119
-16.9971	38.4263
-17.2471	38.341
-17.497	38.2559
-17.747	38.1711
-17.997	38.0866

```

10 REM RAD
20 REM FIXED 3
30 PRINT DATE$:PRINT
40 REM +++CALENTADOR SOLAR CON BOMBA+++
50 REM BASIC RADIO SHACK TRSDOS MODELO II
60 NO=168
70 FI=19.51.01745329
80 SI=14.071.01745329
90 GO=0
100 REM
110 REM
120 REM
130 CO=92
140 CR=14
150 HO=0.2016
160 HI=200
170 D2=23.45*(SIN((360/365)*(284+NO))) : D2=0.40817
180 X1=-TAN(FI)*TAN(D2)
190 L9=(ATN(COS(1-0.142)*X1))
200 IF L9=0 THEN 220
210 L9=(L9+3.1416)*57.2957
220 L2=(2/19)*L9
230 LPRINT "LD=";L9;"DIA DEL AÑO=";NO
240 LPRINT
250 LPRINT
260 LPRINT " * HORA          RADIACION          F CAPT          T TANQUE *
270 LPRINT
280 LPRINT
290 GO=0.000000*151.01745329
300 LET YR=COS(12*GO/10)
310 IF YR=0 THEN 330
320 GO=93.6
330 H1=0.9*(COS(12*GO/10))11.2
340 H2=0.5*(COS(12*GO/10))11.5
350 GOTO 380
360 H1=0
370 H2=0
380 H3=H1-H2
390 Y3=SIN(D2)*SIN(H1)*COS(SI)-SIN(D2)*COS(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*COS(SI)+COS(D2)*
400 Y4=COS(D2)*COS(H1)*COS(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*COS(H1)*COS(SI)+COS(D2)*
410 Y5=COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*
420 Y6=COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*SIN(H1)*SIN(SI)+COS(D2)*
430 Y7=X1*Y4+Y5+Y6
440 D3=INT(COR(1-Y7/10))
450 REM IN EN THETA 01 10 THETA 2
460 G1=INT((D3*360)/10)
470 G2=INT((D3*360)/10)
480 IF G1=0 THEN 500
490 G1=11.25
500 G2=11.25
510 G3=11.25
520 G4=11.25
530 G5=11.25

```

```

530 R1=(COS(T0))/(COS(G1))
540 H6=H2XR1+H3
550 REM
560 REM
570 REM CALCULO DE RADIACION ABSORBIDA
580 Y1=(1/1.5)*SIN(T0)
590 T9=ATN(Y1/(SQR(1-Y1^2)))
600 IF T9>0 THEN 620
610 GOTO 890
620 Y2=T9-T0
630 Y3=T9+T0
640 R2=((SIN(Y2))^2)/((SIN(Y3))^2)+((TAN(Y2))^2)/((TAN(Y3))^2)*.5
650 REM R2 ES REFLECTANCIA, T6 ES TAU B, T7 ES TAU A
660 T0=(1-R2)/(1+R2)
670 T7=EXP(-0.33*(0.72/COS(T9)))
680 T6=(T7*T0*.93)/(1-(1-0.93)*0.16)
690 REM T6 ES TAU ALFA, G1 ES G SOL
700 G1=2*TX*HG
710 REM PROCESO CALCULO TEMPERATURAS (C)
720 C3=C0
730 C2=2*XF-C3*((C3-C0)+1.2)
740 C3=C0*(G1-C2)/(4.18*0.7016)
750 C5=(C0+C2)/2
760 IF (ABS(C5-C3))>0.05 THEN 750
770 C3=C5
780 GOTO 730
790 C3=2*0.0015*(C1-C2)
800 C1=(M1*C0+920*M0*(C2-C3))/(M1+900+C3*(M1*4.18))
810 IPRINT 00/0.26179,H6,C5,C1
820 C0=C1
830 C0=C0-(0.06544)
840 IF C0<(-1.57079) THEN 860
850 GOTO 800
860 IPRINT "FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO"
870 REM EMPIEZA LA NOCHE
880 C3=2*0.0015*(C0-C1)
890 C1=C0-(920*(C3)/M1*4.18)
900 IPRINT 00/0.26179,C0
910 C0=C0-(0.06544)
920 IF C0<(-4.7123) THEN 940
930 C0=C0
940 GOTO 880
950 END

```



ID= 13.1746

DIA DEL AÑO= 140

HORA	RASTRO	T CAPT	T TANQUE
.500818	.855374	23.7533	23.8271
.250847	.870248	24.0862	24.657
0.752631 04	.87320	25.405	25.2700
-0.245884	.870274	26.7010	27.2555
-1.499060	.874429	27.9722	28.5000
-1.749039	.854714	29.2070	29.7051
-1.99701	.84117	30.4019	31.0076
-1.24898	.827070	31.5405	32.0198
-1.49895	.803067	32.6417	33.086
-1.74892	.778701	33.7077	34.0985
-1.9989	.758920	34.745	35.0001
-2.24887	.720117	35.5454	35.8937
-2.49884	.682255	36.3471	36.4025
-2.74881	.644376	37.1144	37.2001
-2.99878	.610471	37.7761	38.0124
-3.24875	.569874	38.3500	38.5456
-3.49872	.525669	38.8310	38.9867
3.7487	.480549	39.200	39.7010
3.99867	.434025	39.5143	39.59
4.24864	.386590	39.7090	39.7090
4.49861	.338431	39.8341	39.7811
-4.74858	.290317	39.8890	39.7310
-4.99855	.241795	39.7083	39.6017
-5.24853	.194268	39.5274	39.3846
-5.4985	.148027	39.2717	39.0905
-5.74847	.103813	38.9564	38.7106
-5.99844	.0626540	38.6011	38.3922
FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO			
-6.24841	.023135	38.3135	
-6.49838	.001649	38.0149	
-6.74836	.001567	38.1567	
-6.99833	.001017	38.0107	
-7.2483	.000900	38.0000	
-7.49827	.000754	37.9254	
-7.74824	.000701	37.7071	
-7.99821	.000691	37.4091	
-8.24818	.000603	37.0003	
-8.49815	.000458	36.4158	
-8.74812	.000305	35.7005	
-8.99809	.000150	34.9000	
-9.24806	.000000	34.0000	
-9.49803	.000000	33.0000	
-9.74801	.000000	32.0000	
-9.99798	.000000	31.0000	
-10.24795	.000000	30.0000	

-10.4979	37.0125
10.7479	36.9382
-10.9979	36.8641
-11.2478	36.7902
-11.4978	36.7166
-11.7478	36.6433
-11.9977	36.5701
-12.2477	36.4970
-12.4977	36.4246
-12.7477	36.3522
-12.9976	36.28
-13.2476	36.208
-13.4976	36.1363
-13.7475	36.0648
-13.9975	35.9935
-14.2475	35.9225
-14.4975	35.8517
-14.7474	35.7811
-14.9974	35.7108
-15.2474	35.6407
-15.4973	35.5708
-15.7473	35.5011
-15.9973	35.4317
-16.2473	35.3624
-16.4972	35.2935
-16.7472	35.2247
-16.9972	35.1561
-17.2471	35.0878
-17.4971	35.0197
-17.7471	34.9518
-17.9971	34.8841

```

10 REM RAD
20 REM FIXED 3
30 PRINT DATE$:PRINT
40 REM 11 CALIBRACION SOLAR CON BOMBA+14
50 REM BASIC RADIO SHACK TRSDOS MODELO II
60 NO=169
70 F1=19.5*.01745329
80 C1=14.03*.01745329
90 GO TO
100 REM
110 REM
120 REM
130 CO=20
140 CR=20
150 MO=0.0318
160 M1=200
170 DO=36.45*(SIN((240/365)*(204+MO)))+DO-0.405470
180 X1=-(TAN(F1))*TAN(DO2)
190 L0=(ATN(SQR(1-X1^2)/X1))
200 IF L0=0 THEN 220
210 L0=(1.9+3.1415)*57.2957
220 L0=(2/15)*PI
230 IPRINT "LD=";L0;"DIA DEL AÑO=";MO
240 IPRINT
250 IPRINT
260 IPRINT " HORA           RADIACION           T CAPT           T TARRUE"
270 LPRINT
280 IPRINT
290 CO=2.00064*15*.01745329
300 LET Y8=COS(12*CO/L0)
310 IF Y8>0 THEN 330
320 GOTO 560
330 H1=0.9*(COS(12*CO/L0))+1.2
340 H2=0.6*(COS(12*CO/L0))+1.5
350 GOTO 300
360 H1=0
370 H2=0
380 H3=H1-H2
390 X3=SIN(DO2)+SIN(F1)*COS(S1)-SIN(DO)*COS(F1)*SIN(C1)*COS(CO)
400 Y4=COS(DO2)*COS(F1)*COS(S1)+COS(CO)
410 Y5=COS(DO2)*SIN(F1)*SIN(S1)*COS(CO)+COS(CO)
420 Y6=COS(DO2)*SIN(S1)*SIN(CO)*SIN(CO)
430 Y7=Y3*Y4+Y5*Y6
440 TO=ATN(SQR(1-Y7^2)/Y7)
450 REM TH PA THETA 61 TH THETA 7
460 Y8=COS(DO2)*SIN(F1)*COS(DO)*COS(F1)*COS(CO)
470 C1=ATH(CO2)+Y8*PI/180
480 IF C1<0 THEN 500
490 C1=PI-3.1415
500 H1=15-0.1415
510 TO=15-0.1415
520 H2=15

```

```

530 R1=(COS(T0))/(COS(G1))
540 H2=H1*21-H3
550 REM
560 REM
570 REM CALCULO DE RADIACION ABSORBIDA
580 Y1=(1/1.5)*SIN(T0)
590 T9=ATN(Y1/(SQD(1-Y1^2)))
600 IF T9>0 THEN 600
610 GOTO 890
620 Y2=T9-T0
630 Y3=T9+T0
640 R2=((SIN(Y2))^2)/((SIN(Y3))^2)+((TAN(Y2))^2)/((TAN(Y3))^2)*K.5
650 REM R2 ES DEFLECTANCIA, T0 ES TAU R, T9 ES TAU A
660 T8=(1-R2)/(1+R2)
670 T7=TXR*(0.3)*(0.32/COS(T9))
680 T6=(T7*T8*.83)/(1-(1-0.93)*0.16)
690 REM T6 ES TAU ALFA, Q1 ES Q S01
700 Q1=2*TXR*H6
710 REM PROCESO CALCULO TEMPERATURAS (C)
720 C3=C0
730 Q2=2*TXR*0.7*(C3-C0)*1.2
740 C2=C0+(Q1-Q2)/4.1868*2310)
750 C5=(C0+C2)/2
760 IF (ABS(C5-C3))>0.05 THEN 760
770 C3=C5
780 GOTO 730
790 Q3=2*0.0015*(C2-C0)
800 C1=(M1*C0+2000*Q3+(C2-C0))/M1-2000*Q3/(M1*4.18)
810 I PRINT 00/0.26179,H6,C5,C1
820 C0=C1
830 C0=C0-(0.05544)
840 IF C0<(-1.57079) THEN 860
850 GOTO 300
860 I PRINT "FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO"
870 REM EMPIEZA LA NOCHE
880 Q3=2*0.0015*(C0-C0)
890 C4=C0-(2000*Q3)/(M1*4.18)
900 I PRINT 00/0.26179,C4
910 C0=C0-(0.05544)
920 IF C0<(-4.2123) THEN 950
930 C0=C4
940 GOTO 880
950 END

```

LD= 13.1761

DIA DEL AÑO= 169

HORA	RADIACION	T CAPT	T TANQUE
0.00071	.750741	20.5504	29.1356
1.75974	.770447	29.7119	30.7037
1.50077	.802852	30.0937	31.4574
1.7508	.823745	32.098	32.7093
1.00083	.841018	33.3172	33.9325
.750855	.854516	34.5441	35.1596
.500884	.864307	35.7717	36.3837
.250912	.870181	37.9929	37.5970
9.41006E-04	.872152	38.2077	38.7948
-.24003	.87021	39.3881	39.970
-.409002	.864366	40.5405	41.1108
-.747973	.854654	41.6754	42.2167
-.979944	.841134	42.7622	43.2794
-1.04897	.823889	43.8029	44.2929
-1.49889	.803022	44.7919	45.2513
-1.74886	.778863	45.7223	46.1492
-1.99883	.750942	46.5099	46.9812
-2.0400	.70009	47.3891	47.7404
-2.40977	.684242	48.1152	48.4281
-2.74874	.649472	48.7635	49.0378
-2.99872	.610407	49.3297	49.5555
3.04069	.569091	49.8101	49.9895
3.40066	.525694	50.201	50.3324
3.74863	.480603	50.4994	50.5816
3.9986	.434139	50.7028	50.7349
4.21857	.387645	50.8097	50.7912
4.49854	.338494	50.8197	50.7514
4.74852	.290008	50.7343	50.6166
4.99849	.241872	50.5565	50.3920
5.04846	.194351	50.2930	50.0804
5.40843	.140115	49.9566	49.7167
5.7484	.107937	49.5693	49.2953
5.99837	.0827452	49.1241	48.8447
FIN DEL CICLO DE CALENTAMIENTO			
6.01075	40.7515		
6.40832	40.6506		
6.71022	40.5661		
6.99175	40.4730		
7.04023	40.4010		
7.4512	40.3000		
7.74810	40.1927		
7.99815	40.1017		
8.21812	40.017		
8.41809	39.9275		
8.74814	39.8347		

0.90003	47.7404
-9.749	47.6560
0.49797	47.5674
0.74704	47.4784
0.99702	47.3897
-10.2477	47.3012
-10.4979	47.2118
-10.7479	47.1251
-10.9978	47.0375
11.2478	46.9502
-11.4977	46.8632
11.7477	46.7764
-11.9977	46.6899
12.2477	46.6037
-12.4976	46.5178
-12.7475	46.4322
-12.9974	46.3468
-13.2474	46.2617
13.4974	46.1768
13.7473	46.0924
-13.9973	46.0081
14.2474	45.9241
-14.4973	45.8404
-14.7474	45.7569
14.9973	45.6737
-15.2473	45.5908
15.4973	45.5082
-15.7472	45.4257
16.0472	45.3433
-16.2972	45.2612
-16.5471	45.1792
-16.7971	45.0973
-17.0471	45.0157
17.2971	44.9342
17.547	44.8529
-17.797	44.7718

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1 Modelo físico

Un calentador solar para agua consta de tres partes principales que son:

El captador (uno o varios)

El tanque de almacenamiento

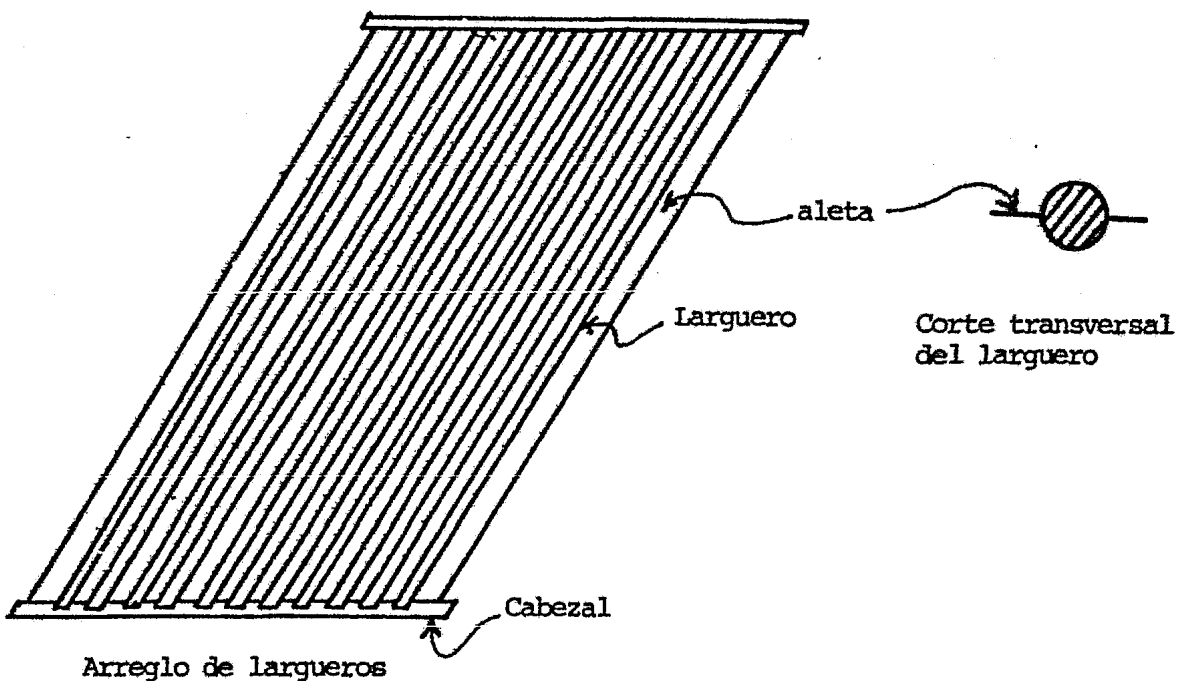
El sistema de circulación (bomba y tuberías)

Cada uno de estos componentes tiene determinadas funciones y ciertas características especiales para que la eficiencia del sistema sea alta.

A continuación se describe cada uno de los componentes y su función.

### Captador

El captador solar plano contiene, a modo de absorbedor, un arreglo de tuberías de cobre; este sistema de tubos en paralelo está limitado por dos cabezales, uno inferior y otro superior. La longitud de cada tubo (llamado larguero) es generalmente de 2 m y su diámetro nominal es de 1/2". El número de tubos largueros es de 11 y la distancia entre tubos es de 9 cm aproximadamente. Cada larguero está aletado con láminas de cobre de calibre 30 adheridos al tubo mediante soldadura de estaño (ver figura).

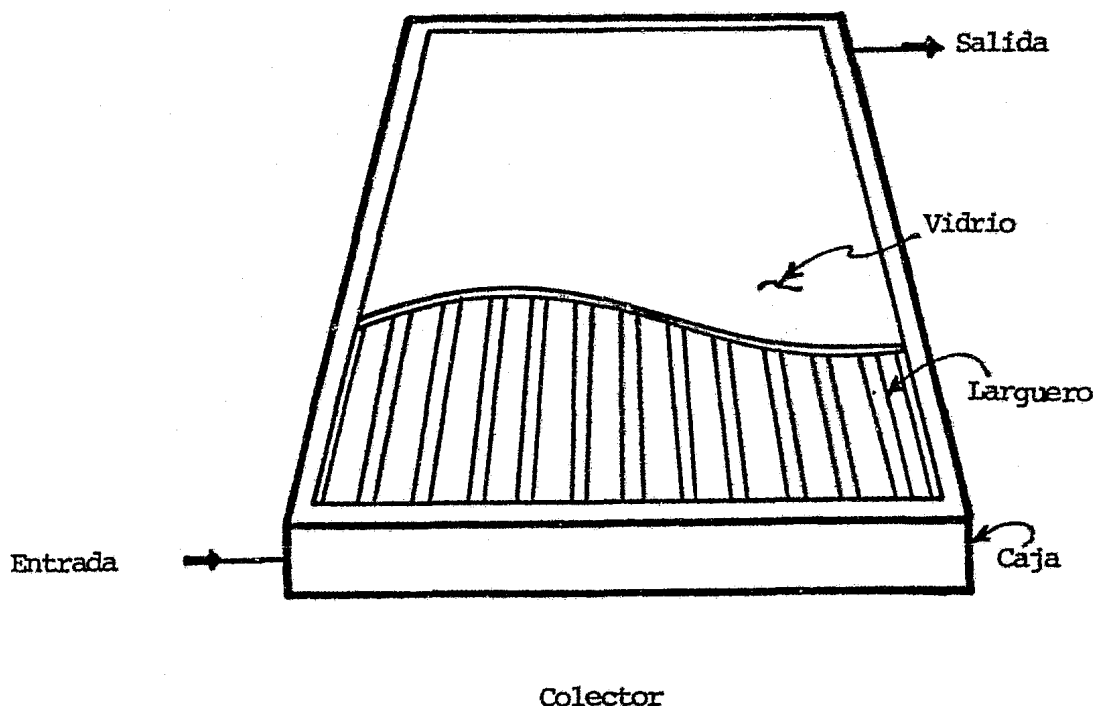


Los cabezales son de cobre con un diámetro nominal de 3/4". La unión entre los largueros y los cabezales se hace por medio de soldadura autógena.

Este arreglo de tubos con sus aletas se encierra en una caja resistente a la intemperie, aislada por la cara inferior mediante un colchón de lana in



dustrial. Por último, se tiene la tapa del captador que consiste en una cubierta transparente (vidrio) con lo cual se obtiene el efecto de invernadero, que limita las pérdidas de calor al aire.

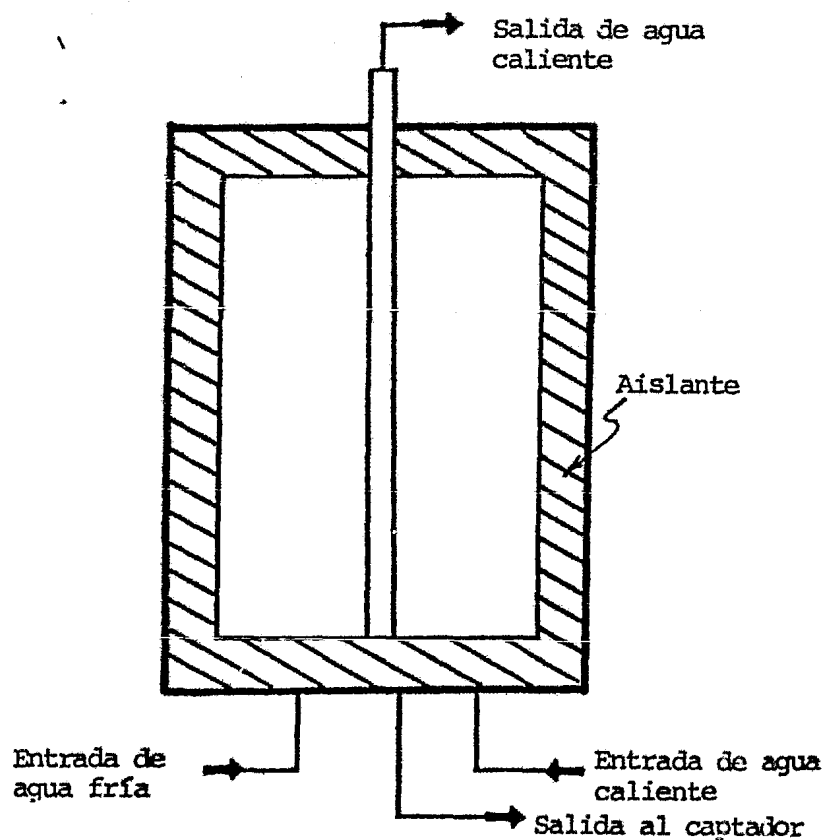


### *Tanque de almacenamiento*

La función del tanque de almacenamiento, como su nombre lo dice, es almacenar la energía del fluido absorbida en el captador. Después de pasar el fluido por el colector solar llega al tanque de almacenamiento. Debido al proceso de convección natural, el agua más caliente permanece en la parte superior del tanque mientras que la más fría se mantiene en la parte inferior. Esta agua fría es la primera en entrar al captador, y así sucesivamente.

El tanque con el cual se realizó este estudio experimental es un tanque de material de fierro, de capacidad de 200 lts, aislado mediante lana industrial con un alambrado externo para conservar su forma y para que no se desprenda. El espesor de este aislamiento es aproximadamente de 7 cm.

La pérdida de calor que sufre el fluido en el tiempo que no hay radiación (en la noche) resulta aproximadamente en una variación de 3 a 4°C. Esquemáticamente se ilustra a continuación el arreglo de conexiones al tanque térmico.



#### *Sistema de circulación*

El sistema de circulación está compuesto por la tubería y la bomba.

La tubería es de un diámetro nominal de 3/4" de pulgada de fierro galvani-

zado y debe estar aislada térmicamente.

Para darle circulación al fluido se utiliza una bomba de desplazamiento positivo, en la cual se controla el gasto en un partidador de flujo.

Esquemáticamente, los 3 elementos componentes que forman el sistema de calentador solar de agua se unen entre sí como se ilustra en la figura de la sección 3.8.

El aparato experimental analizado en el trabajo que aquí se reporta se ilustra en las fotografías de la página siguiente. Ahí se pueden apreciar el captador y el tanque térmico. En la parte izquierda del captador se observa la conexión de la bomba, que es de desplazamiento positivo para procurar un flujo constante de agua, provista de un partidador de flujo que permite regular ese flujo a voluntad. La bomba alimenta el agua del fondo del tanque al cabezal inferior del captador, a través de una placa de orificio que permite conocer el flujo.

La última fotografía de la serie ilustra el graficador que, alimentado por termopares de cobre-constantán, permite registrar las temperaturas que se describen adelante; al mismo graficador se conectan las puntas del piranómetro que también se aprecia en las fotografías anteriores.

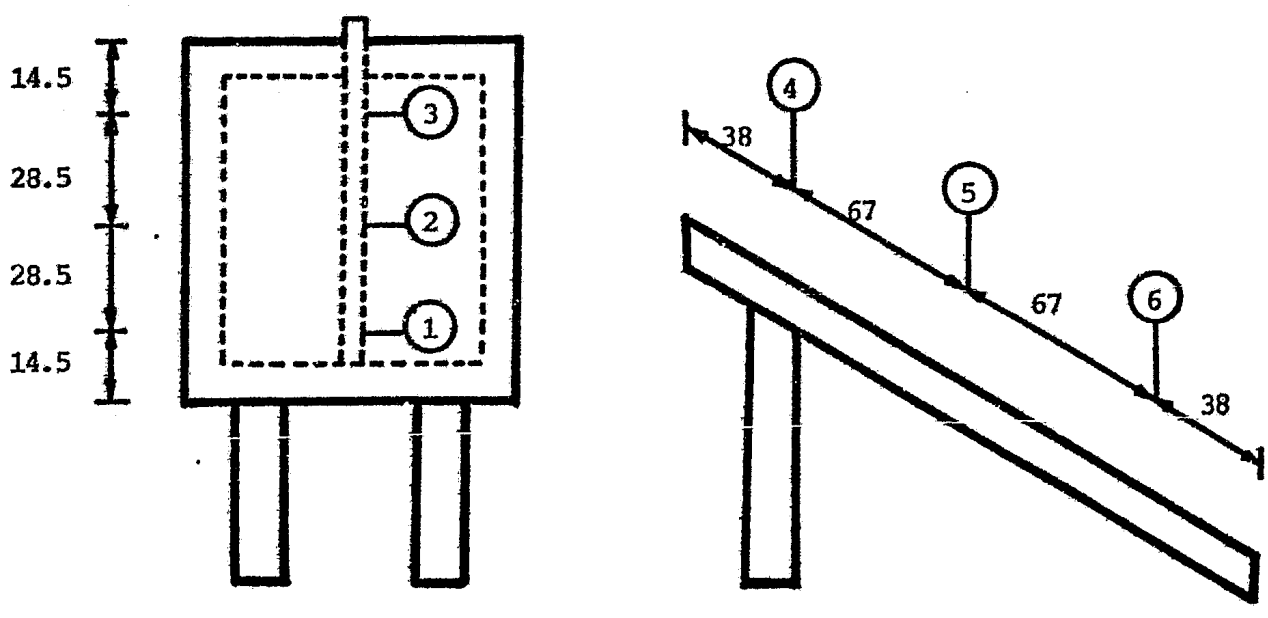
#### 4.2 Descripción de los aparatos de medición

Las mediciones de temperatura efectuadas a lo largo de este estudio fueron hechas mediante termopares de cobre constantán, de calibre 30. Estos termo

pares fueron conectados, por un lado, a una "punta fría" o punto de temperatura de referencia, consistente en un delgado tubo de vidrio conteniendo aceite, sumergido en un recipiente térmico que contenía una mezcla de hielo picado y agua. Así, esta punta se encuentra a 0°C. La otra punta del termopar se conectaba al graficador. La posición de los termopares en el aparato experimental se muestra en la figura de la página que sigue.

El graficador empleado es un SOLTEC de 24 canales que imprime, en forma secuencial, la diferencia de potencial entre cada par de hilos correspondiente a cada termopar. Dado que los datos registrados se obtienen en milivolts, se convirtieron a unidades de temperatura con ayuda de la curva de calibración, elaborada en este trabajo con auxilio de un termómetro de mercurio en vidrio, que se muestra adelante. Esta curva se elaboró comparando las lecturas de los termopares y del termómetro en un vaso de aceite, aislado térmicamente y agitado continuamente. Se considera que la precisión de las temperaturas medidas es mejor a 1°C.

Las mediciones del flujo de agua se hicieron indirectamente, leyendo la caída de presión a través de una placa de orificio. Esta placa de orificio tenía un diámetro menor de aproximadamente 6 mm y un avellanado a 45° y se calibró midiendo, por un lado, la diferencia de alturas de columna en un manómetro U de mercurio en vidrio, cuyas conexiones correspondían a puntos de presión estática a ambos lados de la placa de orificio, y por otro lado el flujo de agua con ayuda de un recipiente graduado y un cronómetro. Las lecturas que conducen a la correlación de la calibración aparecen en la tabla siguiente. Dada la buena correlación de estos resultados, y ya que el flujo se hizo constante en cada prueba, se estima que la precisión



Acot: cm

Colocación de termopares

de las mediciones del flujo másico es mejor que 0.01 kg/s. Los mismos resultados se presentan en forma gráfica en la figura que sigue a la tabla.

#### 4.3 Resultados experimentales

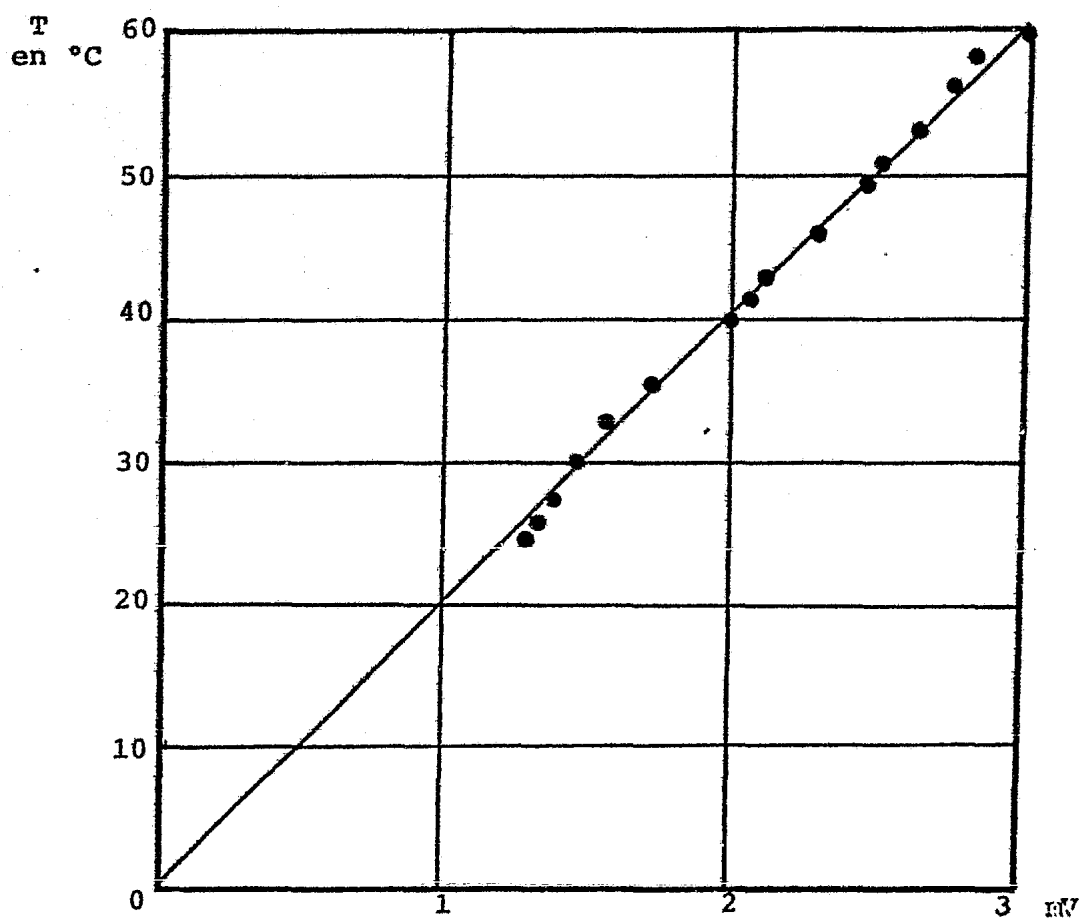
El aparato experimental, instrumentado como se relató arriba, se hizo operar repetidamente hasta que se consideró que la instalación estaba a punto. En ese periodo se hicieron numerosos cambios a los termopares y a las conexiones al graficador, y se adicionó al sistema un piranómetro marca Eppley, compensado térmicamente, conectado al mismo graficador SOLTEC.

El fabricante del piranómetro indica que la calibración es lineal ( $7.16 \text{ mV} = 697.8 \text{ W/m}^2$ ) con una precisión de  $\pm 2\%$ , pero se sospecha que esa precisión es más bien de  $\pm 5\%$ . Aunque el propósito del ejercicio es comprobar la habilidad del modelo matemático para predecir las temperaturas a partir de un modelo teórico de radiación, y por lo tanto las mediciones de radiación no tienen una función en el ejercicio, se consideró útil conservarla y reportarlas en apoyo a la capacidad predictiva del modelo.

Tras el periodo de ajuste se registraron datos para varios días, durante el mes de junio de 1982 de los cuales se reportan los correspondientes a aquellos días en que no hubo interrupción en los experimentos debidos a fallas en la electricidad o en los medidores. Estas pruebas se hicieron a gastos diversos. Las fechas de las pruebas fueron los días 4, 16, 17 y 18 de junio de 1982, en los que la radiación solar total medida indica que la nubosidad fue aparentemente homogénea. En estos días el modelo matemático debe reproducir los resultados experimentales mejor que cuando la nubosidad

Lectura del graficador (en mv)	Temperatura en el termómetro (en °C)
1.28	25
1.32	25.7
1.4	27.2
1.45	30
1.59	32.8
1.73	35
2	39.4
2.08	41
2.15	42.3
2.31	46
2.49	49.4
2.52	50
2.65	52.5
2.82	55
2.9	56.6
3	60

Calibración de termopares. Pares de valores obtenidos en el proceso de calibración.



Curva de calibración de los termopares. La recta que une los puntos experimentales, que vienen de la tabla anterior, se ajustó a ojo.



Diferencia de altura de columnas en el ma nómetro (cm Hg)	Flujo másico $\dot{m}$ (kg/seg)
---	------------------------------------

0.5	0.0873
-----	--------

1	0.129
---	-------

1.5	0.1583
-----	--------

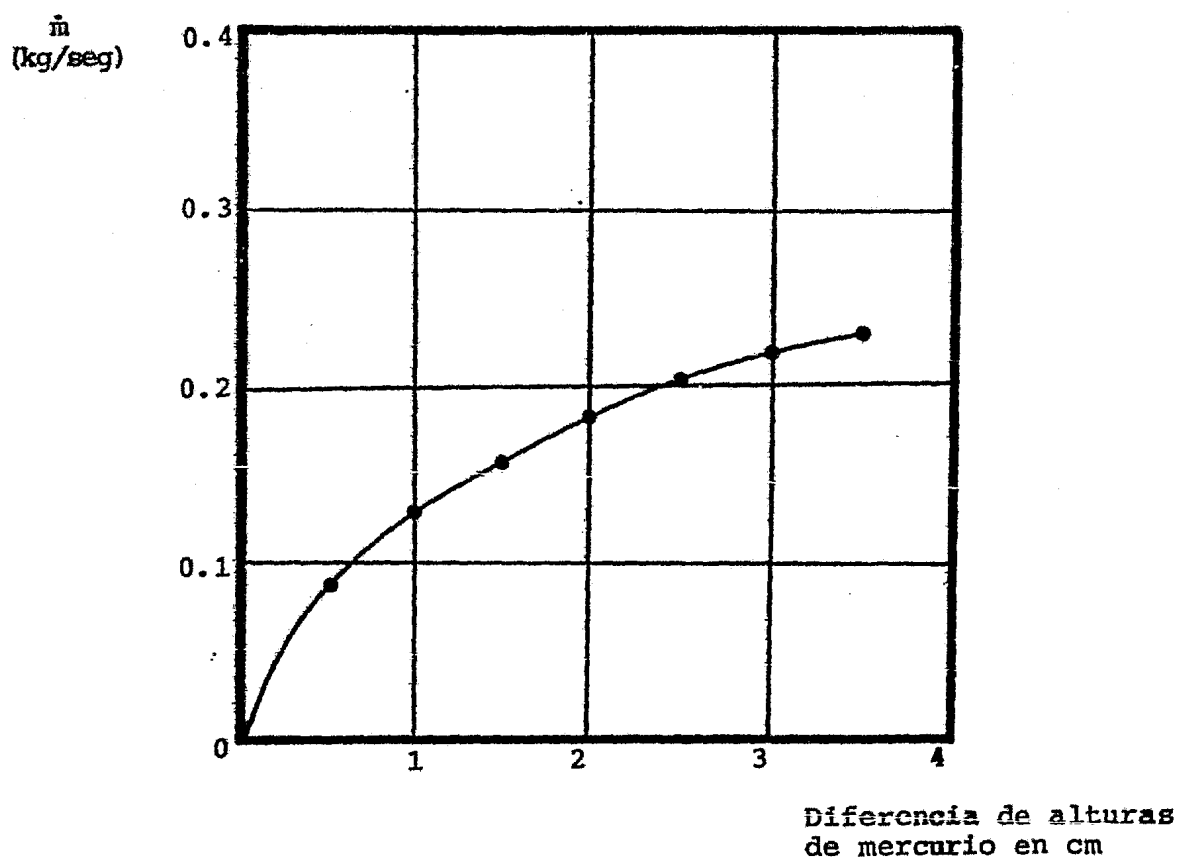
2	0.182
---	-------

2.5	0.2016
-----	--------

3	0.217
---	-------

3.5	0.2318
-----	--------

Calibración de la placa de orificio



Curva de calibración del flujo másico

varía apreciablemente a lo largo del día.

En intervalos de 15 minutos, se reportan los datos de radiación solar total, temperaturas del tanque y del captador en las tablas que aparecen a continuación. Los flujos de agua correspondientes fueron:

FECHA	$\dot{m}$ (kg/s)
Junio 4	0.13
" 16	0.18
" 17	0.20
" 18	0.23

RADIACION (kW/m<sup>2</sup>)

7.16 mv = 697.8 W/m<sup>2</sup>

1982

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	0.467			
9:15	0.5162	0.465		
9:30	0.545	0.526		
9:45	0.599	0.531		
10:00	0.654	0.578		0.671
10:15	0.613	0.531		0.684
10:30	0.677	0.432		0.696
10:45	0.634	0.492		0.734
11:00	0.744	0.499		0.687
11:15	0.807	0.510		0.648
11:30	0.788	0.7025	0.729	0.661
11:45	0.754	0.739	0.753	0.796
12:00	0.769	0.746	0.734	0.836
12:15	0.764	0.807	0.758	0.876
12:30	0.797	0.702	0.778	0.841
12:45	0.828	0.720	0.846	0.881
13:00	0.887	0.692	0.845	0.873
13:15	0.865	0.689	0.853	0.846
13:30	0.875	0.797	0.827	0.827
13:45	0.841	0.768	0.827	0.803
14:00	0.797	0.770	0.788	0.788
14:15	0.796	0.740	0.737	0.758
14:30	0.750	0.720	0.700	0.701
14:45	0.710	0.707	0.695	0.684
15:00	0.690	0.661	0.660	0.638
15:15	0.598	0.663	0.584	0.610
15:30	0.583	0.656	0.627	0.569
15:45	0.556	0.557	0.552	0.519

## RADIACION (continuación)

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
16:00	0.515	0.486	0.494	0.467
16:15	0.447		0.467	
16:30	0.403		0.398	
16:45	0.333		0.361	
17:00	0.147		0.244	

TEMPERATURA # 1 (°C)		PARTE INFERIOR DEL TANQUE			
HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18	
9:00	18.7				
9:15	19.68	19.68			
9:30	22.04	20.66			
9:45	23.22	21.45			
10:00	23.41	21.84		27.70	
10:15	24.0	22.23		29.47	
10:30	25.37	22.82		29.86	
10:45	25.98	23.60		31.49	
11:00	27.35	23.79		32.61	
11:15	28.09	24.37		33.40	
11:30	29.46	25.94	21.64	34.20	
11:45	30.48	27.51	22.63	34.79	
12:00	31.62	27.903	24.0	35.97	
12:15	33.99	29.46	25.58	37.36	
12:30	33.97	29.46	26.56	37.55	
12:45	35.34	29.86	27.74	38.93	
13:00	36.32	31.04	28.73	39.52	
13:15	37.11	31.43	29.52	40.51	
13:30	38.48	32.60	29.7	41.50	
13:45	39.26	33.78	30.68	42.09	
14:00	40.44	34.57	33.43	42.88	
14:15	41.42	35.35	33.83	43.48	
14:30	42.21	36.53	35.40	44.66	
14:45	43.19	37.32	36.19	45.46	
15:00	43.58	38.69	37.37	44.66	
15:15	44.17	39.28	38.55	45.45	
15:30	44.76	39.48	40.32	45.84	
15:45	45.16	39.87	41.30	45.45	
16:00	45.35	40.26	41.50	45.84	
16:15	45.35		41.69		
16:30	45.55		41.69		
16:45	45.74		42.48		
17:00	46.14		42.68		

## TEMPERATURA # 2 (°C) PARTE CENTRAL DEL TANQUE

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	19.68			
9:15	22.63	21.45		
9:30	22.63	21.84		
9:45	23.61	22.63		
10:00	24.59	23.61		29.51
10:15	25.58	24.59		30.69
10:30	26.95	25.38		31.47
10:45	27.74	25.77		32.65
11:00	29.32	26.56		34.03
11:15	30.50	27.54		35.41
11:30	31.48	28.52	22.63	35.80
11:45	32.86	29.51	23.61	37.37
12:00	34.04	30.88	25.38	39.14
12:15	35.42	31.67	26.95	39.54
12:30	36.79	33.44	27.93	41.31
12:45	37.97	34.23	29.51	42.29
13:00	39.35	35.41	30.69	43.47
13:15	40.93	36.39	31.87	44.85
13:30	41.71	37.38	33.44	45.64
13:45	43.29	39.34	35.21	47.01
14:00	43.88	40.33	36.0	47.41
14:15	43.88	41.31	37.38	48.39
14:30	44.83	42.49	39.34	49.79
15:00	46.16	44.26	41.31	51.38
15:15	47.31	45.24	41.90	51.78
15:30	47.69	45.44	42.69	52.18
15:45	47.88	45.64	43.28	52.57
16:00	48.07	46.03	43.67	52.97
16:15	48.26		44.26	
16:30	48.84		44.85	
16:45	49.22		45.05	
17:00	49.03		45.25	

## TEMPERATURA # 3 (°C) PARTE SUPERIOR DEL TANQUE

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	23.22			
9:15	23.28			
9:30	23.81			
9:45	24.0			
10:00	25.58			
10:15	26.17			
10:30	27.74			
10:45	28.53			
11:00	29.52			
11:15	31.48			
11:30	32.60			
11:45	33.64			
12:00	35.41			
12:15	36.39			
12:30	37.57			
12:45	39.34			
13:00	40.92			
13:15	41.3			
13:30	43.28			
13:45	43.48			
14:00	45.25			
14:15	45.84			
14:30	46.23			
14:45	47.22			
15:00	47.61			
15:15	48.79			
15:30	49.19			
15:45	49.38			
16:00	51.15			
16:15	51.15			
16:30	50.37			
16:45	50.76			
17:00	50.56			



## TEMPERATURA # 4 (°C) PARTE SUPERIOR DEL CAPTADOR

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	20.51			
9:15	21.37	20.51		
9:30	23.42	22.56		
9:45	24.66	22.97		
10:00	25.68	23.58		27.27
10:15	26.51	23.99		28.70
10:30	28.15	24.61		29.32
10:45	28.77	25.43		30.75
11:00	30.62	26.04		31.16
11:15	31.03	26.66		32.19
11:30	32.26	28.71	24.40	32.80
11:45	33.08	29.94	24.60	34.44
12:00	34.11	30.76	25.83	35.47
12:15	35.34	31.78	26.65	36.90
12:30	36.99	32.81	27.88	37.52
12:45	37.81	33.22	28.70	38.75
13:00	39.04	34.04	30.14	40.18
13:15	40.28	34.86	30.75	41.00
13:30	41.103	36.30	32.19	41.41
13:45	41.51	36.91	32.80	42.23
14:00	42.74	37.73	34.24	42.44
14:15	43.76	38.76	34.85	43.05
14:30	43.56	38.96	35.26	43.67
14:45	44.18	39.99	35.47	44.08
15:00	44.39	40.81	36.08	44.49
15:15	45.21	41.01	36.90	44.90
15:30	45.21	41.01	37.31	41.10
15:45	47.26	41.01	38.13	45.10
16:00	46.03	31.01	38.13	45.10
16:15	45.21		38.34	
16:30	45.00		38.34	
16:45	43.97		38.34	
17:00	43.36		38.13	

## TEMPERATURA #5 (°C) CENTRO DEL CAPTADOR

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	19.48			
9:15	20.51	19.06		
9:30	22.35	20.50		
9:45	22.56	19.68		
10:00	23.58	20.50		26.85
10:15	23.99	20.10		27.88
10:30	24.81	21.64		28.7
10:45	25.01	23.37		29.72
11:00	26.65	22.55		30.75
11:15	28.08	23.37		31.16
11:30	28.90	24.80	22.55	32.185
11:45	29.93	24.80	23.165	33.41
12:00	30.75	26.02	24.6	34.44
12:15	31.77	26.84	25.42	35.26
12:30	32.8	27.87	26.65	36.9
12:45	33.62	28.69	27.26	37.31
13:00	34.64	30.94	28.7	38.54
13:15	35.46	32.58	29.31	39.155
13:30	36.9	33.20	30.75	39.97
13:45	37.10	34.84	30.95	41.0
14:00	37.92	35.86	32.18	41.0
14:15	38.33	36.89	33.21	41.41
14:30	38.95	37.30	34.03	41.82
14:45	39.15	37.91	35.26	42.84
15:00	39.36	38.73	35.87	43.05
15:15	39.36	38.93	36.49	43.46
15:30	41.0	38.93	37.10	43.46
15:45	40.38	38.93	37.31	43.25
16:00	39.77	38.93	37.41	43.05
16:15	39.36		37.51	
16:30	38.95		37.30	
16:45	38.74		37.30	
17:00	38.33		37.50	

## TEMPERATURA # 6 (°C) PARTE INFERIOR DEL CAPTADOR

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	18.45			
9:15	19.68	19.06		
9:30	21.53	20.5		
9:45	21.94	20.91		
10:00	22.55	21.73		26.64
10:15	23.37	22.55		27.05
10:30	24.60	22.96		28.68
10:45	25.22	23.37		29.09
11:00	26.65	23.98		30.73
11:15	26.86	24.6		31.14
11:30	27.88	26.03	21.93	31.96
11:45	28.70	26.85	22.55	32.78
12:00	29.32	27.88	23.98	33.40
12:15	30.75	28.7	24.6	34.83
12:30	31.16	29.11	26.03	35.86
12:45	31.98	29.93	26.65	36.88
13:00	32.80	30.75	28.49	37.29
13:15	33.00	31.16	29.11	38.11
13:30	34.24	31.98	30.75	38.93
13:45	34.60	34.03	30.95	39.96
14:00	32.80	34.85	32.18	39.96
14:15	35.83	35.26	33.21	40.98
14:30	36.65	36.08	34.03	40.98
14:45	36.85	36.9	35.26	41.39
15:00	37.26	37.31	35.87	42.0
15:15	37.47	36.9	36.49	42.41
15:30	37.47	37.50	37.10	42.82
15:45	38.08	37.71	37.31	43.03
16:00	37.88	37.71	37.41	43.03
16:15	37.47		37.51	
16:30	37.06		37.31	
16:45	36.85		37.31	
17:00	36.65		37.10	

## TEMPERATURA # 7 (°C)      TEMPERATURA AMBIENTE

HORA	JUNIO 4	JUNIO 16	JUNIO 17	JUNIO 18
9:00	15.78			
9:15	17.42	11.47		
9:30	18.45	12.28		
9:45	18.45	14.33		
10:00	20.70	16.38		19.26
10:15	23.37	17.40		19.67
10:30	24.6	16.79		19.87
10:45	24.6	18.42		20.67
11:00	25.01	18.42		20.90
11:15	26.03	18.42		27.72
11:30	24.6	18.42	13.73	22.13
11:45	22.75	18.63	21.51	22.95
12:00	24.6	19.04	23.96	23.36
12:15	25.01	23.54	22.54	25.82
12:30	24.6	24.57	25.82	26.84
12:45	27.06	22.93	24.59	27.66
13:00	26.65	25.22	26.02	28.07
13:15	31.77	27.28	24.59	28.07
13:30	31.77	23.39	28.07	28.69
13:45	33.82	28.20	27.45	27.25
14:00	31.36	27.06	30.73	27.87
14:15	35.05	29.81	30.94	27.05
14:30	30.75	27.51	33.19	28.69
14:45	32.59	27.97	30.73	28.69
15:00	34.23	27.51	32.78	29.71
15:15	32.8	23.54	30.73	26.64
15:30	30.54	24.76	32.78	28.69
15:45	30.75	22.72	30.73	27.25
16:00	32.8	23.54	30.73	25.20
16:15	29.93		30.73	
16:30	29.93		28.68	
16:45	28.08		27.86	
17:00	26.85		26.02	

## 5. CORRELACION DE RESULTADOS

La comparación de los resultados del modelo matemático y de los experimentos en el laboratorio permitirá detectar la habilidad del modelo para predecir el fenómeno físico en estudio. Para hacer esa comparación es importante, primero, determinar los factores de pérdidas térmicas,  $E$  y  $j$ , correspondientes al captador, y el factor  $U_T$  del tanque.

El proceso de ajuste de dichos valores se hizo por aproximaciones sucesivas, esto es, se asignaron valores arbitrarios de  $E$ ,  $j$  y  $U_T$  hasta que, variándolos convenientemente, produjeron un buen ajuste a los resultados experimentales. No se intentó un procedimiento más racional para lograr ese ajuste, y se observa que hay triadas de valores que resultan en ajustes "buenos" para las temperaturas del captador y "menos buenos" para las temperaturas del tanque, al tiempo que otras triadas se comportan al revés en los ajustes. Aquí debe hacerse notar que, en este ejercicio y por sencillez, se consideró que la temperatura del ambiente era constante a lo lar-

go del día, una suposición simplificatoria que claramente introduce errores adicionales en los resultados finales.

Los resultados teóricos de radiación solar parten de la suposición de que, en todos los días de prueba,  $H_{TMAX} = 0.9 \text{ kW/m}^2$  y  $H_{bMAX} = 0.6 \text{ kW/m}^2$ , valores sugeridos por la ref 5 para los días más claros del mes de junio.

Las solas suposiciones de que la temperatura ambiente es contante y de que la radiación solar es estimable en promedios mensuales debe llevar a errores en la predicción de las temperaturas del orden de 4 a 6°C por lo menos (ref 3), por lo que no se intentó ajustes mejores, que además parece que no pueden lograrse. Así, ajustando sucesivamente los valores de los tres coeficientes de pérdidas térmicas se llegó a la triada siguiente:

$$E = 3 \times 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

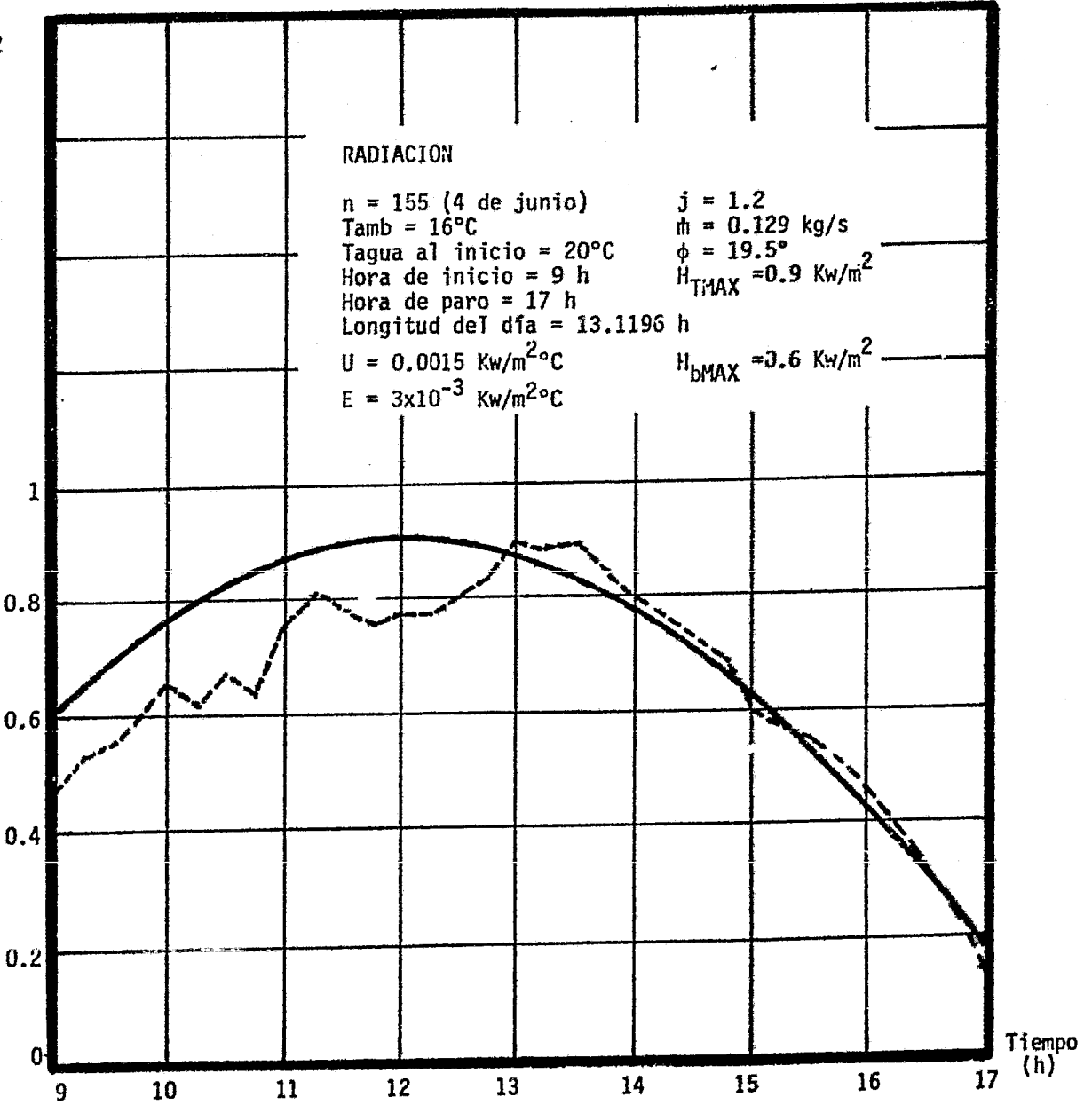
$$j = 1.2$$

$$U_T = 0.0015 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Debe adicionarse a la posible fuente de errores que la hora de las mediciones corresponde a la hora oficial, no a la hora solar verdadera. Estas condiciones simplificadorias, sin embargo, resultan en ajustes razonablemente buenos, como indican las gráficas comparativas de los resultados experimentales y teóricos de las siguientes páginas. Las simplificaciones, por otro lado, hacen más accesible el empleo de este tipo de modelos matemáticos por parte de diseñadores de equipo solar.

RADIACION  
4 de junio de 1982

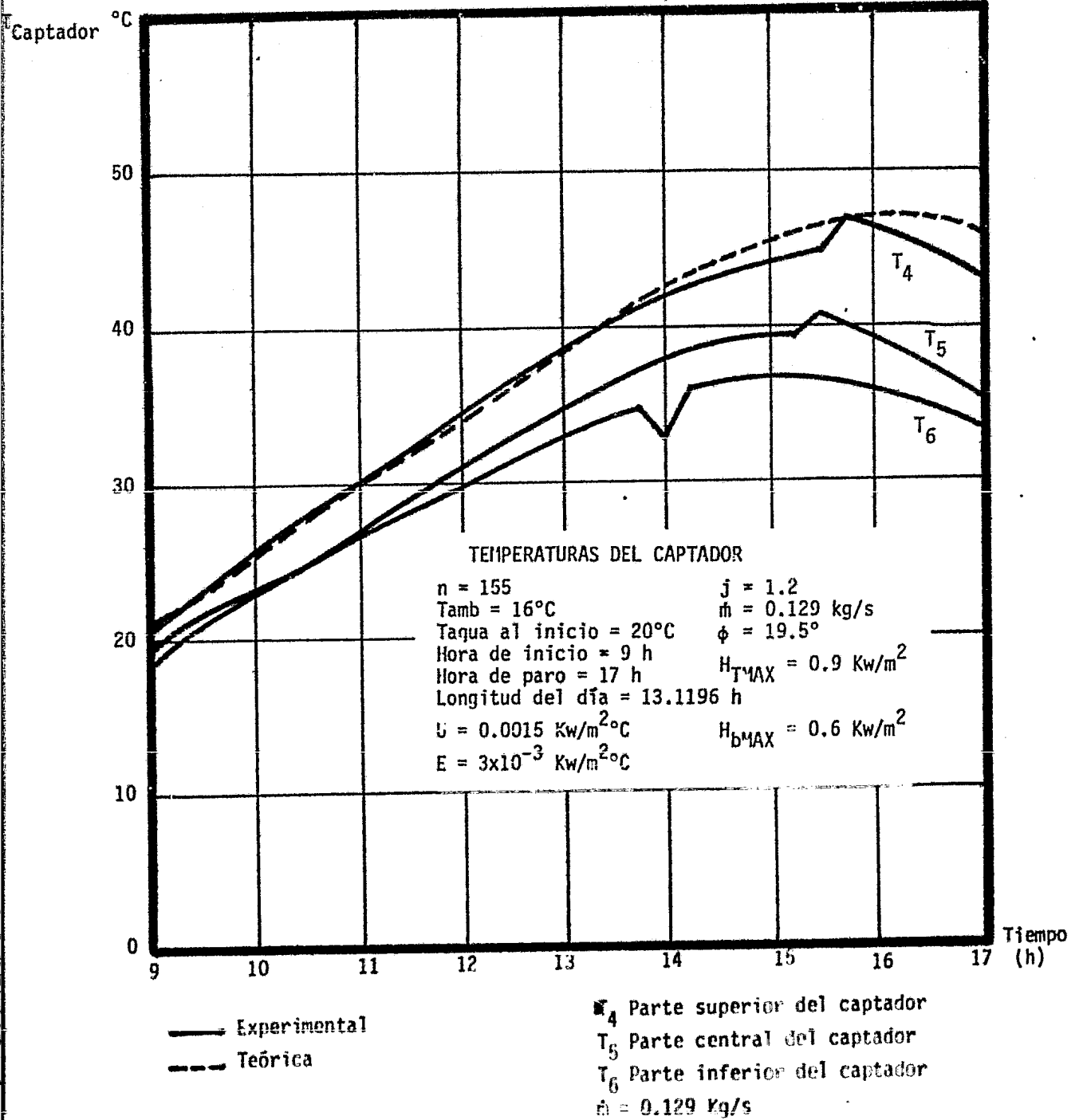
Radiación  
( $H_T$ ) Kw/m<sup>2</sup>



— Teórica  
 - - - Experimental

## TEMPERATURAS DEL CAPTADOR

4 de junio de 1982

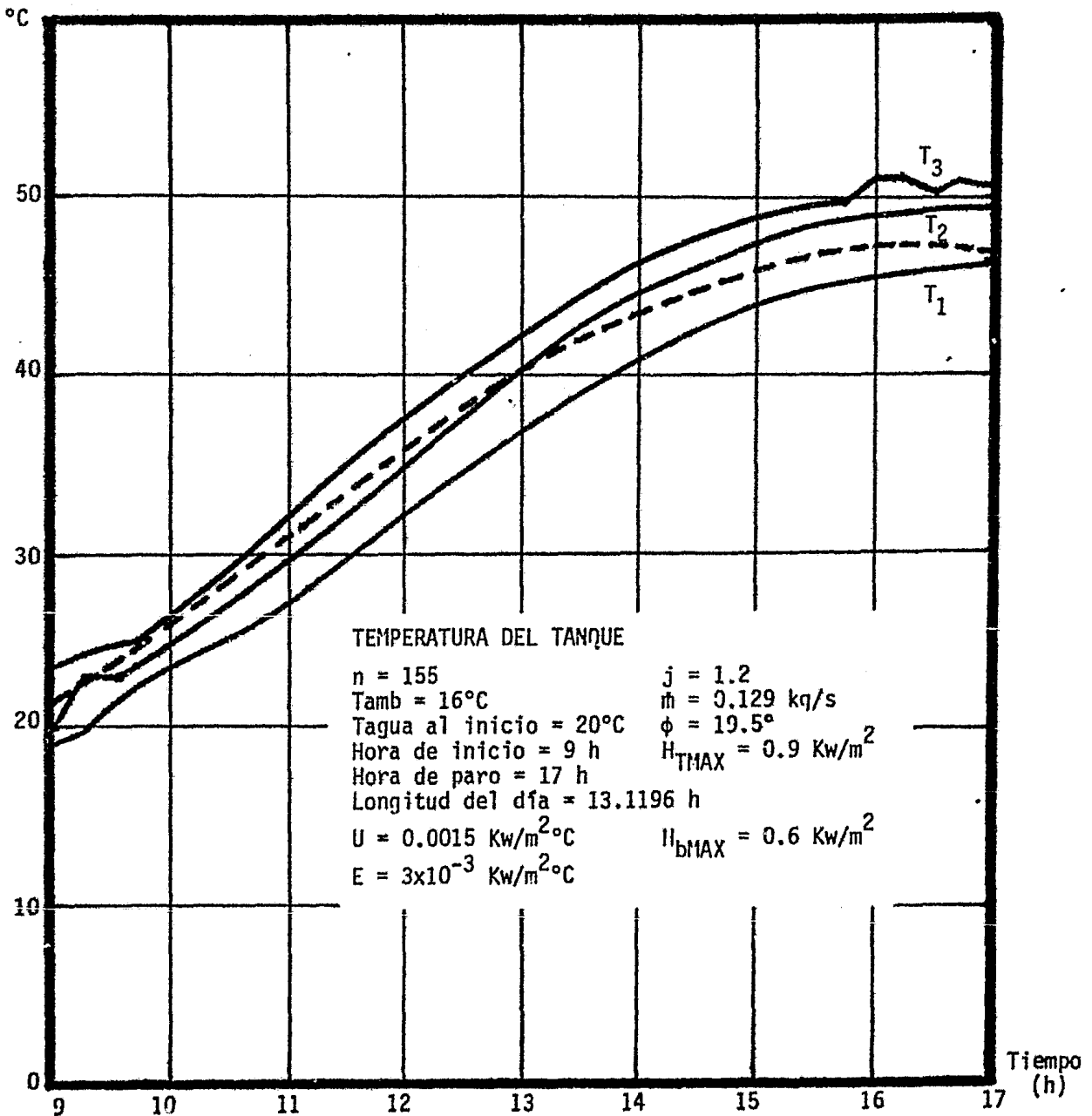




## TEMPERATURAS DEL TANQUE

4 de junio de 1982

Tanque



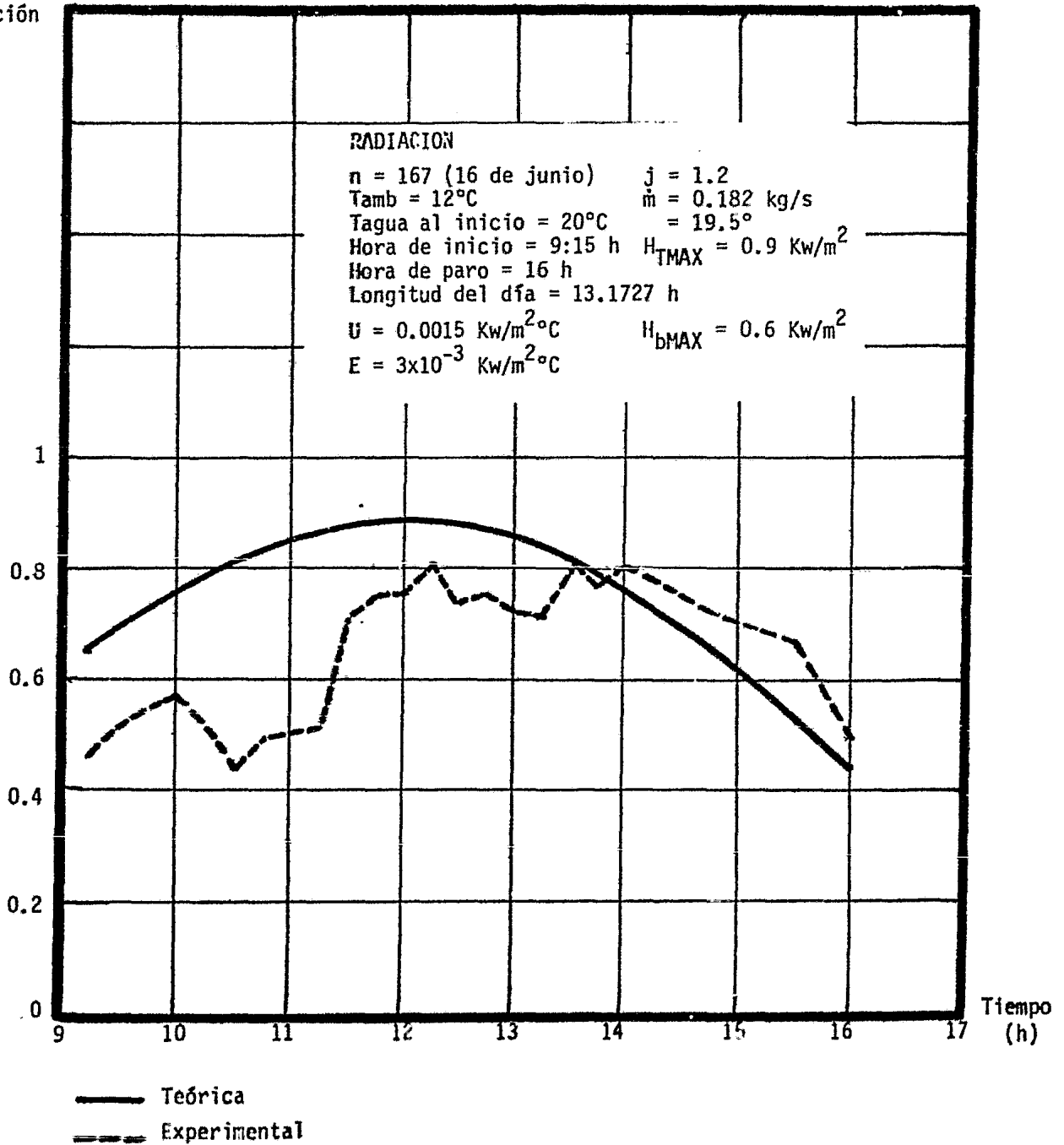
— Experimental  
 - - - Teórica

$T_1$  Parte inferior del tanque  
 $T_2$  Parte central del tanque  
 $T_3$  Parte superior del tanque  
 Flujo másico ( $\dot{m}$ ) = 0.129 kg/s

## RADIACION

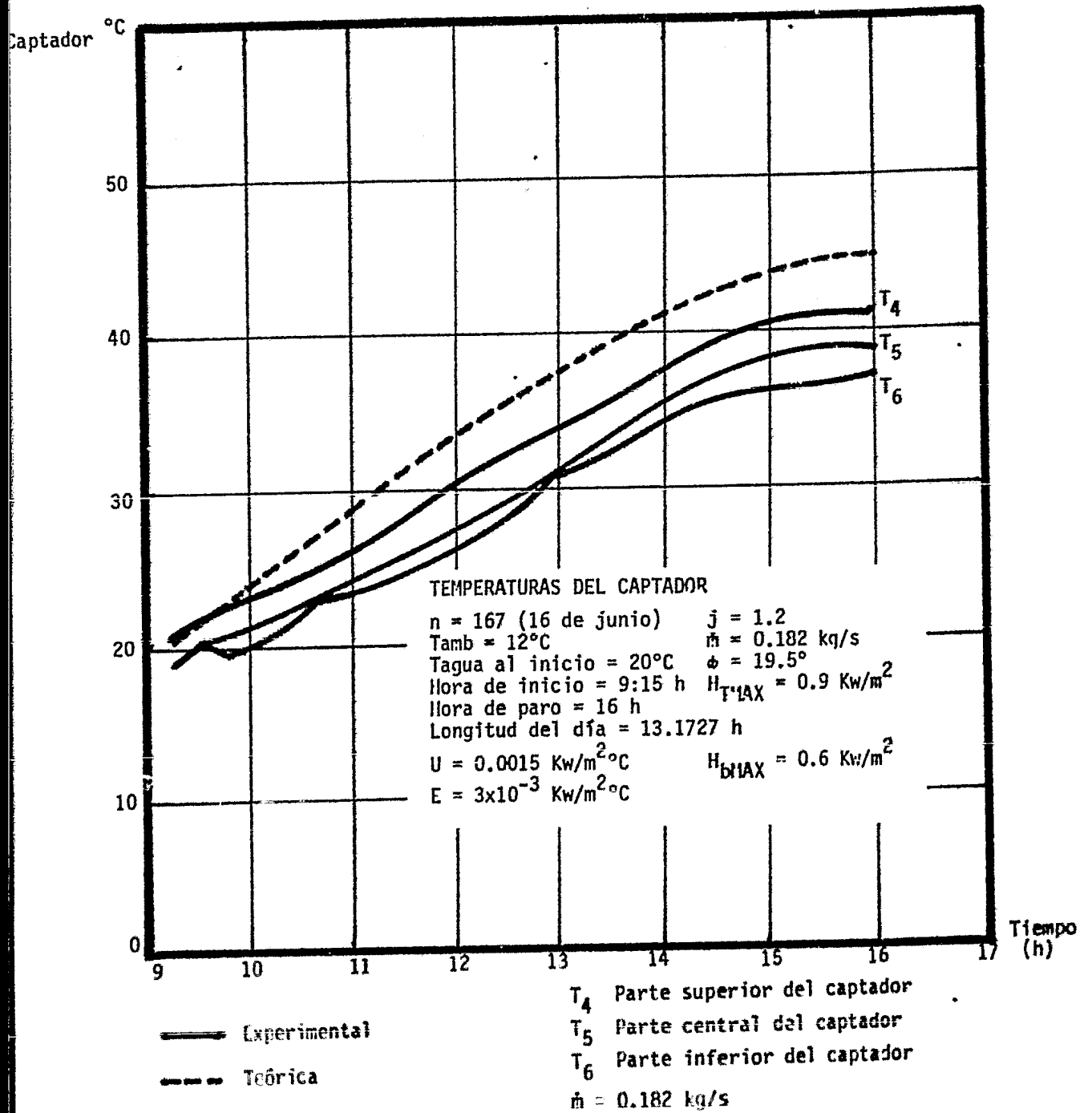
16 de junio de 1982

Radiación



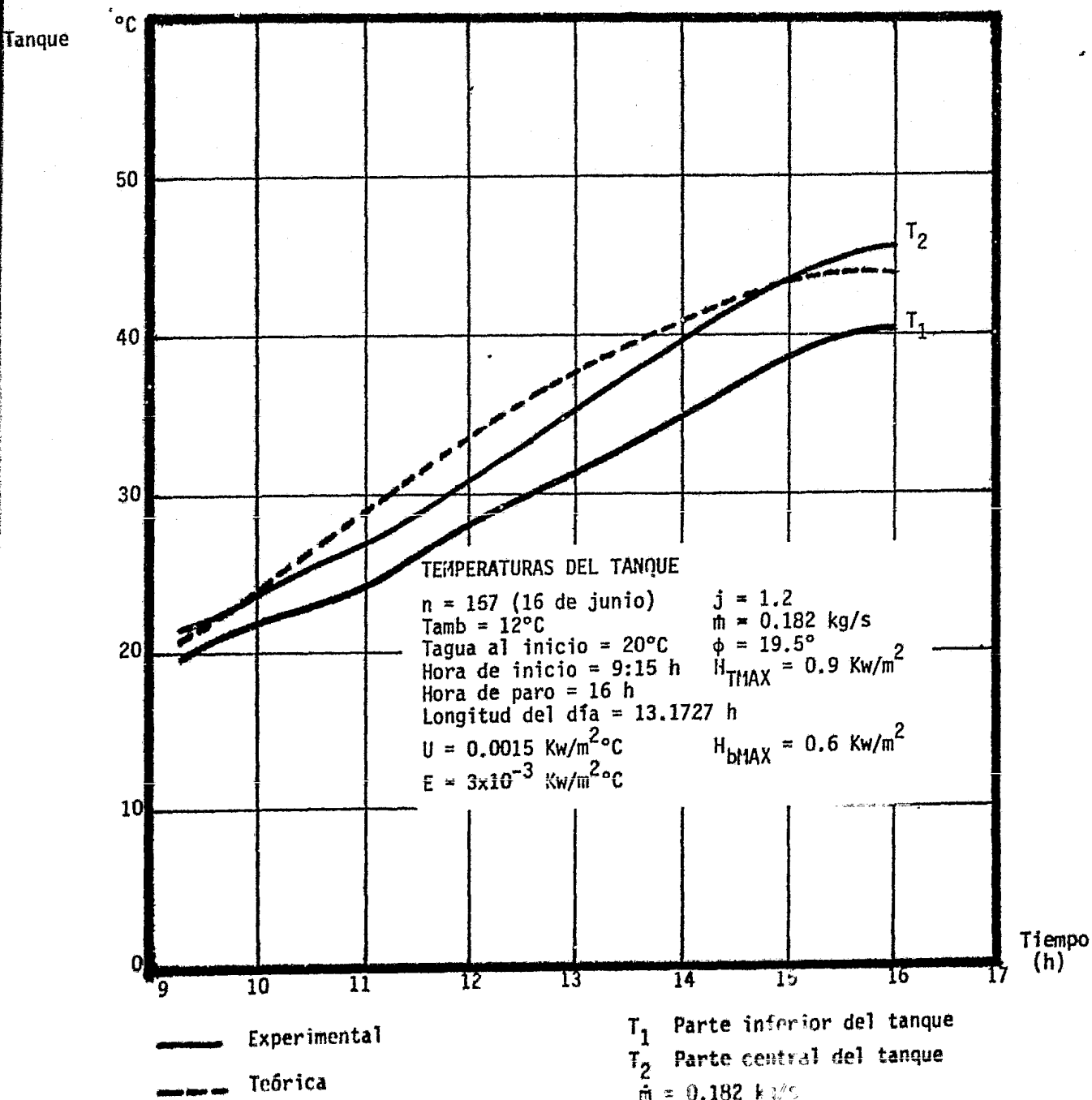
TEMPERATURAS DEL CAPTADOR

16 de junio de 1982



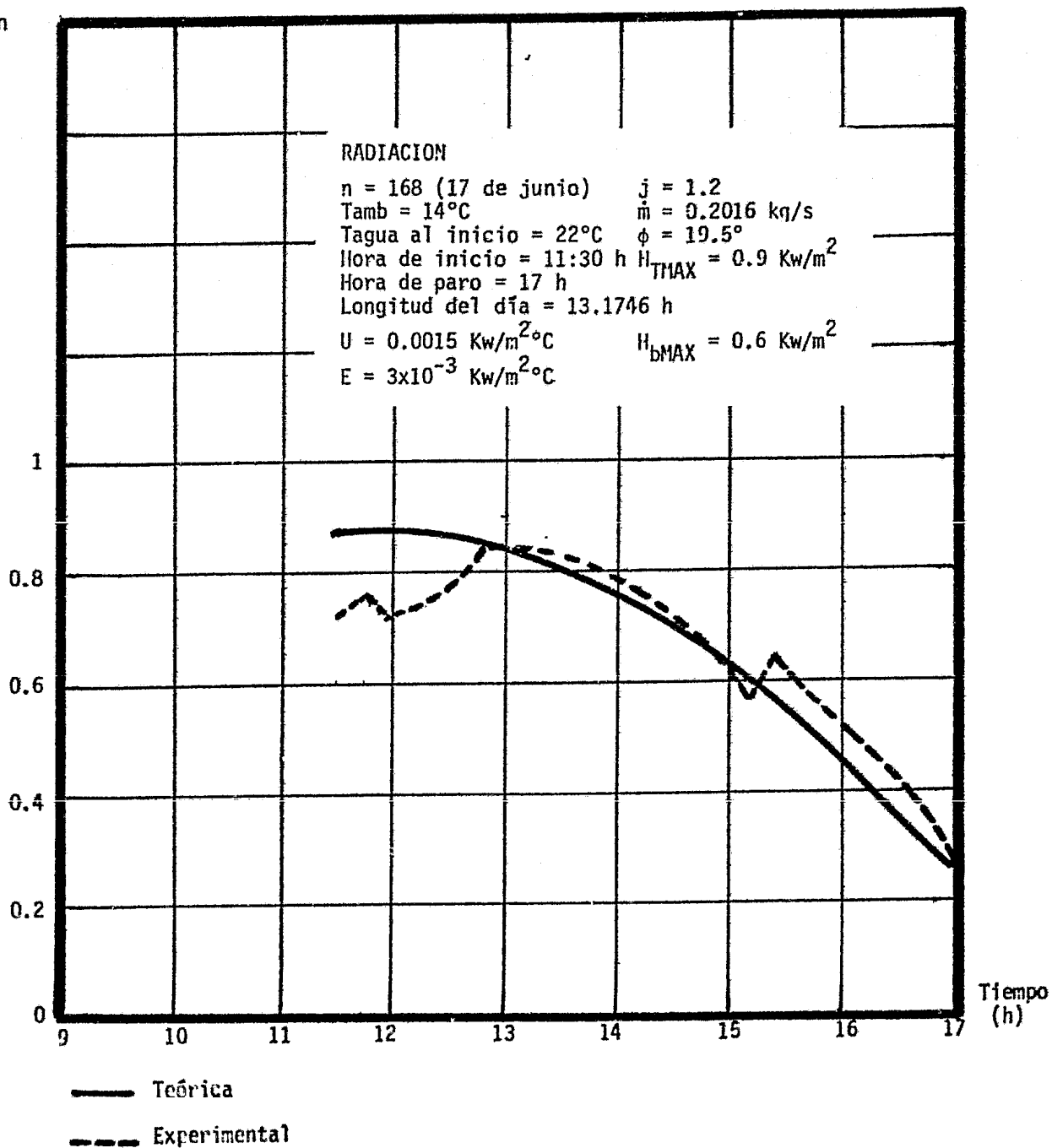
## TEMPERATURAS DEL TANQUE

16 de junio de 1982



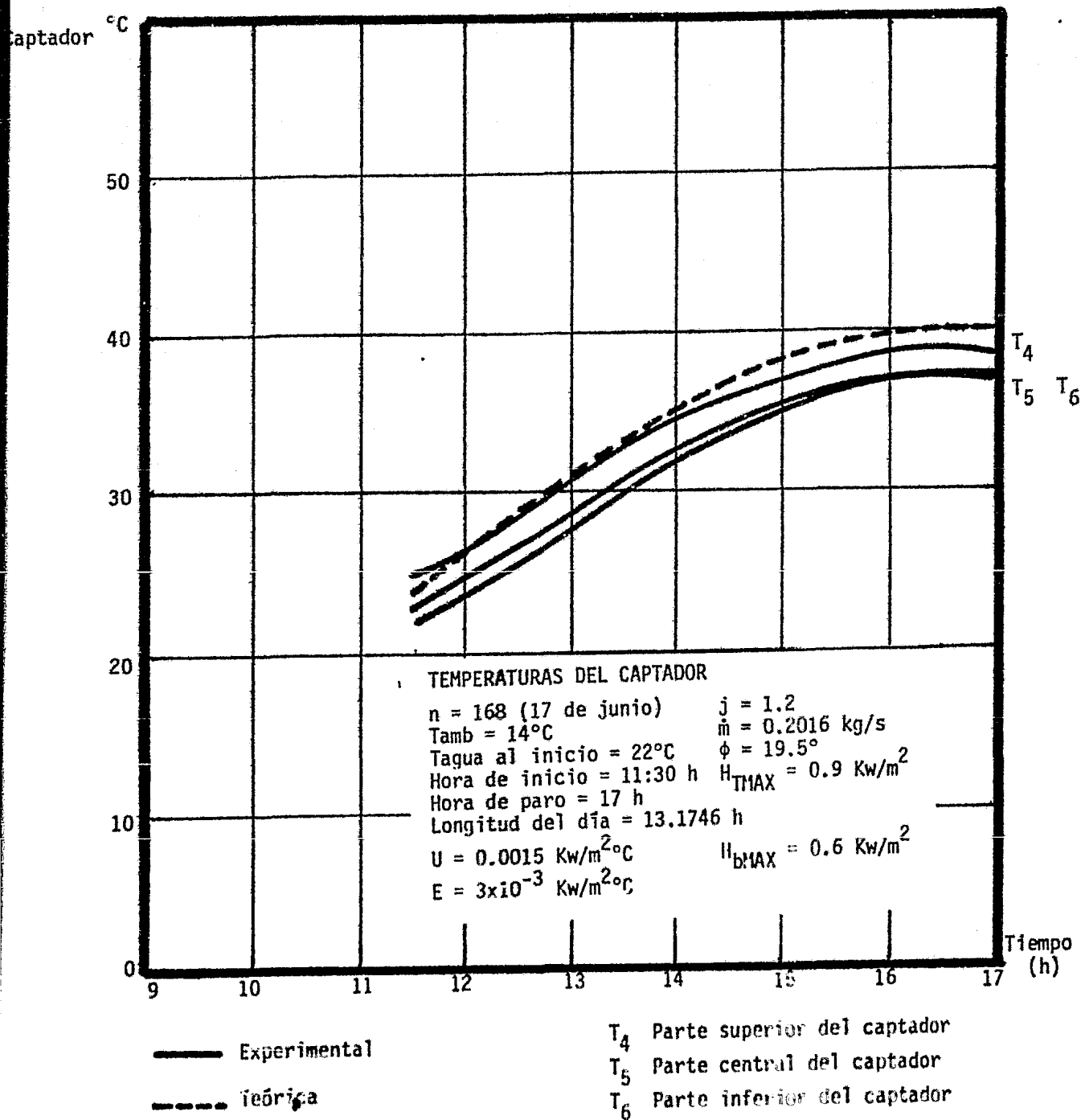
## RADIACION

17 de junio de 1982

Radiación  
/m<sup>2</sup>

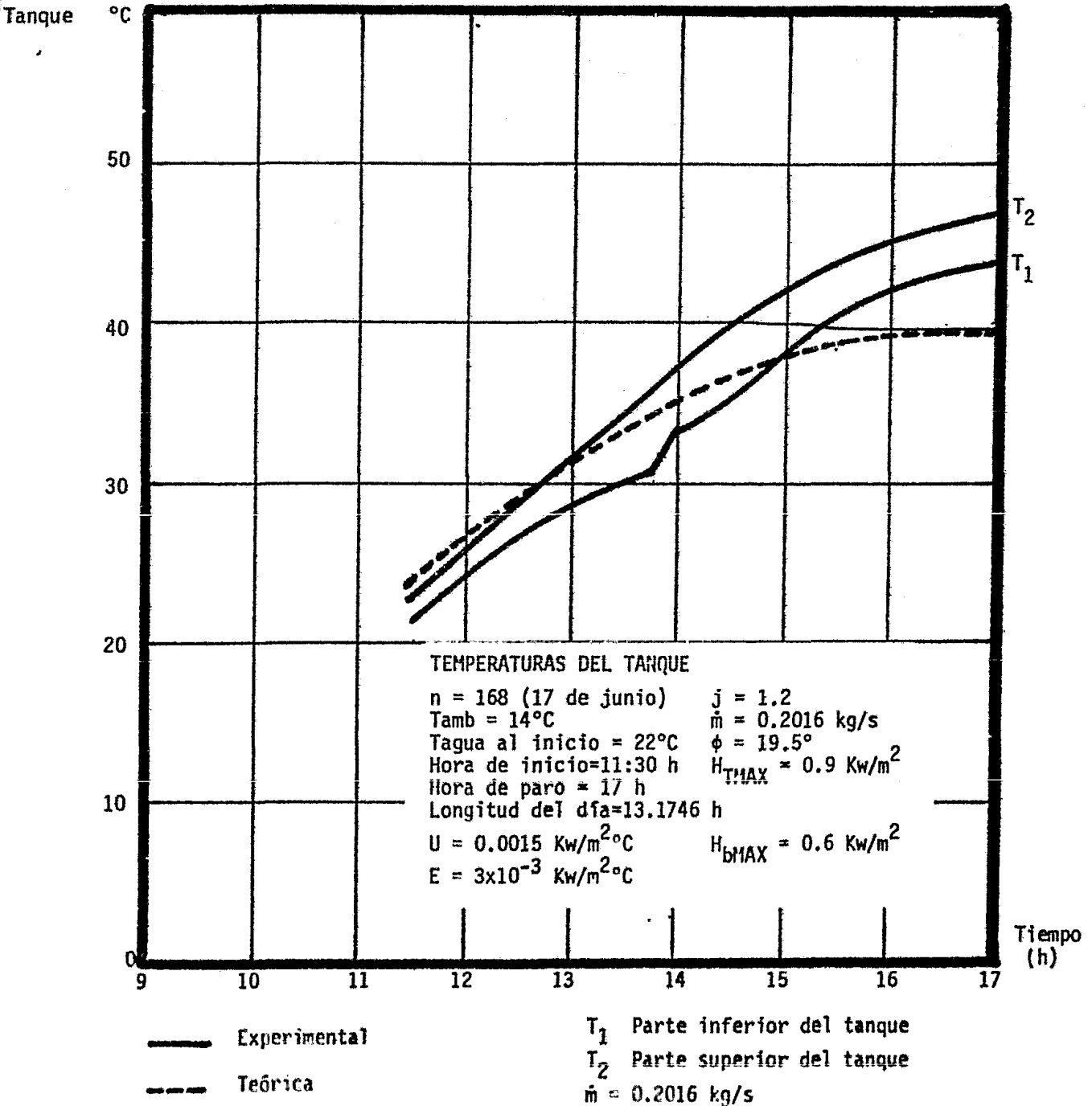
## TEMPERATURAS DEL CAPTADOR

17 de junio de 1982



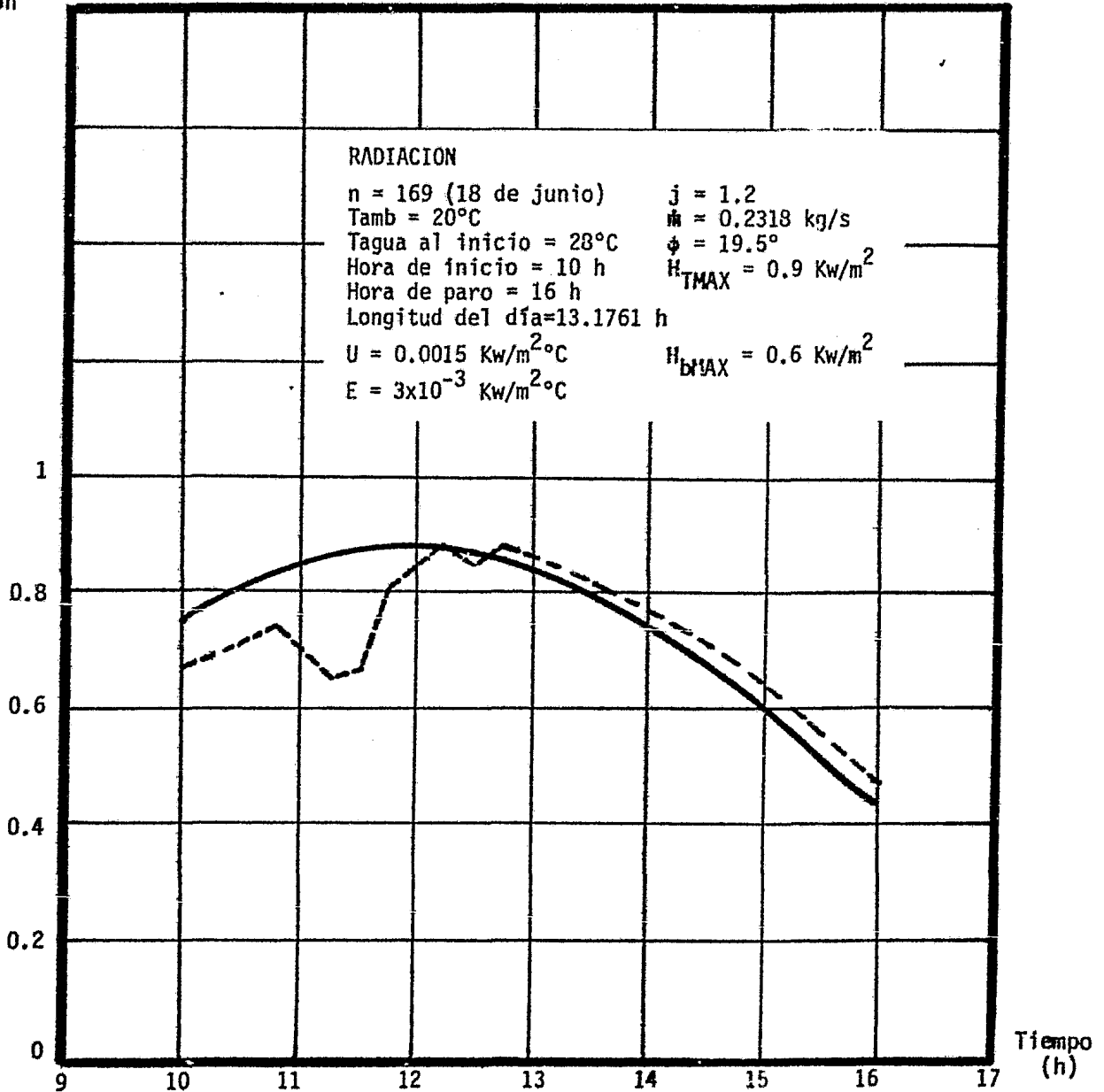
TEMPERATURAS DEL TANQUE

17 de junio de 1982



## RADIACION

18 de junio de 1982

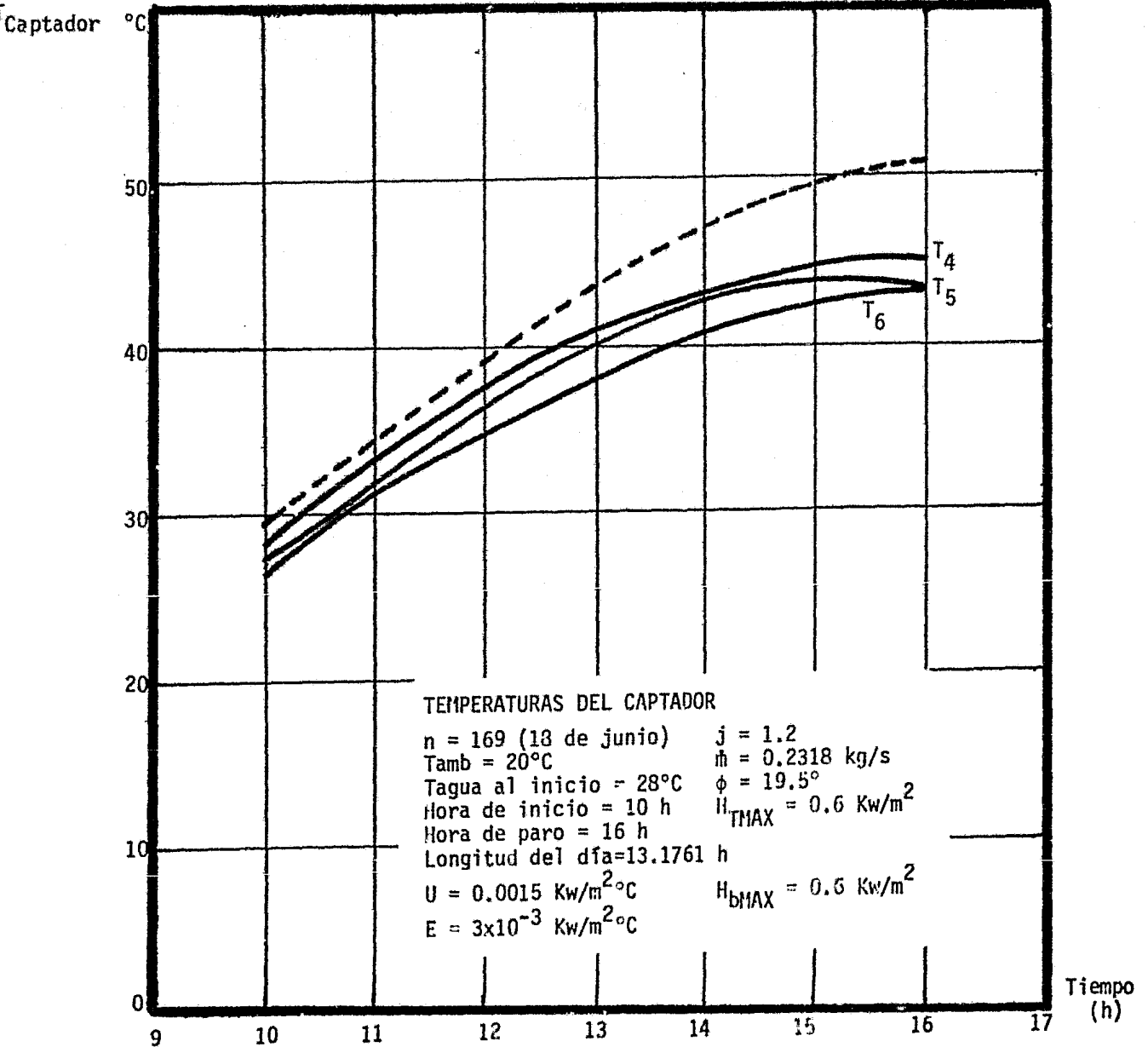
Radiación  
Kw/m<sup>2</sup>

--- Experimental  
 — Teórica



## TEMPERATURAS DEL CAPTADOR

18 de junio de 1982

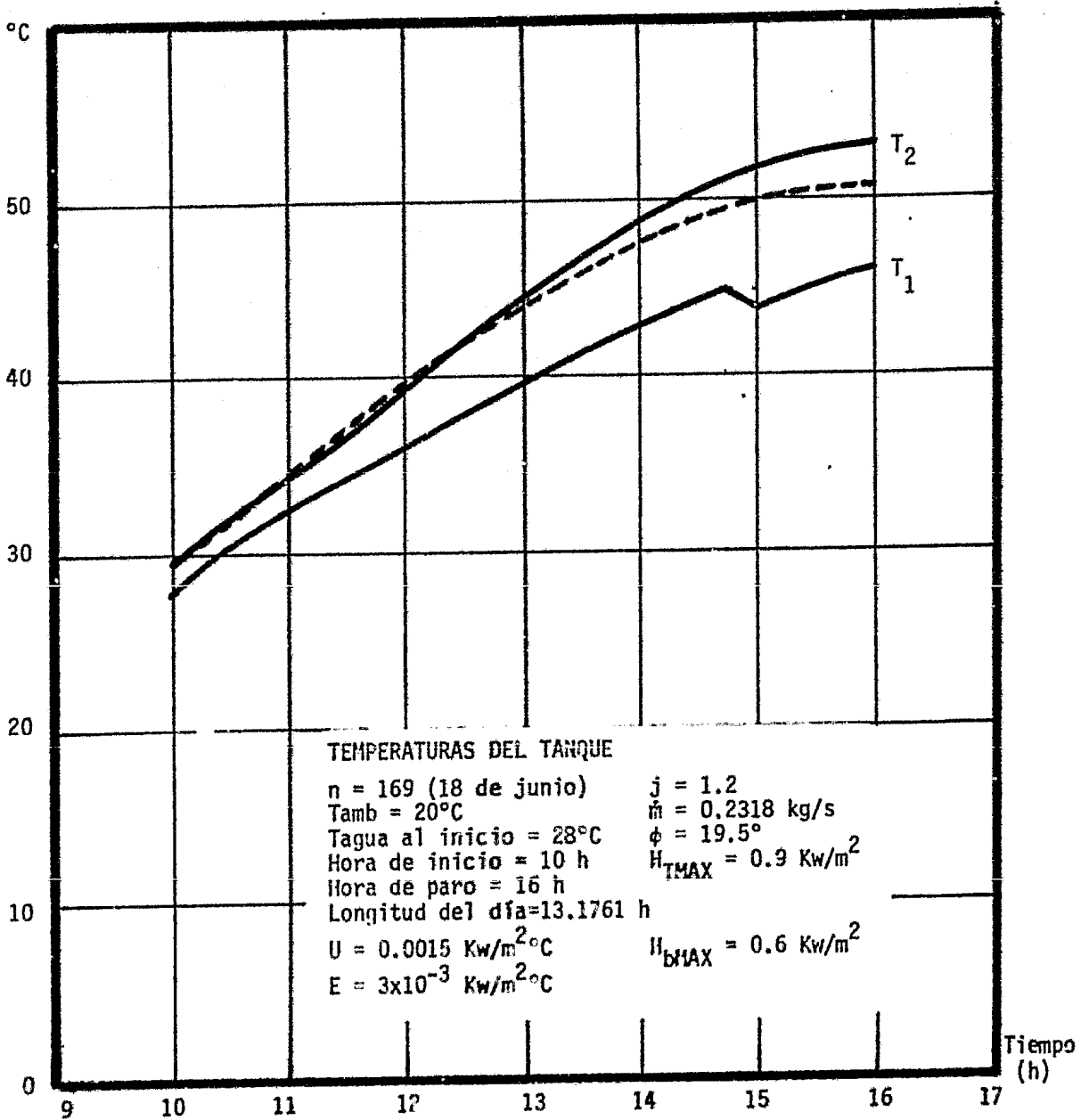


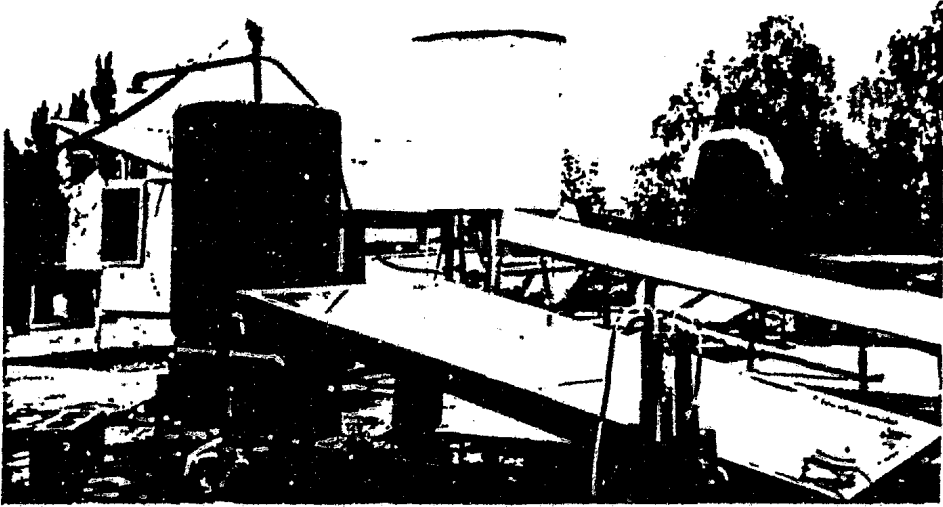
— Experimental  
 - - - Teórica

$T_4$  Parte superior del captador  
 $T_5$  Parte central del captador  
 $T_6$  Parte inferior del captador  
 $\dot{m} = 0.2318 \text{ kg/s}$

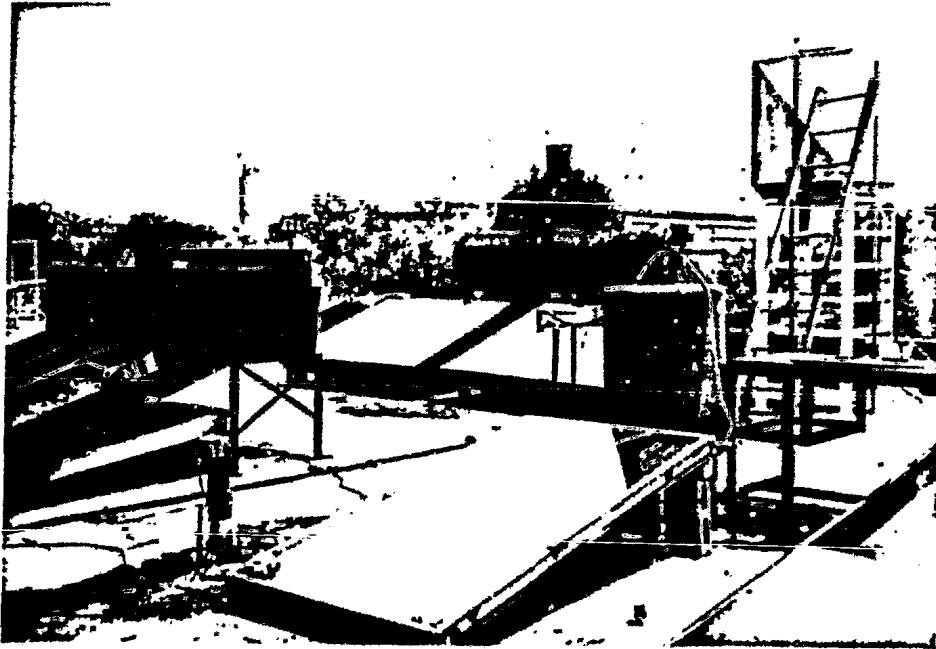
## TEMPERATURAS DEL TANQUE

18 de junio de 1982

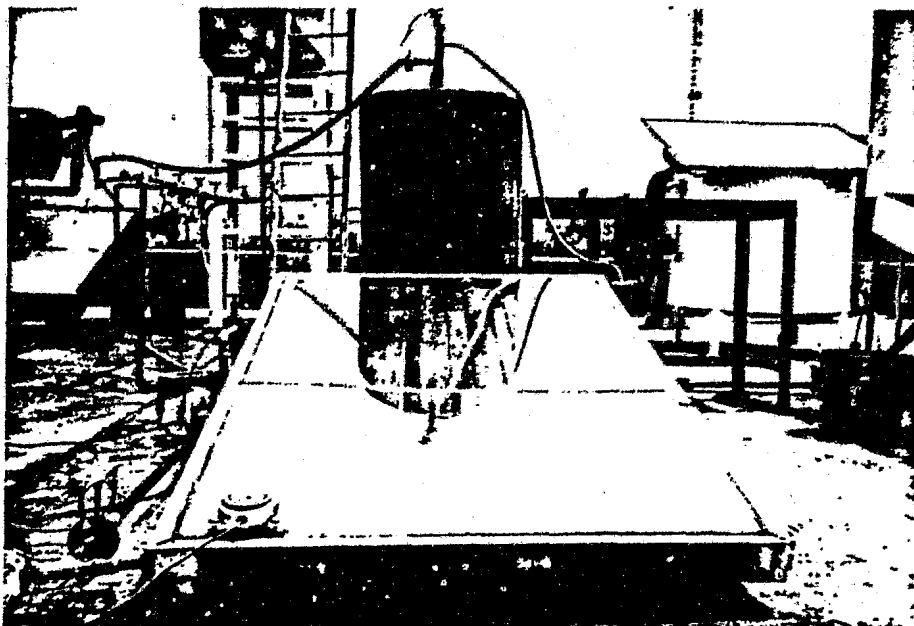




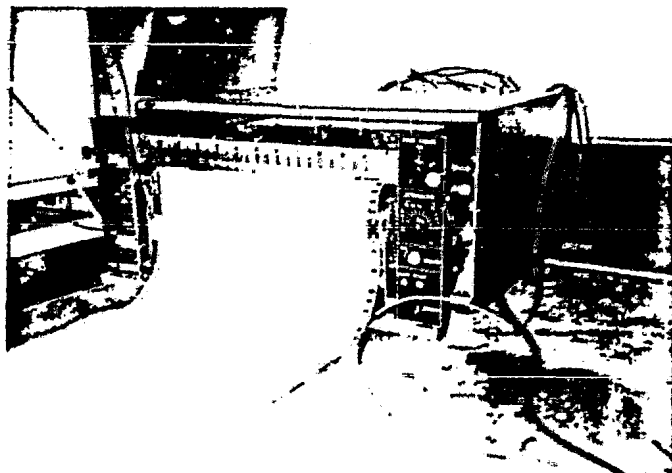
Vista lateral del calentador solar en el laboratorio .



Vista general de la instalación experimental



Vista frontal del calentador.  
En la parte baja, el piranómetro.



Graficador de 24 canales utilizando  
las pruebas experimentales.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones más relevantes del presente trabajo se pueden resumir como sigue:

1. El modelo matemático que aquí se estudió es útil, por un lado, para aproximar con una precisión del orden del 10% el comportamiento térmico de un calentador solar de tipo doméstico a lo largo de un día típico de baja nubosidad. Por otro lado, ayuda a estimar los valores de los coeficientes globales de pérdidas térmicas del tanque,  $U_T$ , y del captador,  $E$  y  $j$ . No obstante, como las gráficas anteriores demuestran, las imprecisiones del modelo, debidas a su propia estructura, hacen imposible establecer diferencias "finas" entre esos valores de  $U_T$ ,  $E$  y  $j$ , como las que ocurren de un día a otro, debidas a variaciones en la velocidad del viento, de la radiación solar y de la temperatura del ambiente. Esto puede deberse a la gran simplicidad del modelo teórico de las pérdidas de calor, pero los resultados aún no son concluyentes.

2. Aún dentro de las limitaciones en la precisión, que harían del modelo matemático una aproximación gruesa o inicial del problema, los resultados parecen ser satisfactorios para una variedad de aplicaciones de ingeniería. La más importante debe ser el diseño de sistemas solares, cuya definición dentro de un rango de error del 10 al 15% es satisfactoria dada la propia incertidumbre de la magnitud del recurso solar.

3. Dentro de los objetivos iniciales se destaca que el modelo matemático de parámetros concentrados es útil al diseñador de grandes sistemas solares, dentro del error apreciado del 10 al 15%, si se resuelve ese modelo para buscar valores de  $U_T$ ,  $E$  y  $j$ . No obstante, cabe sospechar que la precisión de las predicciones será mejor toda vez que se conozcan de antemano valores confiables de  $U_T$ ,  $E$  y  $j$  o de parámetros equivalentes.

Por lo anterior se pueden proponer las recomendaciones que se apuntan:

1. Deben desarrollarse modelos más refinados para describir las pérdidas de calor, considerando la variabilidad de las velocidades del viento, de la temperatura ambiente y de la radiación solar, si se desea aumentar la precisión de los modelos predictivos de sistemas solares.

2. Es útil desarrollar modelos teóricos, avalados por experimentos, que mejoren la evaluación de los parámetros  $U_T$ ,  $E$  y  $j$ .

3. Conviene, antes que otra cosa, refinar el modelo aquí estudiado para permitirle incluir, al menos, la variabilidad de la temperatura ambiental y de la velocidad del viento como variables exógenas. Una vez que este modelo

matemático se compare ampliamente con resultados experimentales podrá decirse con mejor certidumbre si vale o no la pena, para auxiliar al diseñador de grandes sistemas solares, desarrollar modelos matemáticos de parámetros distribuidos.

## Bibliografía

1. Fernández, J.L., "Captadores solares planos para calentar agua - estudio comparativo", Memoria del 3er. Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, p. 143, Oaxtepec, Mor., sept 1977, México
2. Duffie, J.A. y Beckman, W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, Nueva York, 2a. Edición, 762 pp, 1980, EUA
3. Fernández, J.L. y Estrada-Cajigal, V., "Predicción de la radiación solar instantánea en la República Mexicana", Informe de las series del Instituto de Ingeniería, UNAM, 43 pp, enero 1983 (en prensa), México
4. San Román, O. y Fernández, J.L., "Natural convection modeling for the experimental determination of radiative emissivity", IASTED-AMS '82, Memorias, pp 143-146, junio 29 a julio 2 de 1982, (en prensa), París, Francia.