

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN CALENTADOR
SOLAR DE AGUA A CIRCULACION NATURAL

RODOLFO MARTINEZ STREVEL

INGENIERIA QUIMICA

1 9 7 7



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

LAB Tesis 1977
LIBR M- [REDACTED]
FECHA _____
PROC _____ **264**
S _____



QUIMICA

PRESIDENTE: Ing. Vladimir Estivill Riera

VOCAL: Ing. Carlos Doorman Montero

SECRETARIO: Ing. Guillermo Alcayde Lacorte

1er. SUPLENTE: Ing. Jorge Martínez Montes

2do. SUPLENTE: Ing. Alfonso Franyutti Altamirano

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Centro de Investigación de Materiales - U.N.A.M.

SUSTENTANTE: Rodolfo Martínez Strevel

ASESOR DEL TEMA: Ing. Guillermo Alcayde Lacorte

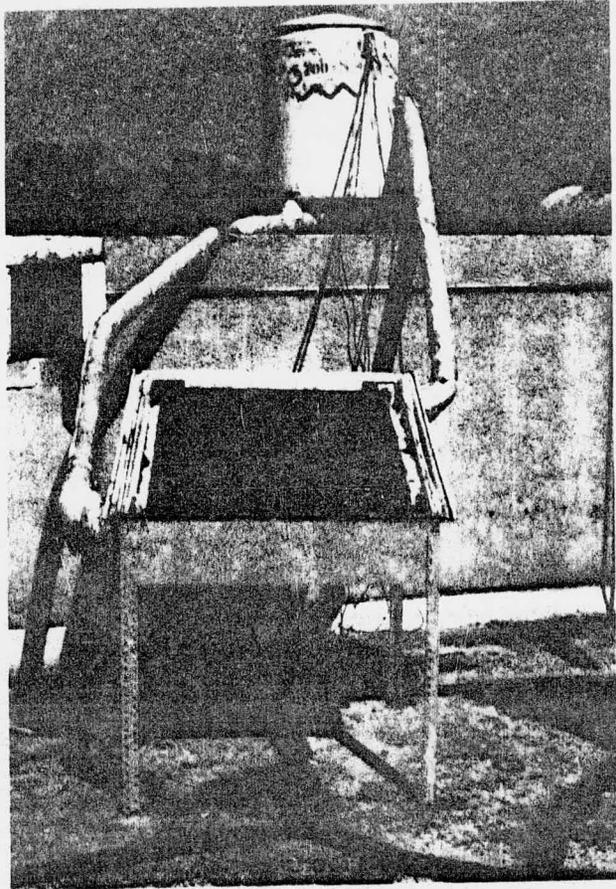
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A BLANCA ESTHELA

Quiero hacer patente mi agradecimiento al DR. ERIC MAYER y al M. en C. EVE---RARDO HERNANDEZ, por sus valiosos comentarios en la realización de este trabajo. Asimismo al ING. GUILLERMO ALCAYDE por la revisión final del texto.

Agradezco a loa DIRECTIVOS y MIEMBROS del CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES U.N.A.M., por las facilidades que me fueron concedidas para hacer uso de las instalaciones y servicios de esta INSTITUCION.



INDICE:

INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	5
GENERALIDADES	6
PRINCIPIOS BASICOS	10
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION	30
INSTALACION DEL SISTEMA	40
EQUIPO EXPERIMENTAL	45
INSTRUMENTACION	51
RESULTADOS	54
CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFIA	67

INTRODUCCION

El desarrollo del mundo contemporáneo depende en alto grado de sus recursos energéticos. Entre éstos los no renovables como los hidrocarburos y el carbón, ocupan un lugar predominante. Su creciente demanda y cada vez menores reservas, presentan un incierto porvenir en una sociedad en la que su economía y sus patrones de vida están supeditados sensiblemente a cualquier fluctuación en el suministro de sus energéticos básicos.

Ante esta situación, las fuentes de energía no convencionales como la solar, ofrecen un futuro prometedor. Su transformación eficiente a otros tipos de energía, es objeto de exhaustivas investigaciones en todo el mundo.

México presenta condiciones geográficas y climatológicas muy favorables³, para un amplio aprovechamiento de la energía solar. (Figuras 1 y 2). Un 38% de su territorio recibe más de $500 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y un 57% entre $400 \text{ y } 500 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Particularmente, la zona noroeste de la República Mexicana tiene elevados niveles de insolación que aseguran un enorme potencial para futuras aplicaciones solares.

El desarrollo de tecnología adecuada para la utilización de la energía solar, considerando las limitaciones, los recursos y las necesidades del país, es un imperativo a seguir.

En la actualidad las transformaciones más eficientes de la energía solar, se encuentran en las energías calorífica y eléctrica como son: sistemas de refrigeración y aire acondicionado, calentamiento de agua y conversión fotovoltaica.

Estas se llevan a cabo mediante dispositivos que interceptan y absorben la energía solar incidente. Su funcionamiento se efectúa mediante el fenómeno de termocirculación ya sea natural o forzada.

En este trabajo se hace el estudio del funcionamiento de un calentador solar de agua a circulación natural. Y se comparan los resultados experimentales contra los obtenidos mediante un modelo matemático.

La experimentación se llevo a cabo en la ciudad de México donde -- los niveles de insolación son muy variables. Las localidades que tienen un buen número de días despejados durante el año, así como una baja humedad relativa anual son las más apropiadas para el aprovechamiento de la energía solar.

La Ingeniería Química tiene un amplio campo de acción en lo que se refiere a diseño, construcción y operación de equipos solares de transferencia de calor altamente eficientes (colectores y concentradores solares) así como en la investigación de nuevos recubrimientos químicos con bajas emisividades de radiación en el rango del infrarrojo

Actualmente se desarrollan investigaciones para la aplicación de energía solar en operaciones unitarias como son: la destilación y el secado de granos.

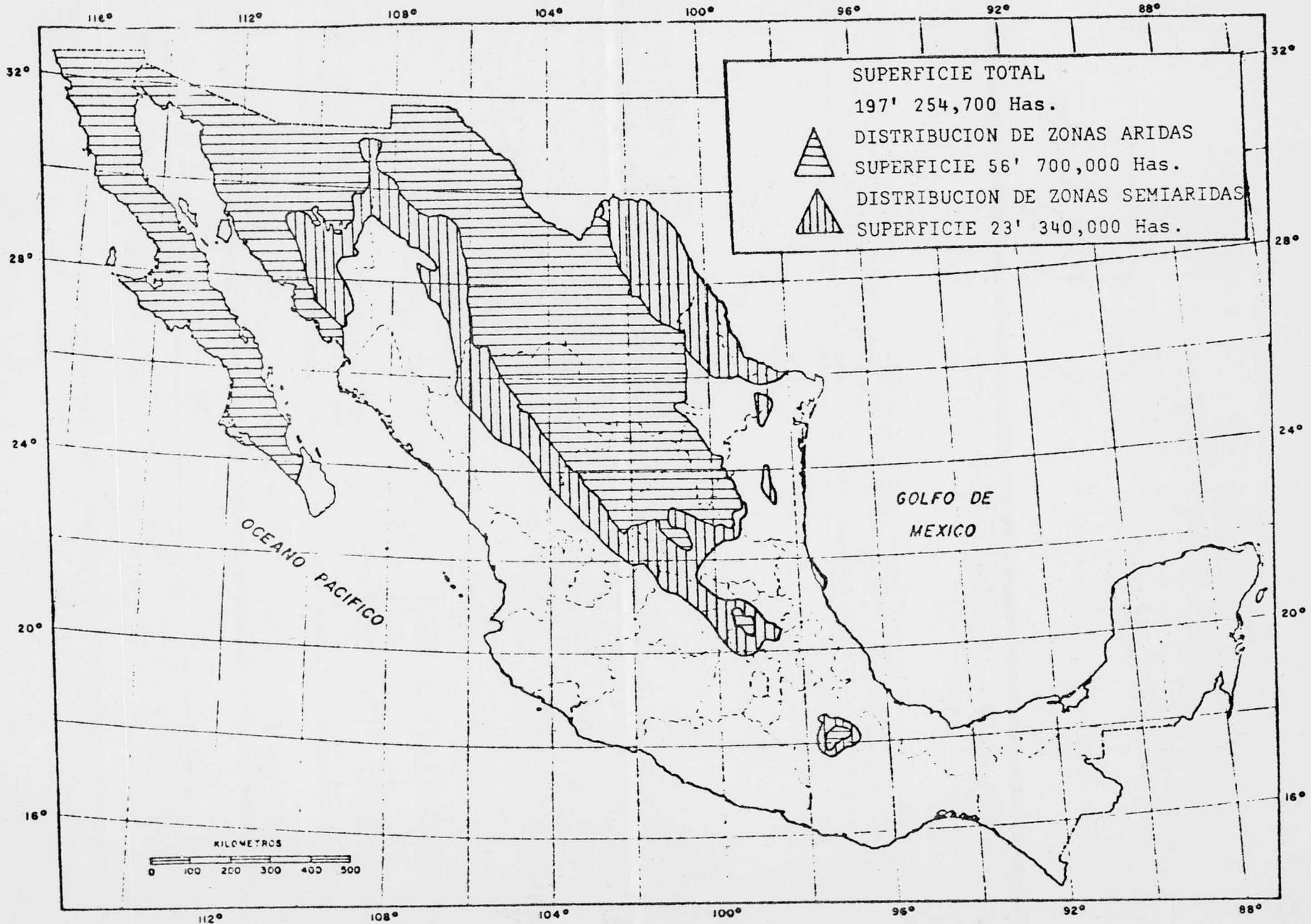


FIG. 1 DISTRIBUCION DE ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS EN LA REPUBLICA MEXICANA

OBJETIVOS

Analizar el funcionamiento de un calentador solar de agua y comparar los resultados obtenidos experimentalmente contra los teóricos, evaluados mediante un modelo matemático⁶.

GENERALIDADES

Un calentador solar de agua consta básicamente de dos elementos: un colector solar y un tanque de almacenamiento de agua.

Colectores Solares

La energía solar recibida instantáneamente sobre la superficie terrestre en nuestras latitudes durante días despejados y claros puede alcanzar el valor de 1000 watts/m^2 . Esta es una cantidad apreciable que puede ser captada mediante colectores planos o concentradores.

El proceso de captación se logra mediante la transformación de la radiación solar incidente en energía calorífica absorbida por el fluido circulante. Un dispositivo de captación de energía solar difiere de un intercambiador de calor, en el sentido de que la transferencia de energía radiante hacia el colector se realiza desde una fuente energética distante (sol) a un fluido de trabajo (agua). En tales condiciones se tienen bajos coeficientes de transferencia de calor y el transporte de energía por radiación viene a ser el fenómeno de transferencia predominante.

Colectores Planos

Los colectores planos son aquellos sobre los cuales se intercepta y absorbe la energía solar usando una superficie plana revestida por un película ennegrecida u otra altamente absorbente de la radiación solar (superficie selectiva).

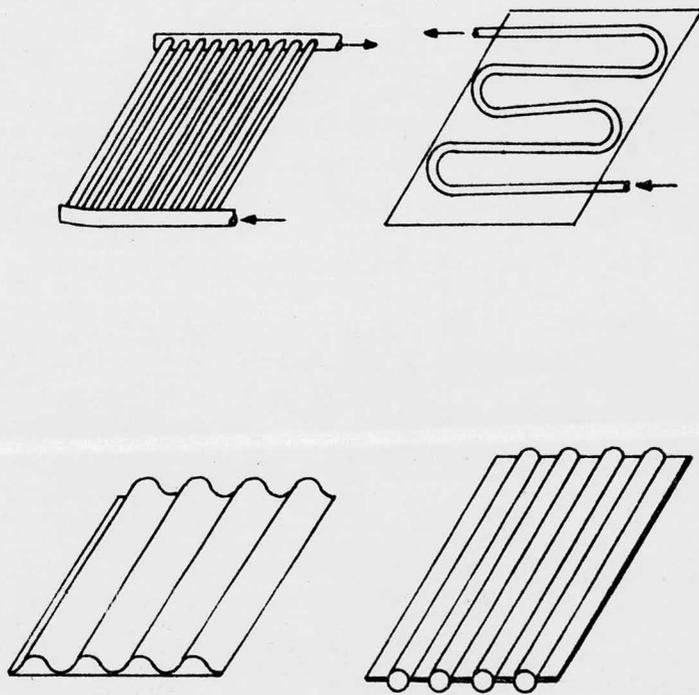


FIG. 3 TIPOS DE COLECTORES SOLARES

Los tipos más comunes son: tubos soldados a una placa; tubos paralelos soldados en sus extremos a dos cabezales y láminas metálicas unidas, una de ellas acanalada (Figura 3).

La placa colectora se aísla térmicamente en el fondo y en los lados para disminuir las pérdidas por conducción calorífica. La parte superior de la placa se cubre a cierta distancia, de una o varias cubiertas transparentes (de vidrio o de plástico), cuya finalidad es la de producir el efecto de invernadero y a su vez eliminar pérdidas por convección con el aire ambiente y por radiación, al atrapar la radiación infrarroja, emitida por la placa colectora.

Esta placa se construye de cobre, aluminio o hierro, materiales que poseen buenas conductividades térmicas y muy variadas dimensiones. Su revestimiento ennegrecido favorece la absorción de radiación solar incidente. Si es selectivo disminuye la emisión de radiación infrarroja a una temperatura de placa de hasta 100°C.

Como los colectores planos están comúnmente fijos, estos aprovechan la radiación solar global, es decir, la proveniente directamente del sol (radiación directa) y la que ha sido reflejada y dispersada por la atmósfera y nubes (radiación difusa).

Su inclinación y orientación se fijan en base a los factores astronómicos de posición (latitud geográfica, declinación solar) y climatológicos regionales (nubosidad).

La aplicación de estas unidades está dirigida esencialmente a los sistemas de calentamiento de agua, aire acondicionado, refrigeración, destilación y secado de granos.

Concentradores

Los concentradores o captadores focales mediante superficies reflectoras dirigen la radiación solar sobre una superficie cuya área es menor que aquella que intercepta a la energía incidente.

Este tipo de colectores aprovecha únicamente la radiación solar directa y por tal razón deben seguir el movimiento del sol. Para tal fin, se requiere de un mecanismo apropiado (heliotropo) que eleva el costo del dispositivo, sin embargo las temperaturas que se alcanzan son hasta de 3500°C (dependiendo de la perfección óptica del diseño).

Estos se clasifican en función del tipo de sus superficies reflectoras, en : cónicos, cónicos y parabólicas.

Tanque de almacenamiento de agua

El tanque de almacenamiento de agua, generalmente metálico está -- aislado para disminuir las pérdidas caloríficas por conducción y convección. Almacena el agua caliente proveniente del colector solar y la -- conserva a niveles de temperatura aceptables (mayores de 40°C) durante los períodos de no insolación.

PRINCIPIOS BASICOS DE UN CALENTADOR SOLAR

El funcionamiento de un colector operando bajo condiciones estacionarias; se puede describir mediante un balance energético que incluya a los siguientes componentes: energía solar incidente, energía útil aprovechada por el fluido, pérdidas de calor y energía almacenada. El balance energético total se expresa mediante la siguiente ecuación :

$$A \{ (HR (\tau\alpha))_b + (HR (\tau\alpha))_d \} = Q_u + Q_p + Q_a \dots \dots (1)$$

donde :

A = área del colector (m²)

H = radiación solar incidente directa (b) ó difusa (d)
recibida sobre un plano horizontal, sobre la unidad de superficie por unidad de tiempo (watts/m²)

R = factor de conversión, entre la radiación directa y difusa recibida sobre un plano horizontal y la captada sobre un plano colector con cierta inclinación

($\tau\alpha$) = producto transmisividad-absortividad de las cubiertas transparentes a la radiación directa (b) ó difusa (d)
(adimensional)

Q_u = calor útil absorbido por el agua del colector (watts)

Q_p = pérdidas de calor del colector por unidad de tiempo hacia el medio ambiente por convección, radiación y conducción (watts)

Q_a = energía almacenada por el sistema por unidad de tiempo
(watts)

La eficiencia instantánea del colector se define como el cociente de la energía útil aprovechada por el colector -en cualquier período de tiempo-

y la energía global incidente en ese mismo período:

$$\eta = \frac{\frac{Q_u}{A} dt}{HR dt} \dots \dots (2)$$

donde :

η = eficiencia instantánea

t = período estudiado

HR = la suma de la radiación directa ($H_b R_b$) más la difusa ($H_d R_d$), captada sobre la unidad de superficie por unidad de tiempo, corregida a la inclinación del colector.

El calor útil del colector Q_u , se determina mediante la siguiente expresión :

$$Q_u = m c_p (t_s - t_e) \dots \dots (3)$$

donde :

m = gasto másico del fluido, (g/seg)

c_p = capacidad calorífica del agua a la temperatura media del agua en el colector (Joule/g °C)

t_s = temperatura de salida del agua del colector (°C)

t_e = temperatura de entrada del agua al colector (°C)

Si los datos de la radiación global se obtienen sobre el mismo plano inclinado del colector, se tiene que :

$$H = (HR)_b + (HR)_d \dots \dots (4)$$

Por lo tanto, la ecuación 1 se reducirá a la siguiente expresión :

$$HA(\tau\alpha) = Q_u + Q_p + Q_a \dots \dots (1a)$$

El producto transmisividad-absortividad se expresa en función del

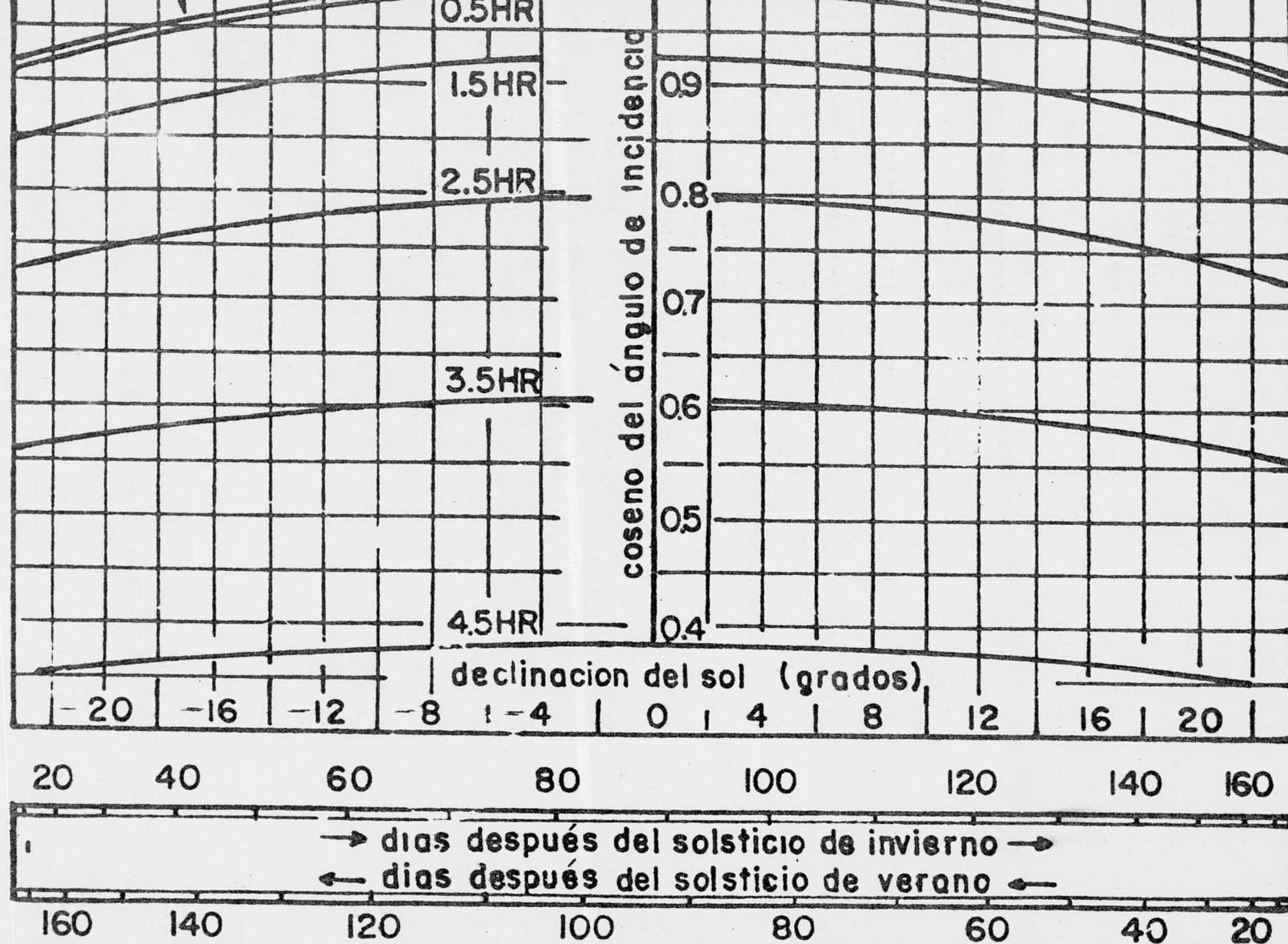


FIG. 4 COSENO DEL ANGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACION DIRECTA SOBRE COLECTORES INCLINADOS HACIA EL ECUADOR CUANDO $\phi - \beta = 0$

ángulo de incidencia de la radiación directa que cae sobre las cubiertas transparentes del colector. Siendo θ el ángulo de incidencia formado por la radiación solar directa con la normal al plano del colector (Fig. 4) y se evalúa así:

$$\theta = \cos^{-1} (\text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \lambda \\ + \text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \beta \text{ cos } \omega \\ + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma \text{ cos } \omega \\ + \text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma \text{ sen } \omega) \dots\dots (5)$$

donde :

δ = declinación solar⁴ (Fig. 5)

ϕ = latitud del lugar (hemisferio norte, positivo)

β = ángulo de inclinación del colector con respecto a la horizontal.

γ = ángulo acimutal, es el ángulo comprendido entre el sur geográfico y la proyección sobre el plano del horizonte de la posición del sol en cierto instante (0° en el sur, positivo hacia el este y negativo hacia el oeste)

ω = ángulo horario, es el ángulo comprendido en cierto instante del día entre el plano meridional del lugar y el plano meridional que intersecta al sol en su posición instantánea, al mediodía solar su valor es de 0° (ambos planos coinciden) y cada hora equivale a 15° , siendo en las mañanas positivo y en las tardes negativo (p.e. $\omega = +30^\circ$ para las 10.00 y $\omega = -22.5^\circ$ para las 13.30)

Al incidir la radiación solar en la cubierta transparente del co-
lecto es reflejada, absorbida y transmitida en diferentes proporciones.
Situación semejante sucede con aquella parte que transmite la cubierta
transparente y choca con placa colectora.

La radiación incidente a cualquier ángulo cumple con la siguiente
expresión :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \dots\dots\dots (6)$$

donde :

α = absorptividad del cuerpo, adimensional

ρ = reflectividad

τ = transmisividad

Estas propiedades están en función de la longitud de onda λ , del
ángulo de incidencia θ , del índice de refracción n y del coeficiente
de extinción K del material que forma la cubierta transparente.

Mediante la relación de Fresnel se obtiene el valor de la reflecti-
vidad definida como el cociente de la radiación reflejada respecto a la
radiación incidente, esto es :

$$\rho = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} \left[\frac{\text{sen}^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2 (\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tan}^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2 (\theta_2 + \theta_1)} \right] \dots (7)$$

donde :

θ_1 = ángulo de incidencia

θ_2 = ángulo de reflexión

Los ángulos θ_1 y θ_2 se relacionan con los índices de refracción (n)
de los medios respectivos, por medio de la ley de Snell,

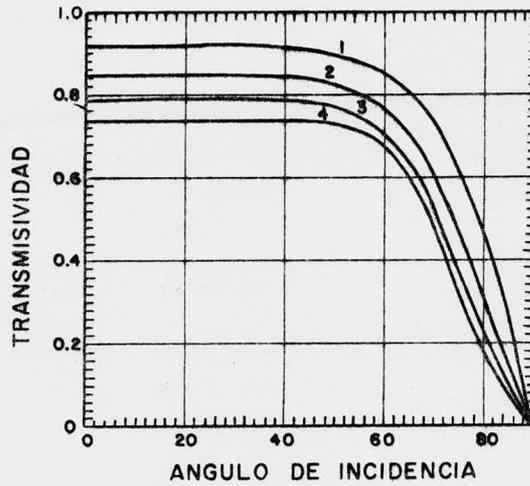


FIG. 6 TRANSMISIVIDAD DEBIDA A LA REFLEXION DE CUBIERTAS MULTIPLES (INDICE DE REFRACCION = 1.526).

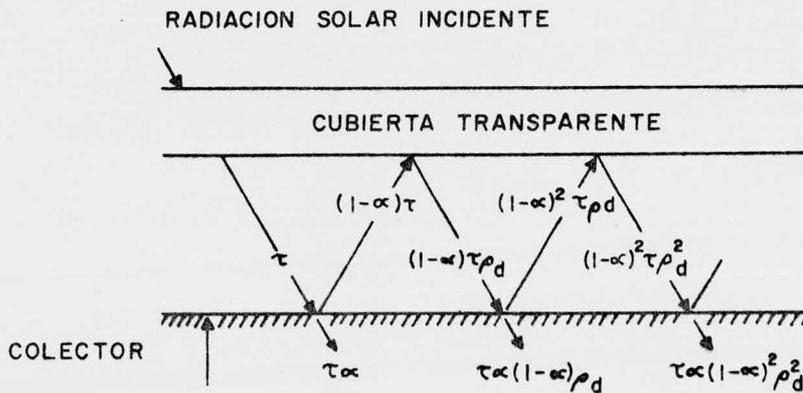


FIG. 7 TRANSMISION, ABSORCION Y REFLEXION DE LA RADIACION SOLAR INCIDENTE EN LA PLACA Y EN LA CUBIERTA TRANSPARENTE.

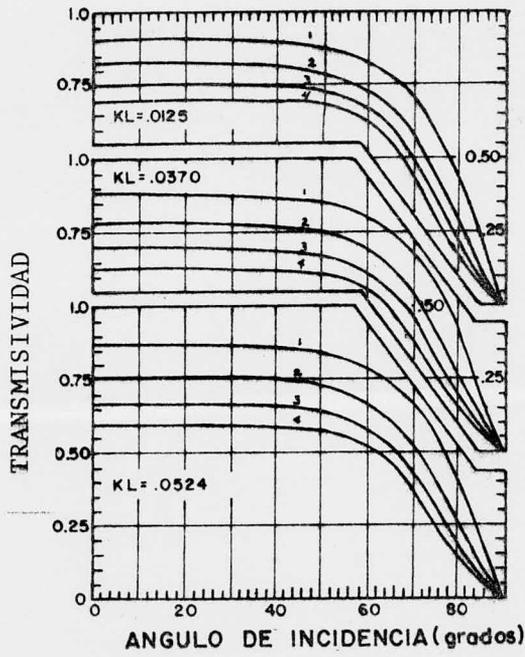


FIG. 8 TRANSMISIVIDAD (CONSIDERANDO REFLEXION Y ABSORCION) EN CUBIERTAS DE VIDRIO

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} \dots \dots \dots (8)$$

Para aire $n = 1$ y para el vidrio $n = 1.53$

La transmisividad de una cubierta debida a la reflexión se calcula mediante la siguiente ecuación : (Fig. 6)

$$\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \dots \dots \dots (9)$$

La porción transmitida después de la absorción se expresa como :

$$\tau_a = e^{-K\ell} \dots \dots \dots (10)$$

donde :

K = coeficiente de extinción del material (para el vidrio varía de 0.04 cm^{-1} para canto incoloro hasta 0.32 cm^{-1} para canto verde)

ℓ = espesor del medio transparente

El valor de la transmisividad τ debido a la reflexión y absorción se expresa así (Fig. 8)

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \dots \dots \dots (11)$$

Por otra parte, el valor de la absorptividad de la placa del colector (Fig. 7) (α) se supone isotrópica o sea, constante en todas las direcciones de la radiación incidente. Y tomando en consideración las partes, reflejada y reemitidas de la placa hacia la cubierta transparente , se tiene que :

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \dots \dots \dots (12)$$

dónde:

ρ = reflectividad difusa, que se calcula como la reflexión especular a un ángulo de incidencia de $\theta_1 = 60^\circ$ (para

un sistema de una cubierta de vidrio con índice de refracción $n = 1.53$, el valor de ρ_d es de 0.16).

Finalmente, el producto efectivo de transmisividad-absortividad (Fig, 9) $(\tau\alpha)_e$ en el que se incluye el efecto de la absorción de la cubierta transparente se expresa como :

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + (1 - \tau_a) a \dots \dots (13)$$

donde :

a es la relación entre el coeficiente de pérdidas totales respecto al coeficiente de pérdidas entre la cubierta transparente y el medio ambiente.

Para la evaluación de las pérdidas térmicas del colector Q_p , se siguió el modelo propuesto por Duffie y Beckman².

Las pérdidas de calor ocurren en la parte superior y posterior del colector. Para la mayoría de colectores solares la evaluación de las pérdidas laterales es muy compleja, aunque en general son demasiado pequeñas cuando se utiliza un espesor semejante al de la parte posterior del colector y en ese caso pueden ser despreciadas.

En la figura 10 están representadas las resistencias al flujo de calor en un colector solar con una cubierta transparente.

Las pérdidas por la parte inferior del colector son principalmente por conducción a través del aislante (suponiéndose un flujo unidireccional). El coeficiente de pérdidas por la parte inferior U_p , se expresa como :

$$U_p = \frac{1}{R_1} = \frac{k}{l} \dots \dots \dots (14)$$

donde : R_1 = resistencia por conducción , $\frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{\text{watts}}$

k = conductividad térmica del aislante $\frac{\text{watts}}{m^2 \text{ } ^\circ C}$.

l = espesor del aislante , m

El coeficiente de pérdidas de la parte superior del colector, se ex-

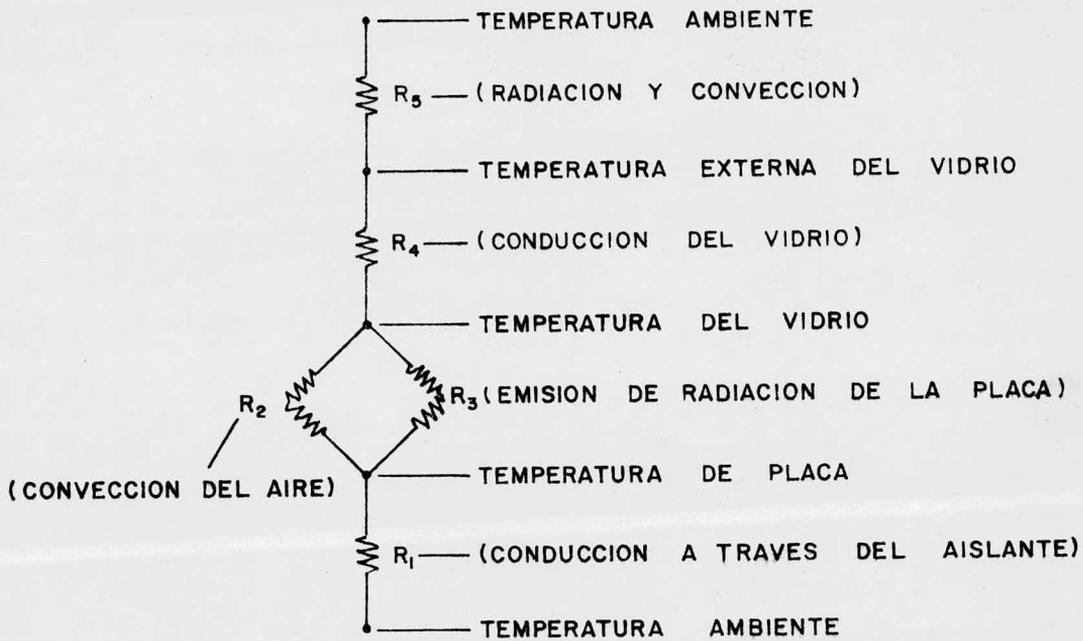


FIGURA 10
 DIAGRAMA DE LAS RESISTENCIAS TERMICAS EN EL COLECTOR SOLAR

presa así :

$$U_s = \frac{1}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \dots \dots \dots (15)$$

La resistencia por convección entre el colector y la cubierta transparente R_2 , es,

$$R_2 = \frac{1}{h_c} \dots \dots \dots (16)$$

donde :

h_c = coeficiente de transferencia de calor por convección
watts/ m² °C

Mediante consideraciones de análisis dimensional, la transferencia de calor entre placas paralelas se correlaciona en la forma siguiente :

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \dots \dots \dots (17)$$

donde :

Nu = número de Nusselt, $\frac{h_c l}{k}$, adimensional

l = distancia entre placas, m

k = conductividad térmica del aire, watts/ m °C

Gr = número de Grashof = $\frac{g y \Delta T \cdot l^3 \rho^2}{\mu}$

Pr = número de Prandtl = $\frac{c_p \mu}{k}$

g = aceleración de la gravedad, m/seg²

y = coeficiente de expansión del aire, °C⁻¹

ρ = densidad del aire, kg/m³

ΔT = diferencia de temperatura entre las placas, °C

c_p = capacidad calorífica del aire, joule/kg °C

μ = viscosidad del aire, kg/ m seg

C, n = constantes determinadas experimentalmente

Todas las propiedades del aire son consideradas para una temperatura media entre las dos placas.

La ecuación 17 puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h_c l}{k} = C (a l^3 \Delta T)^n \dots \dots \dots (17a)$$

donde :

$$a = \frac{g \text{ y } \rho^2 c_p}{\mu k} , m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1} \dots \dots \dots (17b)$$

la cual es una propiedad del aire.

H. Tabor² recomienda para aire con un Pr de 0.7, las siguientes correlaciones:

a) placas horizontales, flujo de calor ascendente, un rango de $10^4 < Gr < 10^7$

$$Nu = 0.168 (Gr Pr)^{0.281} = 0.152 (Gr)^{0.281} \dots \dots \dots (18)$$

b) placas a 45°, flujo de calor ascendente y un rango de $10^4 < Gr < 10^7$

$$Nu = 0.102 (Gr Pr)^{0.310} = 0.093 (Gr)^{0.310} \dots \dots \dots (19)$$

c) placas verticales, $1.5 \times 10^5 < Gr < 10^7$

$$Nu = 0.0685 (Gr Pr)^{0.327} = 0.062 (Gr)^{0.327} \dots \dots \dots (20)$$

d) placas verticales, $1.5 \times 10^4 < Gr < 10^5$

$$Nu = 0.0369 (Gr Pr)^{0.381} = 0.033 (Gr)^{0.381} \dots \dots \dots (21)$$

Despejando de la ecuación 17a queda:

$$h_c = C (ka^n) \frac{\Delta T^n}{1 - 3n} \dots \dots \dots (17b)$$

Para una temperatura media del aire de 10°C, el coeficiente de convección para las correlaciones anteriores se expresa como:

$$a') h_c = \frac{1613 \Delta T^{0.281}}{1^{0.157}} \dots \dots \dots (18a)$$

$$b') h_c = \frac{117 \Delta T^{0.310}}{1^{0.010}} \dots \dots \dots (19a)$$

$$c') h_c = \frac{0.62 \Delta T}{1^{0.019}} \dots \dots \dots (20a)$$

$$d') h_c = \frac{0.57 \Delta T}{1^{-0.193}} \dots \dots \dots (21a)$$

donde l está expresada en cm. y ΔT en °C.

Para una inclinación de 19° (latitud de México D.F.) se obtuvo la siguiente ecuación :

$$h_c = \frac{1.41 \Delta T^{0.293}}{1^{0.121}} \dots \dots \dots (22)$$

Para diferentes temperaturas medias del aire, h_c puede evaluarse como:

$$\frac{h}{\bar{T}} = h_c (1 - 0.0018 (\bar{T} - 10)) \dots \dots (23)$$

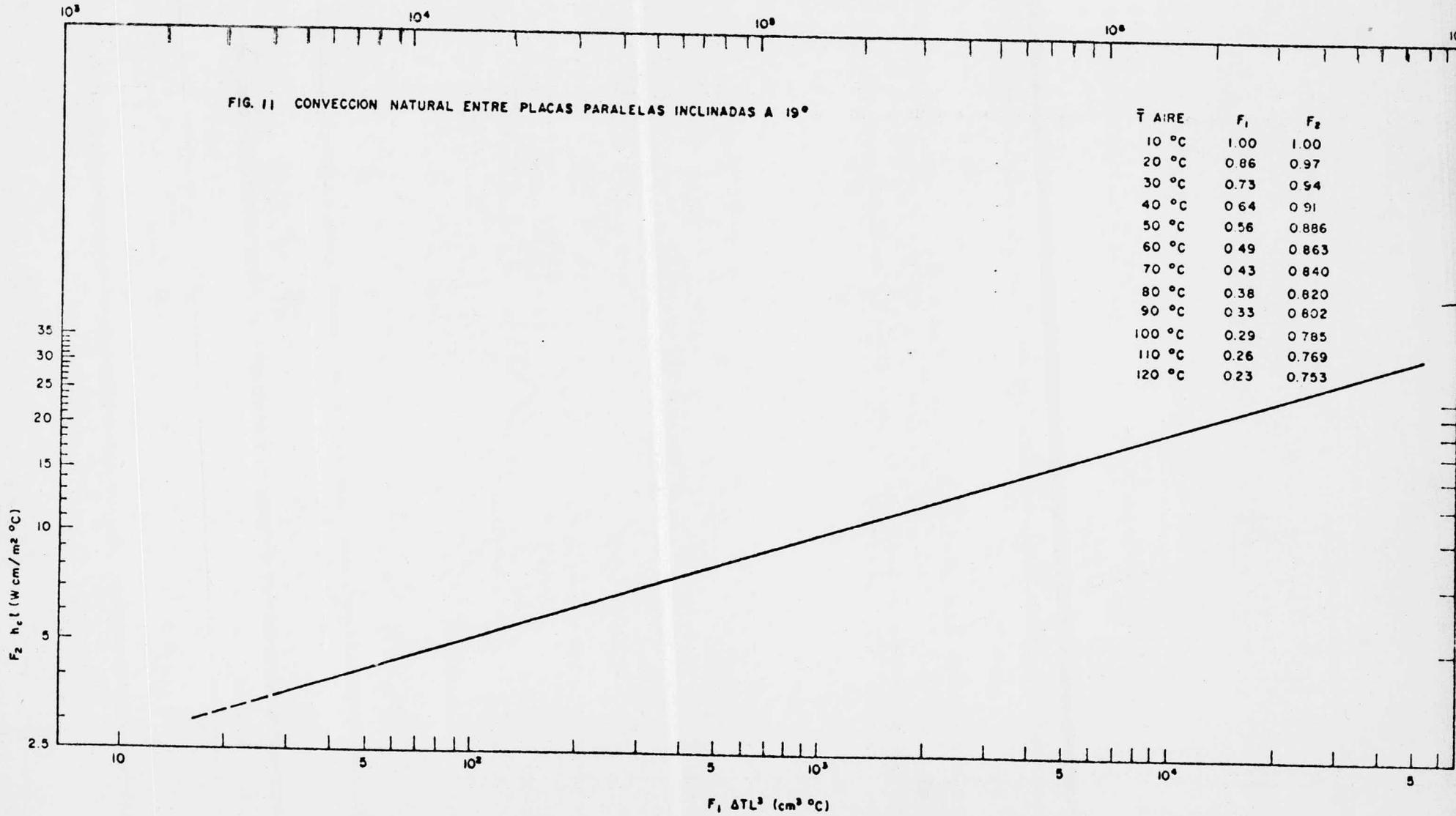
donde \bar{T} es la temperatura media del aire entre las placas superior a 10°C, en °C.

De la figura 11 (referida a una \bar{T} de 10°C) se obtiene: el coeficiente de convección h_c; el número de Nusselt y el número de Grashof a diferentes inclinaciones y distancias entre placa y vidrio.

Para corregir las propiedades del aire a temperaturas mayores de 10°C se introducen dos factores de corrección F₁ y F₂ que varían con la temperatura como lo muestra la figura 11.

NUMERO DE GRASHOF

FIG. 11 CONVECCION NATURAL ENTRE PLACAS PARALELAS INCLINADAS A 19°



El efecto de la variación de la distancia entre placa y vidrio se determina mediante la ecuación 17b., siendo h_c directamente proporcional a $l^{(3n-1)}$. Para los casos de placas horizontales, inclinadas a 19, 45 y 90°, el valor de h_c es proporcional a $l^{-0.157}$, $l^{-0.121}$, $l^{-0.07}$ y $l^{-0.019}$, respectivamente. Duplicando el valor de l se tiene que el coeficiente de convección se reduce en un 10, 8, 5 y 1.3%, respectivamente.

Cabe indicar, que no es conveniente utilizar una l demasiado grande por las sombras que se proyectan al aumentar las paredes laterales del armazón que contiene al colector.

La evaluación de la resistencia por radiación entre el colector y la cubierta transparente R_3 , se determina por medio de la ecuación:

$$R_3 = \frac{1}{h_r} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2) (T_p + T_v)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_v} - 1} \dots \dots (24)$$

donde:

h_r = coeficiente de radiación entre placas, $\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4}$)

T_p, T_v = temperaturas de placa y vidrio $^\circ\text{C}$

ϵ_p, ϵ_v = emisividades de placa y vidrio

La resistencia a la conducción a través de la hoja de vidrio R_4 es:

$$R_4 = \frac{1}{k} \quad \text{en} \quad \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{watts}} \dots\dots\dots (25)$$

donde: l = espesor del vidrio , m
 k = conductividad térmica del vidrio, $\frac{\text{watts}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$

El flujo de calor de la cubierta al medio ambiente , es tanto por convección como por radiación, por lo que:

$$R_5 = \frac{1}{h_v + h_{ar}} \quad \text{en} \quad \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{watts}} \dots (26)$$

y el coeficiente por convección es: $5.7 + 3.8 V$, $\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \dots\dots\dots (27)$

donde V es la velocidad del viento en m/seg. (Fig. 12)

El coeficiente por radiación h_r se calcula así,

$$h_r = \epsilon_v \sigma (T_v + T_a) + (T_v^2 + T_a^2) \dots\dots\dots(28)$$

donde T_a es la temperatura ambiente $^\circ\text{C}$

El coeficiente global de pérdidas del colector se expresa como:

$$U_T = U_p + U_s \quad \text{en} \quad \frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \dots\dots\dots(.29)$$

Las pérdidas de calor del colector Q_p , se evalúan como :

$$Q_p = U_T A (T_p - T_a) \quad \text{en watts} \dots\dots\dots(30)$$

donde,

T_p = temperatura de placa del colector, $^\circ\text{C}$

T_a = temperatura ambiente, $^\circ\text{C}$

Las pérdidas de calor a través del tanque de almacenamiento y de las tuberías Q_{pT} , se efectúan por conducción y convección. Estas pueden evaluarse mediante la siguiente relación:

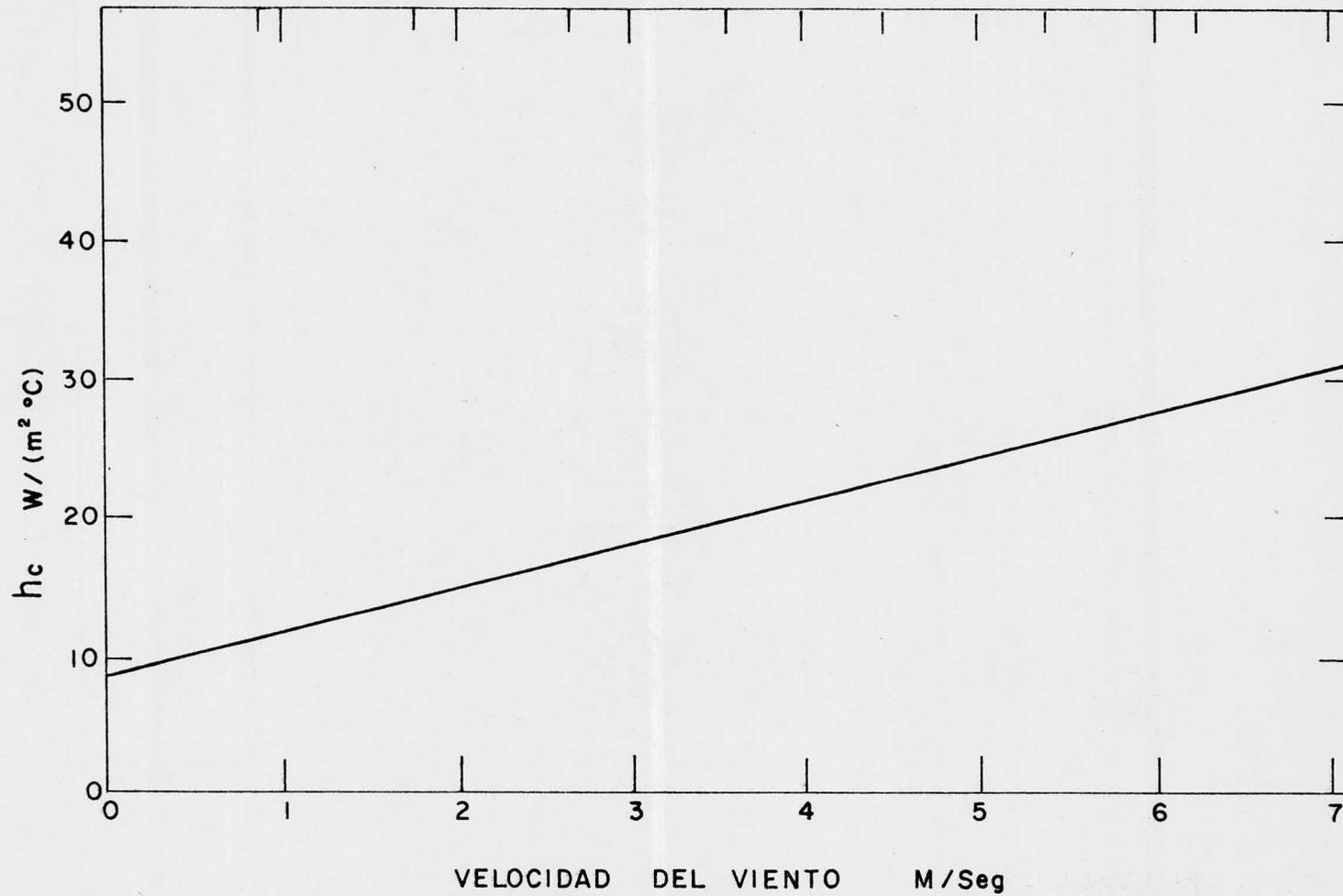


FIG. 12 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION PARA UN COLECTOR SOLAR EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

$$Q_{PT} = U_{PT} A_T (\bar{T}_A - T_a) \dots \dots \dots (31)$$

donde: Q_{PT} : pérdidas de calor, watts

U_{PT} = coeficiente global de la parte del sistema considerada $\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

A_T = área de transmisión de calor, m^2

\bar{T}_A = temperatura media del agua en la parte considerada $^\circ\text{C}$

El coeficiente global U_{PT} se evalúa como :

$$U_{PT} = \frac{1}{R_v + R_i + R_c} \dots \dots \dots (32)$$

La resistencia por convección R_v están función de la velocidad del viento, como lo indica la ecuación 27.

En los tubos de conexión entre el tanque y el colector, la resistencia por conducción R_c , se expresa así:

$$R_c = \frac{D_{ea}}{2} \left[\frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{k_t} + \frac{\ln \frac{D_{ea}}{D_i}}{k_a} \right] \text{ en } \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{watts}} \dots (33)$$

donde:

D_{ea} : diámetro externo del aislante ,m

D_e : diámetro externo del tubo, m

D_i : diámetro interno del tubo, m

k_t : conductividad térmica del tubo, $\frac{\text{watts}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$

k_a : conductividad térmica del aislante $\frac{\text{watts}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$

Para el tanque de almacenamiento, la resistencia por conducción es,

$$R_c = \frac{1}{k} \dots \dots \dots (34)$$

donde:

l = espesor del aislante, m

k = conductividad térmica del aislante, $\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

La resistencia interna del agua⁷ tiene un valor mínimo de 0.0020 m² °C / watts.

La energía almacenada por unidad de tiempo en el sistema Q_a (en watts) se determina así:

$$Q_a = \frac{m c_p \Delta T}{t} \quad \text{en watts} \dots \dots \dots (36)$$

donde:

m: masa de agua en el tanque, g

c_p: capacidad calorífica del agua, $\frac{\text{joule}}{\text{g } ^\circ\text{C}}$

t: tiempo, seg

Todos los parámetros que influyen en el diseño de un colector solar se relacionan por un factor de eficiencia F_R, que depende principalmente de las características de diseño, de la masa velocidad G, de la capacidad calorífica del fluido y del coeficiente global de pérdidas de calor U_T.

Este factor se expresa como :

$$F_R = \frac{G C_p}{U_T} (1 - e^{-(F' U_T / G C_p)}) \dots \dots \dots (37)$$

El factor de eficiencia F_R es de gran utilidad en el diseño de colectores debido a que las condiciones de operación (temperaturas, radiación solar y velocidad del viento) tienen una influencia mínima:

F' es un factor que se evalúa por las características del colector.

Para el colector analizado en el presente trabajo, se expresa como:

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_T}{h + \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{1}{h_r}}}} \dots \dots \dots (38)$$

donde:

h : coeficiente de convección entre el agua y la superficie metálica del colector $\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

h_r : coeficiente de radiación de la superficie metálica de colector, $\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

Por medio de estos dos factores se pueden establecer comparaciones de eficiencia entre diferentes tipos de colectores.

El calor útil del colector, considerando F_R , se expresa como:

$$Q_u = A F_R \left[H (\tau \alpha)_e - U_T (T_e - T_a) \right] \text{ en watts . (39)}$$

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION DEL COLECTOR SOLAR

El colector en sí, esta construído de materiales con alta conductividad térmica, como son :

MATERIAL	k, watts / m °C
Fierro	60
Aluminio	211
Cobre	385

Las cubiertas pueden ser de vidrio o de plástico. El vidrio ha sido usado con mayor éxito en aplicaciones solares: Sus propiedades de transmisión selectiva de la radiación solar y su resistencia a la intemperie, contrarrestan el peso y la fragilidad que le son características. (Fig 13)

La transmisión en el vidrio se ve altamente afectada por su composición química. Cuando contiene una gran concentración de fierro su canto es de color verdoso. En sí el mejor vidrio para propósitos de captación de la energía solar es el incoloro.

El vidrio común para ventanas tiene la siguiente formulación:

SiO_2	72.8- 73.0 %
CaO	8.5- 8.9
MgO	3.4 - 3.5
NaO, K_2O	13.1 - 13.3
Al_2O_3 , TiO_2 , SO_3	1.2- 1.4
Fe_2O_3	0.15

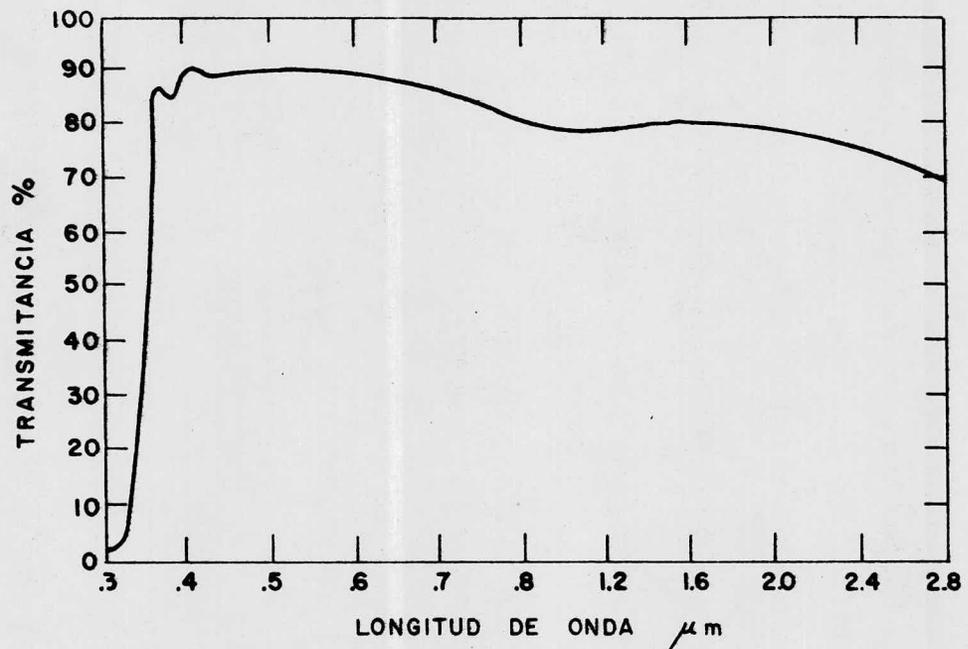


FIG. 13 TRANSMITANCIA ESPECTRAL DE UNA CUBIERTA DE VIDRIO TEMPLADO DE 3 mm DE ESPESOR

De estos constituyentes, el contenido de fierro expresado en porcentaje de óxido férrico es de particular importancia en la transmisión espectral, especialmente en el rango del infrarrojo. Algunas formulaciones típicas para vidrio con absorción variable en el infrarrojo son las siguientes:

SiO ₂	71.9 - 72.2 %
CaO	11.1 - 11.2
MgO	2.0 - 2.1
N ₂ O	13.7 - 13.8
Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SO ₃	0.6 - 0.8
	0.03
Fe ₂ O ₃	0.12
	0.48

Para el más bajo porcentaje de fierro (0.03%), la transmisividad se eleva a más del 90% en la región cercana al ultravioleta; se mantiene alta y uniforme entodo el visible, y aceptable en las regiones infrarrojas, disminuyendo pronunciadamente hasat casi 2.7 micras, hasta alcanzar el valor de cero, es decir, opaco a partir de 4.5 micras.

El rango del infrarrojo corresponde a las radiaciones reemitidas por las superficies absorbentes de los colectores solares, a temperaturas de operación. Como el vidrio es opaco en ese rango la radiación es reflejada nuevamente al colector, disminuyendo sensiblemente las pérdidas caloríficas (p.e. la radiación de una fuente a 38°C tiene su máxima intensidad a 9.3 micras).

Al aumentar el espesor del vidrio disminuye su transmisividad principalmente en la región del ultravioleta y el cercano infrarrojo.

La transmisividad del vidrio está en función del ángulo de incidencia de los rayos solares.

En los últimos años se han desarrollado plásticos con propiedades específicas para su uso en equipos de captación de energía solar. Estos se caracterizan por notables mejoras en sus propiedades mecánicas, en su resistencia a la intemperie y su buena transmisividad.

El Teflón, el Mylar W y el Tedlar son polímeros que han comprobado tener propiedades aceptables para su uso en aplicaciones de energía solar.

La vida útil de estos plásticos varía entre 3 años para el Mylar hasta 20 años en el Teflón.

Algunos de los plásticos más comunes como el polietileno, acetato de celulosa, cloruro de polivinilo y poliestireno, presentan inconvenientes por su corta vida a la intemperie y elevado costo descartándose para su uso en energía solar.

Superficies Selectivas

La eficiencia de los colectores solares se ve aumentada al hacer uso de recubrimientos con alta absorptividad a la radiación solar y baja emisividad de radiación en el rango de longitudes de onda del infrarojo a temperaturas de operación.

Se ha observado que películas delgadas ennegrecidas, generalmente óxidos, colocados sobre metales pulidos son altamente selectivos de la radiación solar.

Tabla 1. Superficies Selectivas².

	absortividad, α	emisividad, ϵ
Níquel negro,		
sobre fierro	0.89	0.12
Cobre negro,		
sobre cobre	0.89	0.17
Oxidos de Hierro		
sobre acero pulido	0.93	0.21
CuO, sobre aluminio	0.93	0.11
CuS, sobre cobre	0.72	0.18

La cantidad de energía emitida por un cuerpo, puede ser calculada por medio de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_r = \epsilon \sigma T^4 \dots \dots \dots (40)$$

donde T es la temperatura del cuerpo en °K.

Con el objeto de comparar la cantidad de energía desprendida de -

dos superficies con diferentes emisividades, puede calcularse fácilmente que si la emisividad en una de ellas es de 0.90 (pintura negra mate) a una temperatura de 50°C, la cantidad de calor radiado es de 555 watts/m² mientras que si a la misma temperatura la emisividad es de 0.10 (superficie selectiva), la cantidad de calor emitida es de t n solo 62 watts/m².

Aislamiento

Es de vital importancia para cualquier sistema de calentamiento solar de agua reducir las pérdidas de calor, principalmente por convección y radiación. Esto puede lograrse mediante un buen aislamiento en la parte posterior del captador, en los tubos de entrada y salida del mismo, y en el tanque de almacenamiento de agua.

Tabla 2. Conductividades térmicas de aislantes

Material	k, watts/m °C
Lana Mineral	0.034
Poliestireno expandido	0.034
Corcho	0.041
Maderas:	
Pino	0.138
Roble	0.160
Fibra de vidrio	0.036
Aserrín	0.058
Fieltro	0.039
Paja	0.058

Corrosión

Los metales ofrecen grandes ventajas como materiales de construcción en colectores solares por su resistencia mecánica y altas conductividades térmicas. Sin embargo, un fenómeno que frecuentemente es ignorado o subestimado en los sistemas de calentamiento solar de agua es la corrosión, resultante de la interacción entre el fluido de trabajo con la superficie interna de los tubos del sistema o por la acción de diferentes agentes de intemperismo (contaminantes y humedad). La corrosión reduce la vida de servicio del sistema y por ende, debe ser un factor de importancia al seleccionar los materiales de construcción del mismo.

La superficie externa de la placa colectora se acostumbra recubrir con una pintura negra mate o de una película selectiva. Esto en algunos casos puede inducir, la corrosión; sobretodo si el recubrimiento tiene grietas o si su adhesión no es firme. La corrosión ocurre también si la película selectiva se compone de algún metal menos activo que el de la placa colectora (corrosión galvánica).

Respecto a la calidad del agua, ésta es importante ya que de contener oxígeno libre, dióxido de carbono o sales puede acelerar notablemente la corrosión, así como el pH del fluido.

Cuando existe la unión de metales disímiles, sucede que el metal más noble (menos activo) actúa como cátodo, quedando así protegido por el metal menos noble (más activo), el cual se consume

RAPIDEZ DE CORROSION

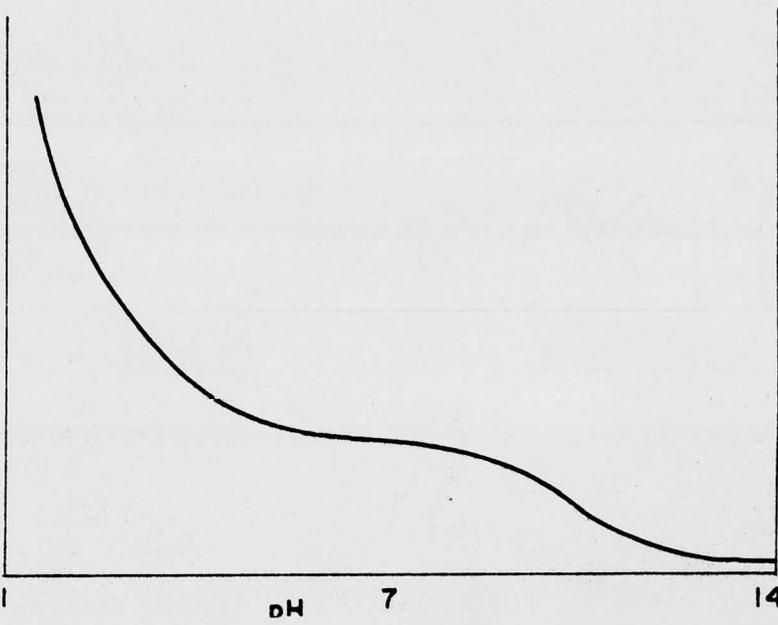
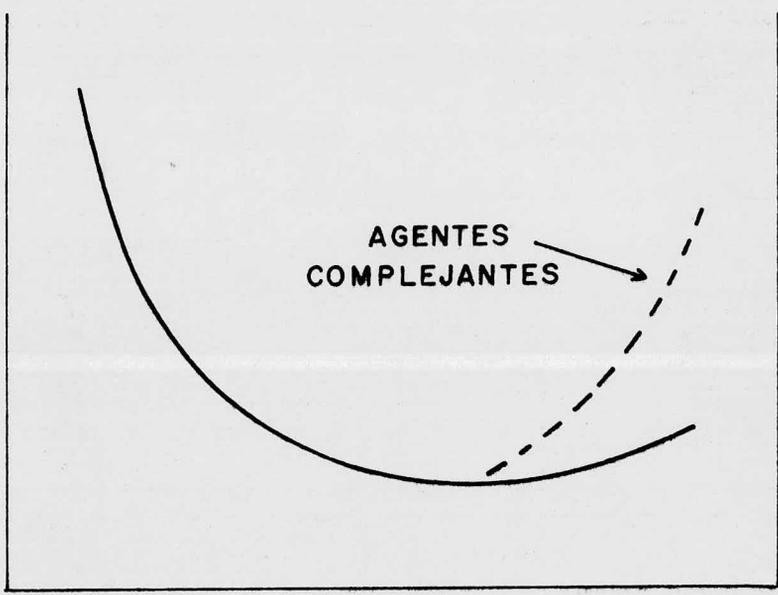
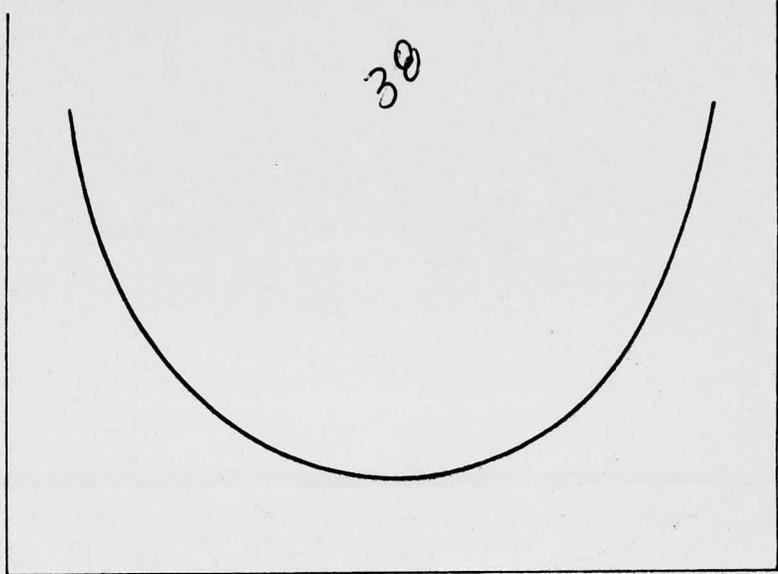


FIG. 14

paulatinamente. Aún cuando sólo haya un metal presente, llega a suceder que algunos puntos de su superficie se convierten en centros anódicos los cuales son químicamente más reactivos que otros puntos adyacentes (centros catódicos). Esto se produce debido a esfuerzos mecánicos o a pequeñas variaciones en la composición química del material.

En la figura 14, se muestra la influencia del pH del fluido circulante en la rapidez de corrosión⁸.

En el caso del aluminio el pH correspondiente a una corrosión mínima de 6.5 . En medios ácidos, la capa de óxidos que cubre al metal llega a ser más soluble y en medios alcalinos se promueve la formación de iones complejos.

Con el cobre sucede algo similar, sólo que el pH óptimo es de 7.0 .

Para el fierro, la solubilidad de los agentes corrosivos disminuye notablemente a un pH de 14.

Ante el fenómeno de corrosión deben hacerse las siguientes consideraciones:

- a) Evitar el contacto entre metales diferentes (efecto galvánico)
o de ser posible utilizar un sólo metal en todo el sistema.
- b) La adición de inhibidores Ejemplos de inhibidores anódicos:
cromatos, $K_2Cr_2O_7$, $Na_2Cr_2O_7$, Na OH, Na_2CO_3 , fosfatos y silicatos. Como inhibidores catódicos: sulfito de sodio e hidrazina.

INSTALACION DEL SISTEMA

Para un funcionamiento satisfactorio del calentador solar es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) que la inclinación y orientación del colector solar sean las óptimas,
- b) que la base del tanque de almacenamiento de agua se encuentre a mayor altura que el extremo superior del colector,
- c) que la longitud de los tubos de conexión entre colector y tanque sea la mínima,
- d) y que el tubo de agua caliente proveniente del captador tenga el nivel adecuado respecto del fondo del tanque.

Inclinación y Orientación del Colector Solar

La cantidad de radiación solar incidente sobre el colector depende de su orientación y de su inclinación respecto a la trayectoria -- del sol. (Fig. 15, 16 y 17)

Morse y Czarnecki² recomiendan un ángulo de inclinación de 0.9 veces la latitud del lugar, así como un ángulo acimutal de 0° o sea orientado hacia el sur (en el hemisferio norte), para obtener la máxima radiación directa anual. Estas recomendaciones son válidas desde el punto de vista geométrico de la componente directa de la radiación solar y no incluye la componente difusa de la misma. Por lo tanto para considerar a esta componente, habrá que tomar en cuenta la distribución local de la nubosidad.

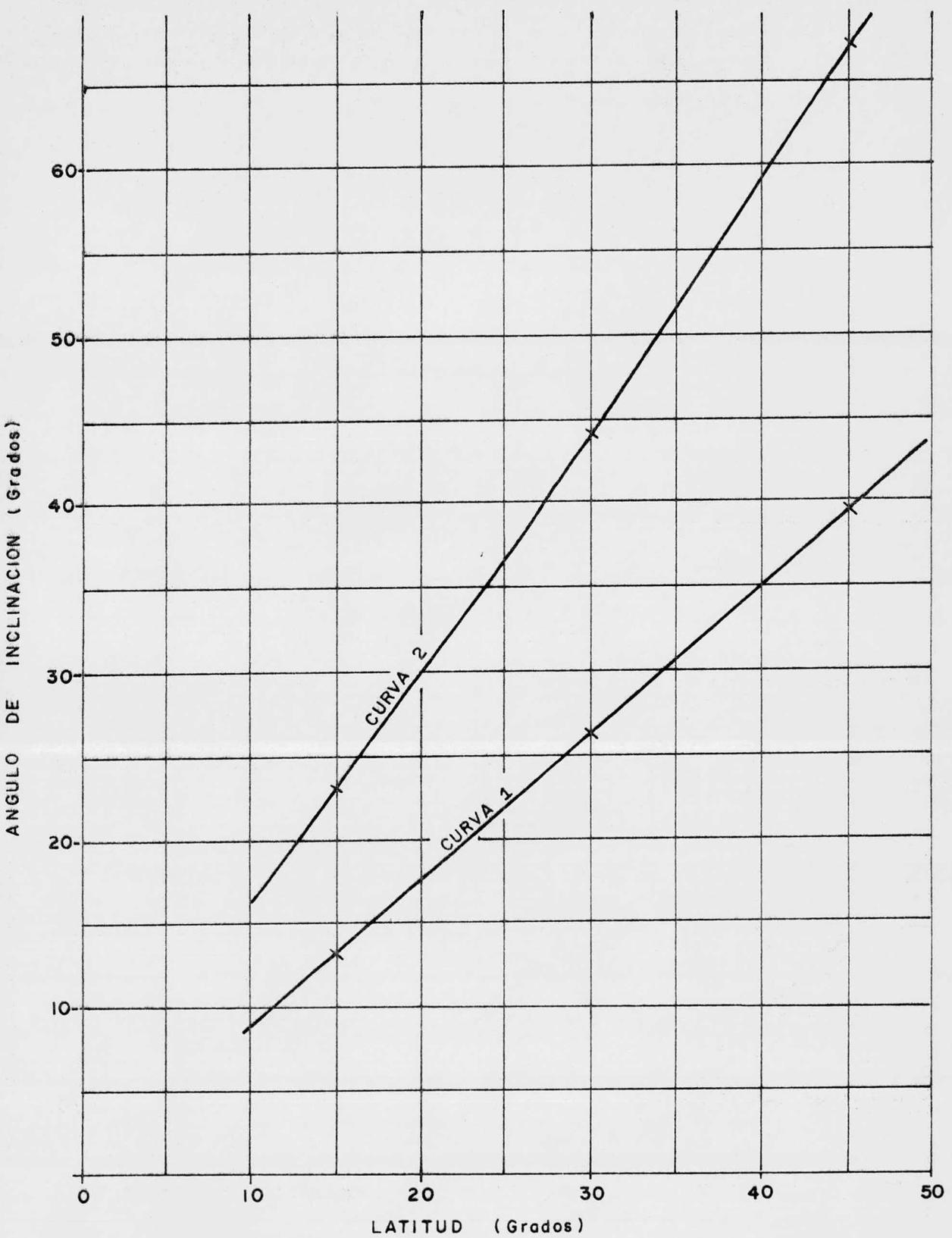


FIG. 15.- CURVA 1. ANGULO DE INCLINACION PARA LA MAXIMA INSOLACION ANUAL
CURVA 2. ANGULO DE INCIDENCIA PARA OBTENER IDENTICA INSOLACION PARA LOS SOLSTICIOS DE VERANO E INVIERNO

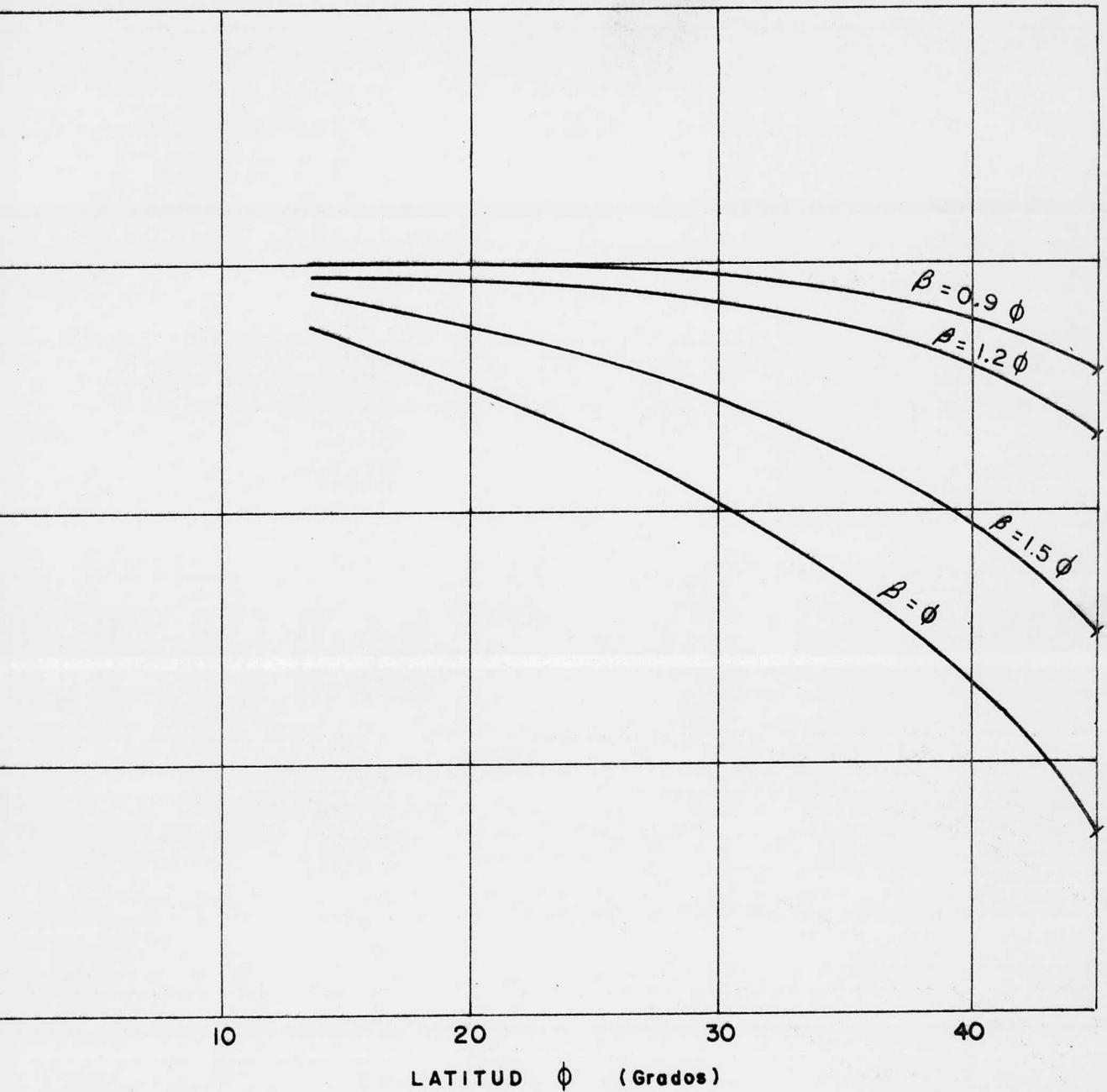
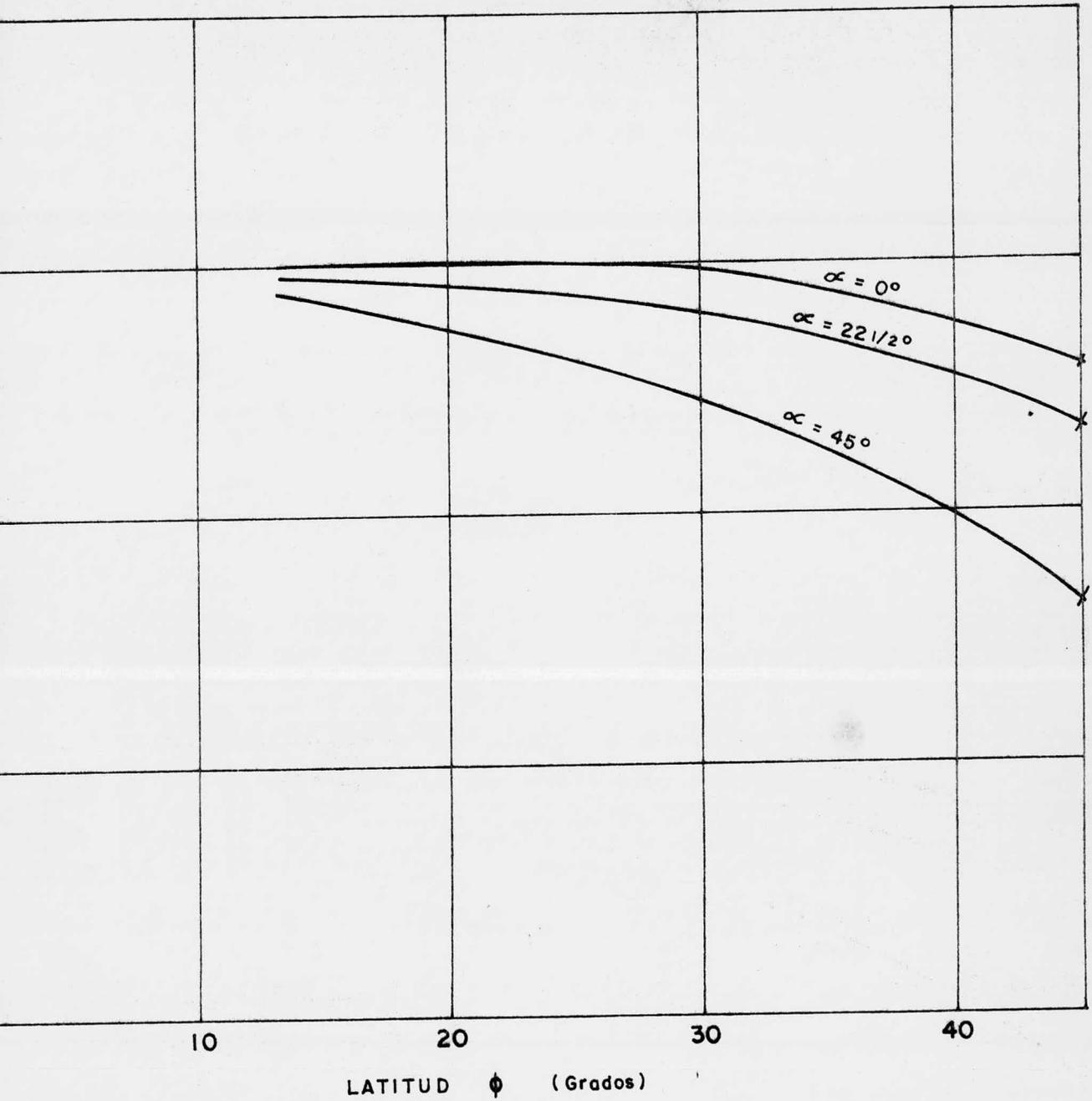


FIG. 16.- INSOLACION ANUAL RELATIVA SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS ORIENTADAS HACIA EL SUR A DIFERENTES INCLINACIONES β .



17.- INSOLACION ANUAL RELATIVA SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS A $\beta = 0.9\phi$ ORIENTADAS HACIA EL ECUADOR A DIFERENTES ANGULOS ACIMUTALES α

Altura entre el tanque y el colector solar

Se recomienda una distancia mínima de 60cm⁵. entre el extremo superior del colector y el nivel del tubo de salida de agua fría del tanque de almacenamiento.

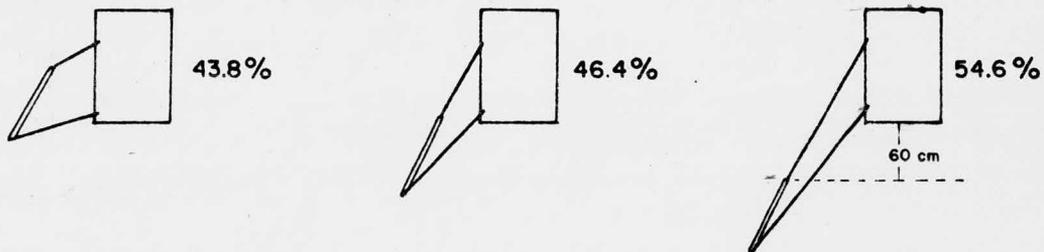


FIG. 18. INFLUENCIA DE LA ALTURA ENTRE EL TANQUE Y EL COLECTOR, SOBRE LA EFICIENCIA PROMEDIO

Longitud de los tubos de conexión

La longitud de los tubos de conexión entre el colector y el tanque de almacenamiento debe ser la mínima teniendo cuidado de evitar cambios bruscos de dirección, con esto se trata de disminuir la caída de presión en el sistema.

Altura entre el tanque y el tubo de agua caliente

Es común conectar el tubo de agua caliente cerca de la parte alta del tanque, generalmente a una altura igual a las 2/3 partes del mismo⁵. De tal forma que la cabeza de agua sea la máxima y también, la estratificación del agua en el tanque de almacenamiento sea mayor, manteniendo así un gradiente de temperatura mayor.

Equipo Experimental

COLECTOR SOLAR

El colector solar es del tipo plano de tubos paralelos con una superficie de captación de 0.69 m^2 . Está formado de 28 tubos de fierro de sección rectangular, con las siguientes dimensiones :

base	2.6 cm.
altura	1.3 cm.
largo	77.5 cm.
espesor	1.35 mm.

La parte expuesta al sol del conjunto de tubos del colector fué recubierta de pintura negro mate (Ken Enamel), con una absorptividad de 0.90 y capaz de soportar temperaturas hasta de 120°C .

A los extremos del colector fueron soldados dos tubos, con las siguientes medidas:

diámetro exterior	6.0 cm.
largo	73.5 cm.
espesor	4.0 mm.

Por uno de ellos entraba al colector agua fría proveniente del tanque de almacenamiento y por el otro salía agua caliente hacia el tanque nuevamente, cerrándose así el circuito.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

La energía transferida al fluido en forma de calor sensible, fué almacenada en un tanque aislado térmicamente. (Fig. 19)

La unidad de almacenamiento consiste de un tanque de fierro (altura 53cm., diámetro interior 38 cm.) con una capacidad de 55 litros de agua y recubierto en su interior con una pintura anticorrosiva.

Los tubos de conexión entre el colector solar y el tanque de almacenamiento son de fierro galvanizado de 21 mm. de diámetro exterior con una longitud total de 5.60 m.

CALENTADOR DE AGUA A CIRCULACION NATURAL

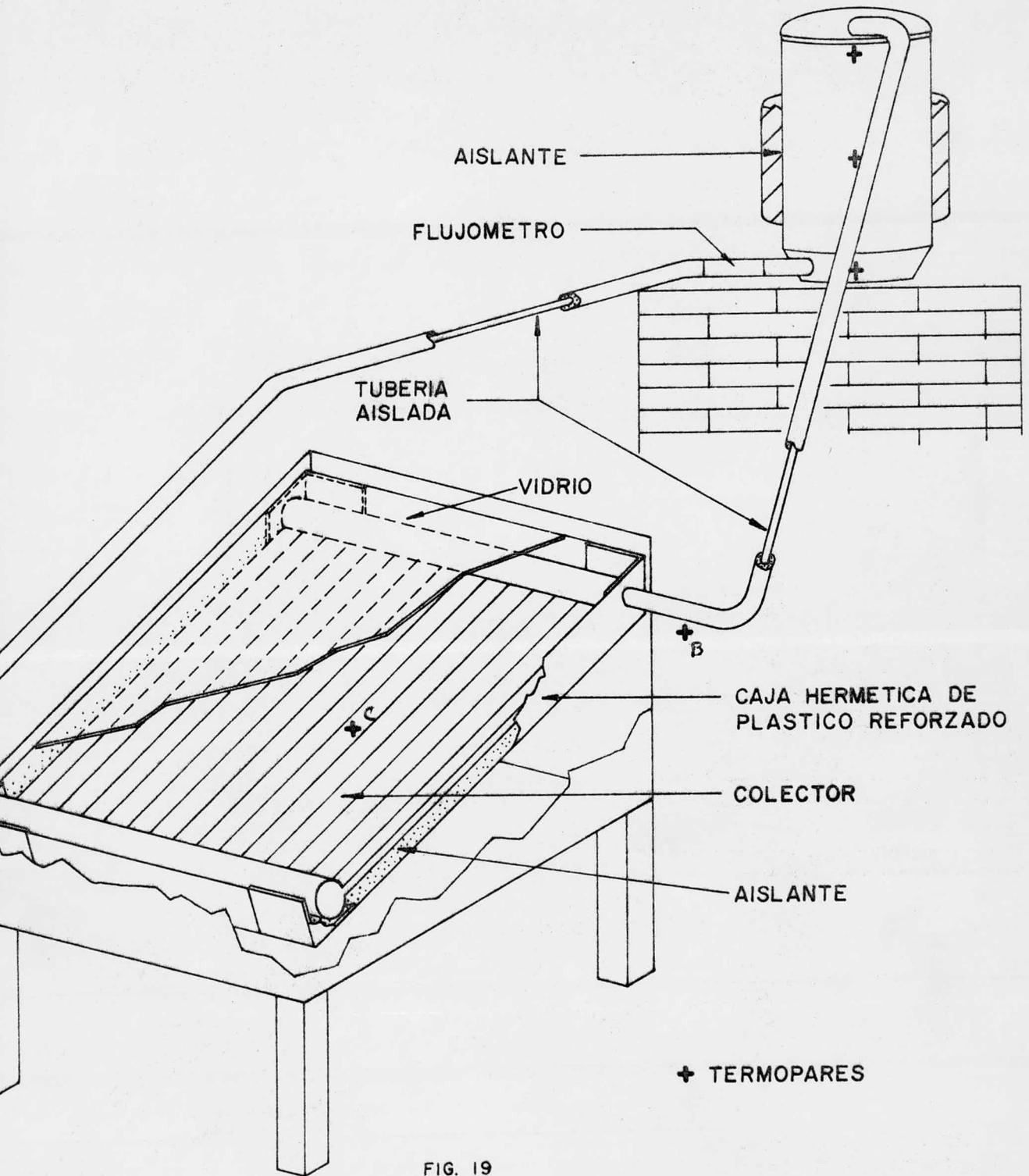


FIG. 19

Cubierta Transparente

Con el fin de disminuir las pérdidas por convección y radiación del colector, se colocó una cubierta de vidrio a una distancia de 3 cm. de placa colectora con las siguientes especificaciones:

largo	96 cm
ancho	80 cm
espesor (l)	3 mm
índice de refracción	1.53
coeficiente de extinción (K)	0.165 cm ⁻¹
Kl	0.05
reflectividad ρ	0.0434 a 0°

Aislamiento

Entre la placa colectora y el fondo de la base del armazón se colocó como aislante colchoneta de fibra de vidrio con las siguientes características:

$$k = 0.036 \text{ watt/m } ^\circ\text{C}$$
$$l = 0.10 \text{ m}$$

La parte inferior del armazón fué recubierta exteriormente con fibra de vidrio, de las mismas características que la anterior.

El fondo del tanque de almacenamiento fué aislado con una capa de Gránulos de poliestireno. En su superficie lateral se recubrió con fibra de vidrio, así como en su parte superior (espesor) .0. 10 m)

Para proteger el aislamiento del tanque de almacenamiento de agua este se colocó dentro de un tinaco de asbesto.

Para los tubos de conexión entre el tanque y el captador se utilizó como aislante fibra de vidrio con las siguientes especificaciones:

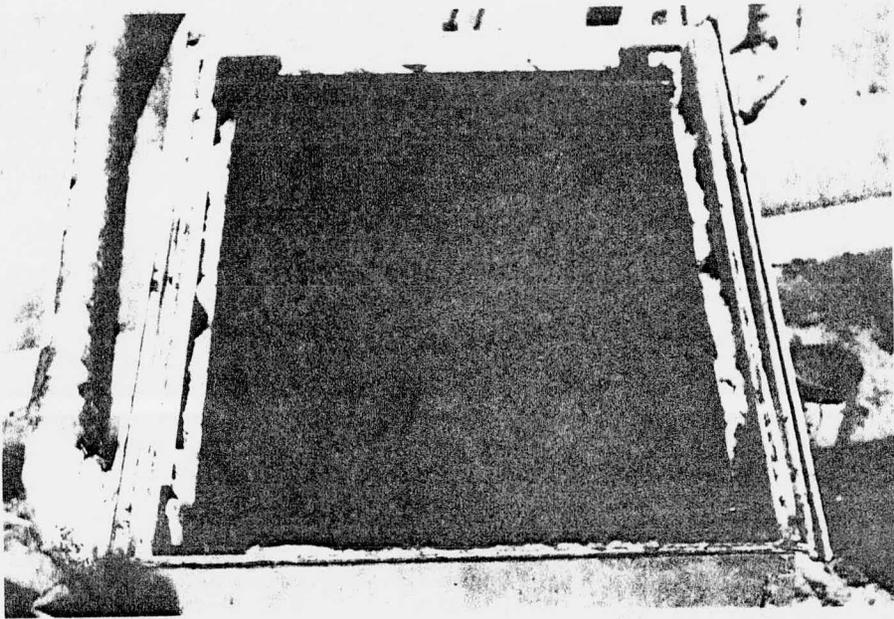
$$k = 0.032 \frac{\text{watts}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$l = 2.54 \text{ cm}$$

$$\text{densidad} = 88 \text{ kg/m}^3$$

Armazón

El armazón que contiene al colector (aislado térmicamente) fue construido con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio.



COLECTOR SOLAR EXPERIMETAL

INSTRUMENTACION

Medición de la Radiación Solar

Los datos de radiación solar global (directa más difusa) se registraron mediante dos sensores piranométricos Kipp & Zonnen conectados a un multímetro digital (Keithley).

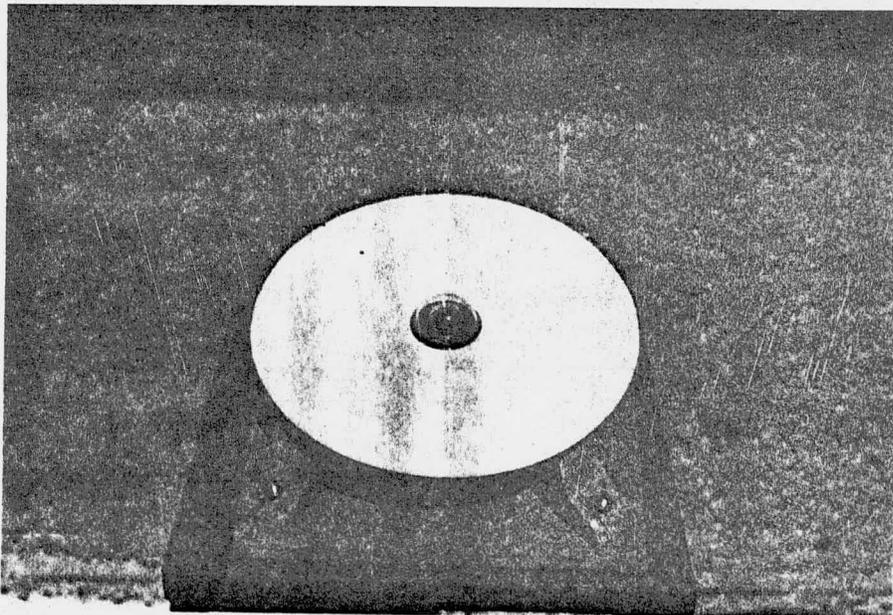
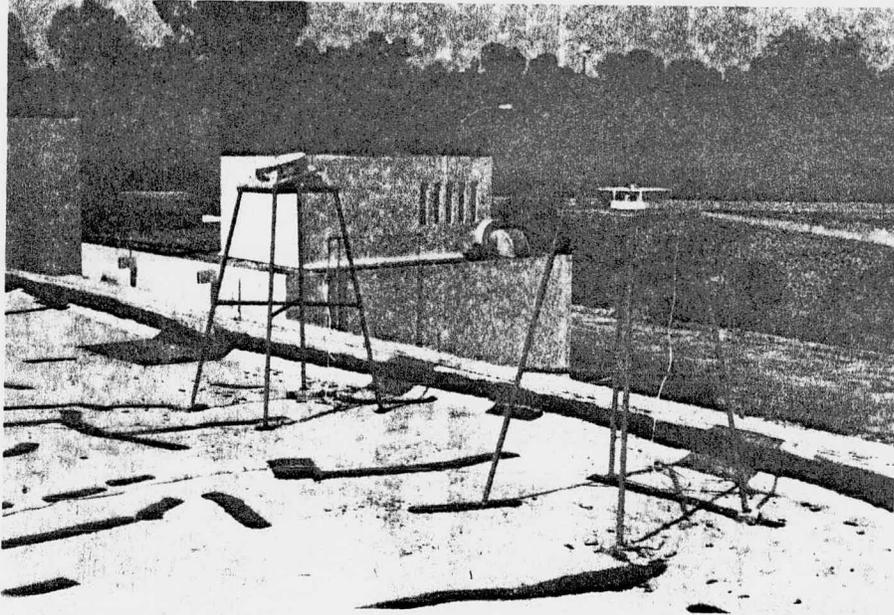
Uno de los piranómetros, fué colocado en posición horizontal y el otro inclinado hacia el sur geográfico, con un ángulo igual al del colector (19°).

Medición de las Temperaturas

La medición de temperaturas en el sistema se realizó mediante termopares de cobre-constantano. Las temperaturas del agua a la entrada y salida del colector, fueron medidas mediante dos termopares insertados en los puntos A y B como se muestra en la figura 19. Con el objeto de evitar fugas en estos puntos se aplicó un sellador de silicón (Dow Corning 781) con excelentes características de impermeabilidad, resistencia a la temperatura de operación (10 a 80°C), así como a la intemperie. Para registrar la temperatura de la placa se insertó un tercer termopar, (soldado a una plaquita de cobre) entre las paredes laterales de dos de los tubos centrales del colector. Dos termopares midieron las temperaturas externa e interna del vidrio.

Se colocaron, en el tanque de almacenamiento de agua, termopares a tres diferentes niveles como se aprecia en la figura 19.

Mediante el multímetro anteriormente citado se tomaron cada 15 minutos las lecturas de temperatura con una precisión del orden del 1%.



PIRANOMETROS

Medición de Flujo

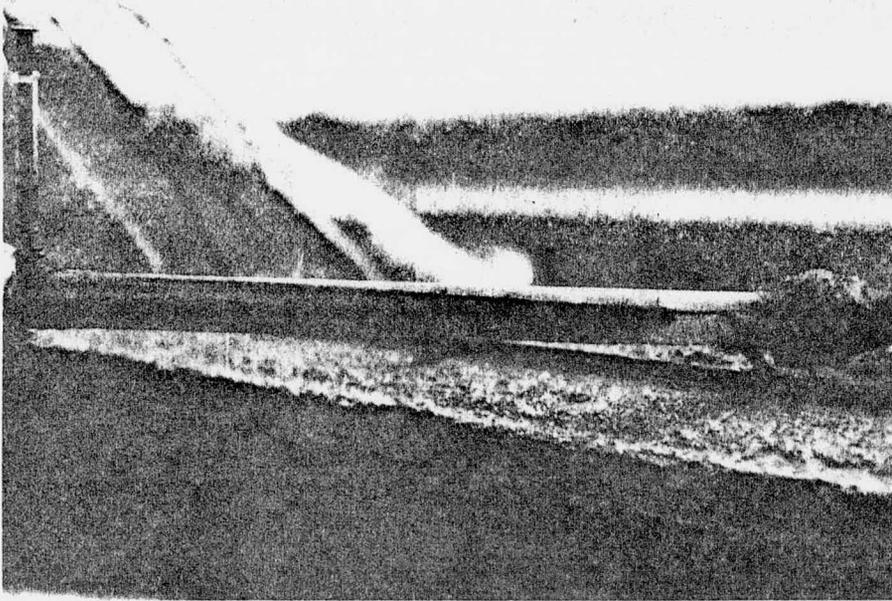
Con el objeto de medir el flujo de agua circulante, se empleó un medidor como se aprecia en la siguiente fotografía. En ella se puede observar que en una sección del tubo de entrada del colector se colocó un tubo de vidrio a través del cual, se inyectó en la parte media de la sección transversal, un colorante que seguía las líneas de corriente del fluido. De esta manera se obtuvo la velocidad máxima de desplazamiento.

Como los flujos eran laminares, se tiene que la velocidad promedio en ductos de sección circular se expresa como:

$$\bar{v} = 0.5 v_{\max}$$

La ventaja de utilizar un medidor de este tipo consiste esencialmente en minimizar las pérdidas de presión.

Las lecturas del gasto se efectuaron cada media hora.



MEDIDOR DE FLUJO

RESULTADOS

La experimentación del calentador solar se realizó en los meses de octubre y noviembre de 1976. Durante períodos continuos de 10 horas se tomaron lecturas de los siguientes parámetros: a) temperaturas en el colector solar (entrada, salida y placa) y en el tanque de almacenamiento (partes: alta, media y baja); b) temperatura ambiente; c) temperatura del vidrio; d) gasto del fluido y e) radiación solar (captada horizontalmente y a una inclinación igual a la del colector).

Las temperaturas alcanzadas por el agua a la salida del colector - fueron hasta de 65°C. Las temperaturas medias del agua en el tanque - fluctuarón entre 45 y 55°C al final del día.

Para cuantificar el efecto del flujo inverso nocturno sobre la temperatura media del tanque; se agitó el agua contenida en éste, al final del día y principio de la mañana siguiente. Se pudo observar que hubo - una disminución en esta temperatura entre 5 a 8°C durante la noche -'

Para examinar como influye en la termocirculación del sistema el - efecto de extracción de agua caliente y suministro simultáneo de agua - fría se observaron las fluctuaciones de temperaturas y gastos en el sistema.

Se apreció que el promedio aritmético de las temperaturas de entrada y salida del agua del colector, cuando las condiciones del sistema, tanto de radiación como de flujo eran más o menos constantes (alrede--dor del mediodía) resultó ser semejante a la temperatura de la placa - del colector.

Durante días despejados y claros se alcanzó un gasto máximo de -
500 cm³/min.

Por medio de dos piranómetros se registraron simultáneamente los
datos de radiación solar global captados sobre un plano horizontal y
sobre un plano cuya inclinación fué de 19°.

Durante los días despejados en que operó el sistema se obtuvo --
que la energía captada sobre el plano inclinado fué hasta un 22.5% -
mayor que la captada sobre el plano horizontal.

El valor del factor de eficiencia F_R fluctuó entre .92 y .94. -
Las eficiencias alcanzadas por el colector al mediodía, tuvieron un -
valor máximo de 68%.

Haciendo uso de un modelo matemático se compararon los resulta--
dos experimentales. Como datos de entrada de este modelo se utiliza--
ron las especificaciones del captador y los siguientes datos experimen--
tales:

- a) temperatura de entrada del agua del colector, °C
- b) temperatura ambiente, °C
- c) velocidad del agua en el colector, m/seg
- d) masa velocidad del fluido, g/m² seg
- e) radiación solar global, watts/m²

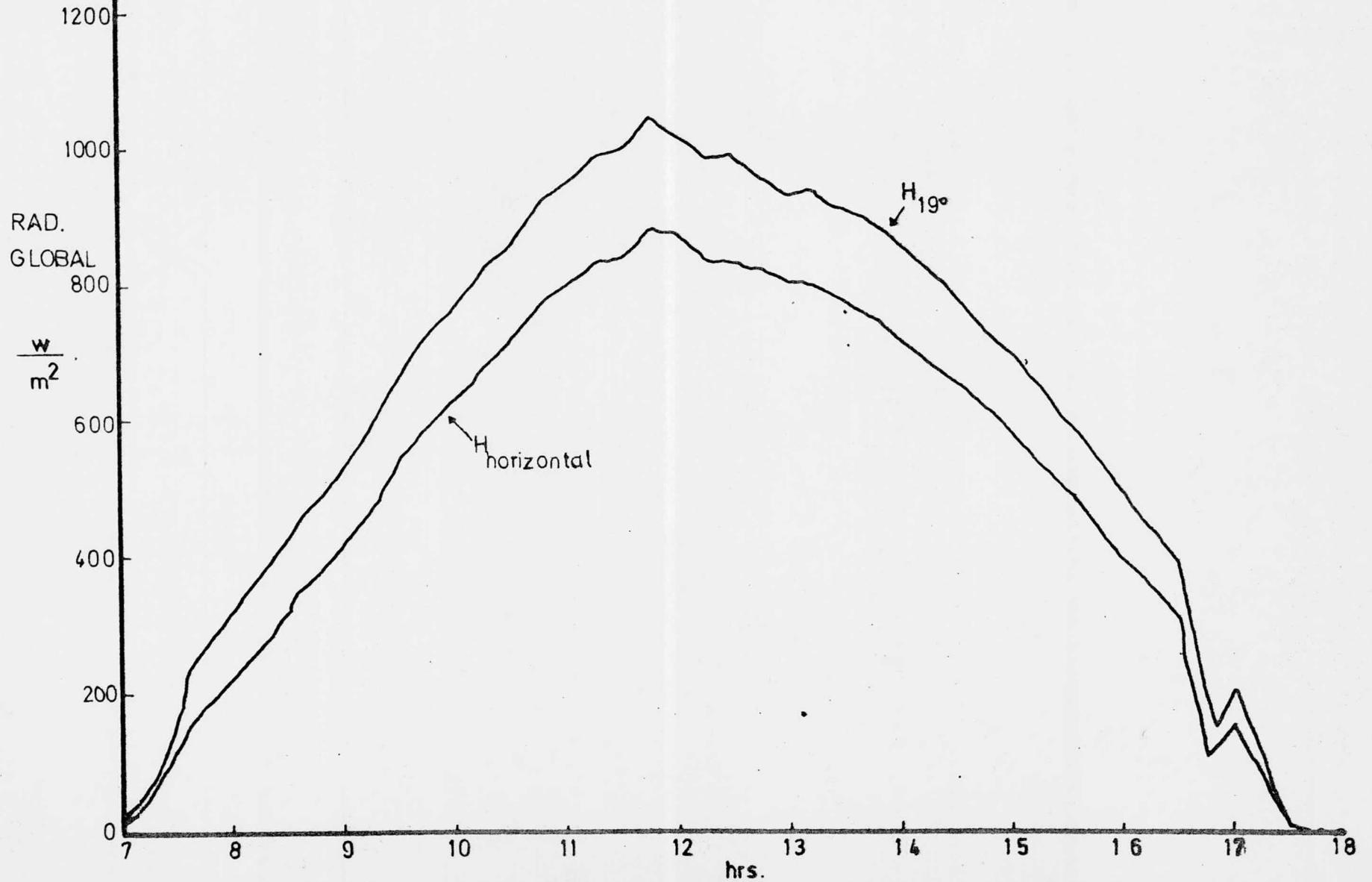
Los resultados teóricos computados mediante este modelo fueron -
los siguientes:

- a) temperatura de placa, °C
- b) temperatura de salida del agua del colector, °C

- c) temperatura del vidrio, °C
- d) coeficientes de pérdidas por radiación, convección y conducción del colector, $\text{watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- e) coeficiente global de pérdidas de calor del colector, $\text{watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- f) factores de eficiencia, F' y F_R .
- g) eficiencia.

La diferencia global entre los resultados teóricos y experimentales fué del orden del 10%.

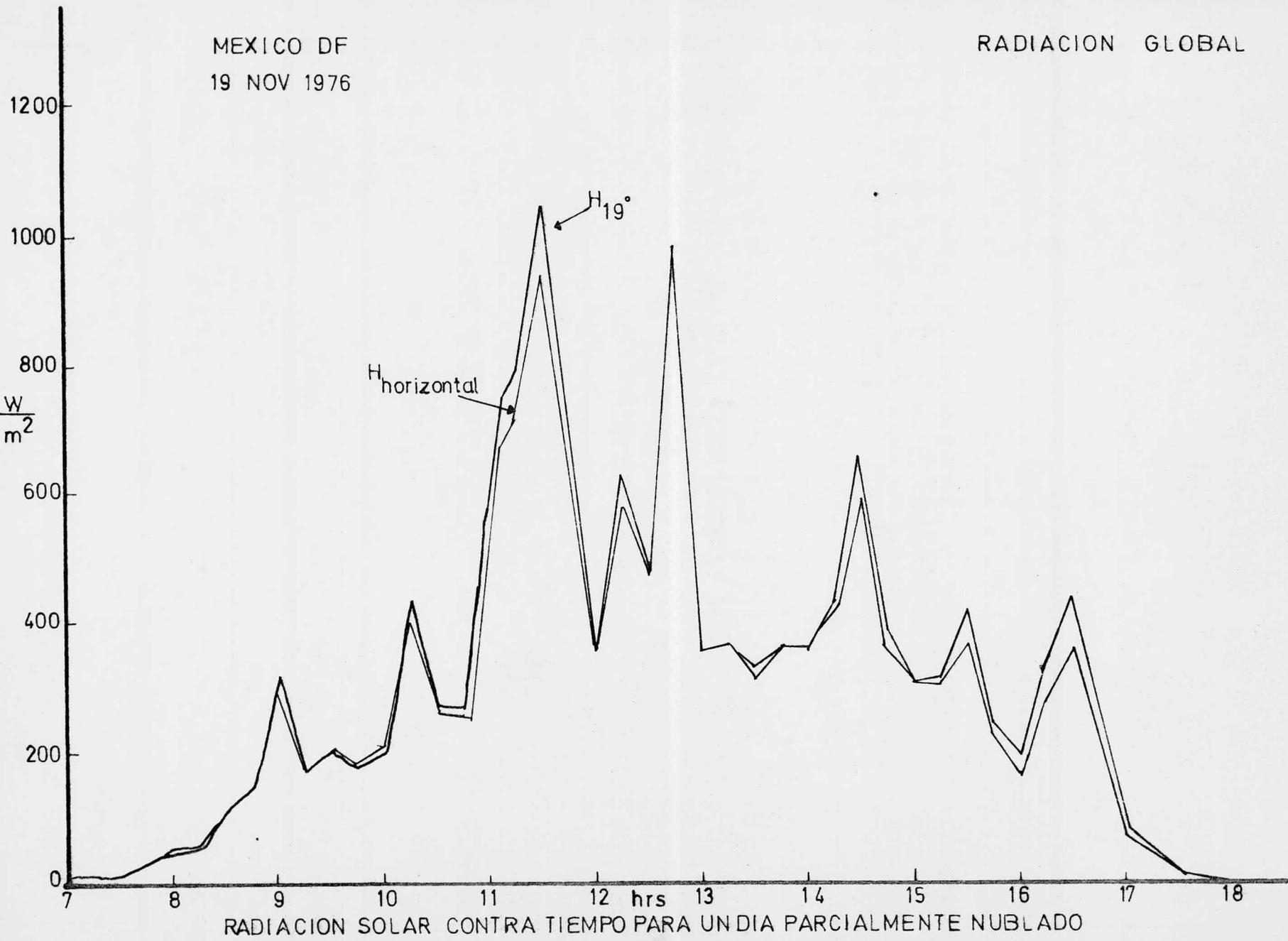
MEXICO, D.F.
16 NOV 1976

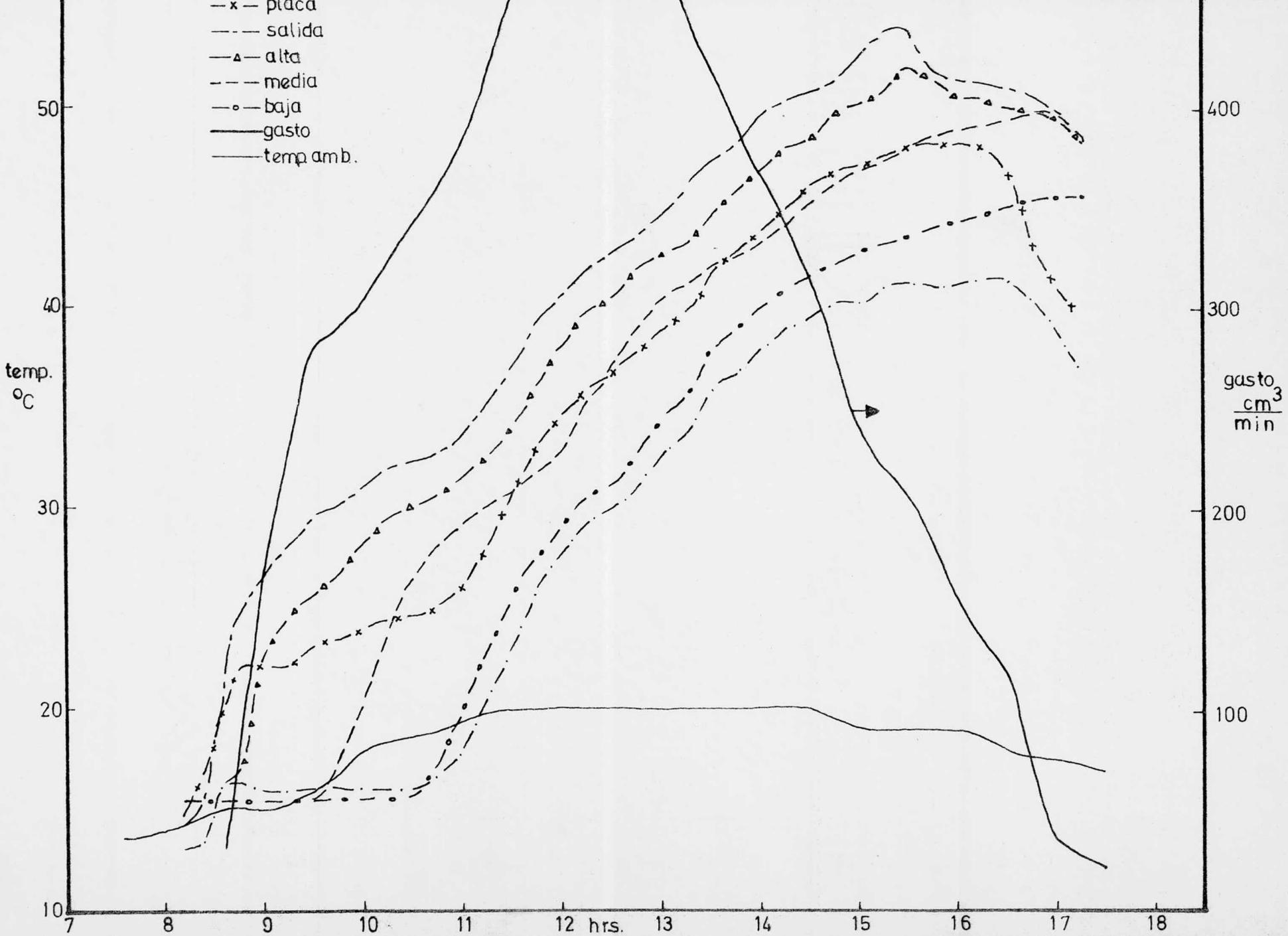


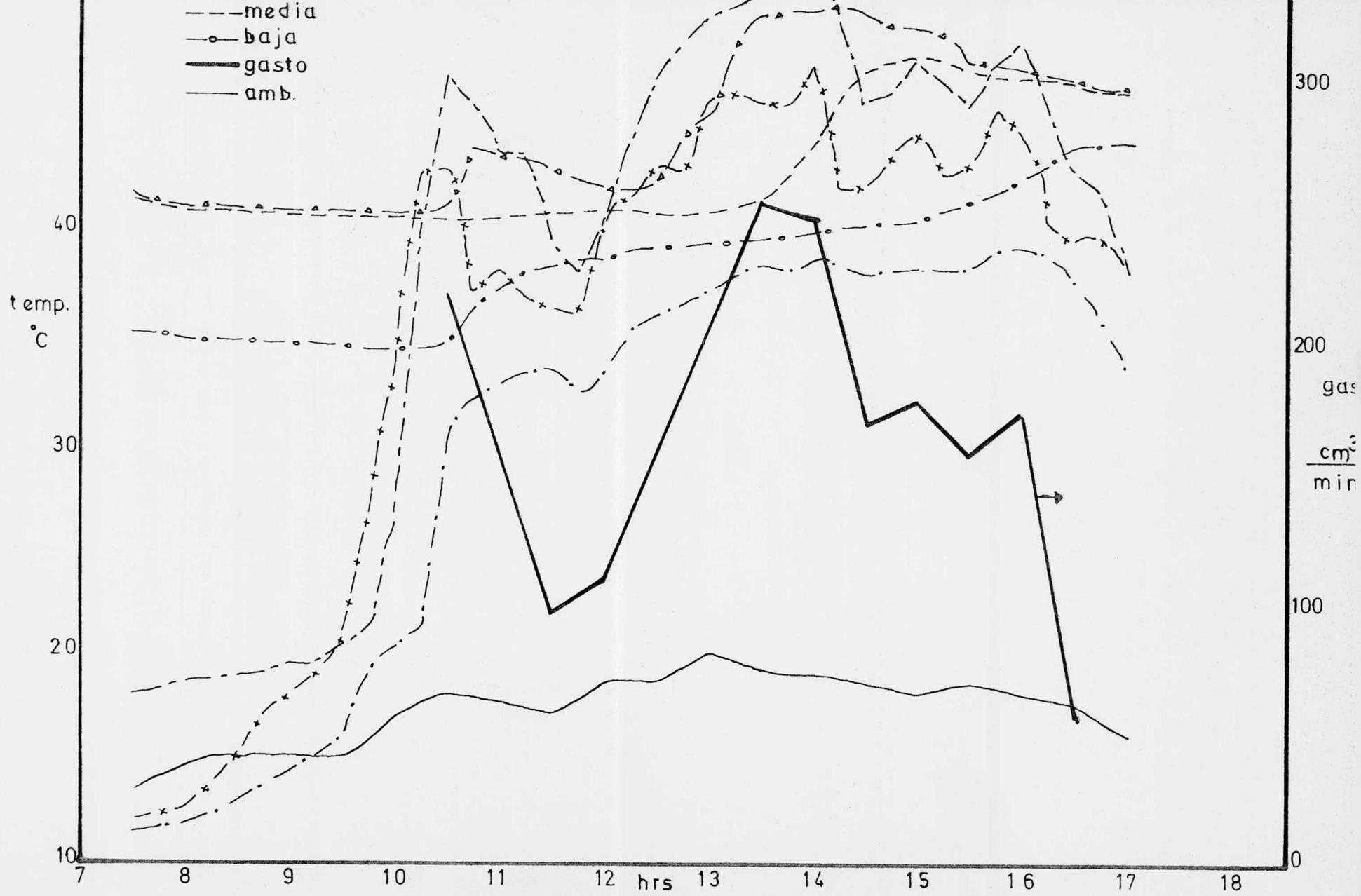
RADIACION SOLAR CONTRA TIEMPO PARA UN DIA DESPEJADO

MEXICO DF
19 NOV 1976

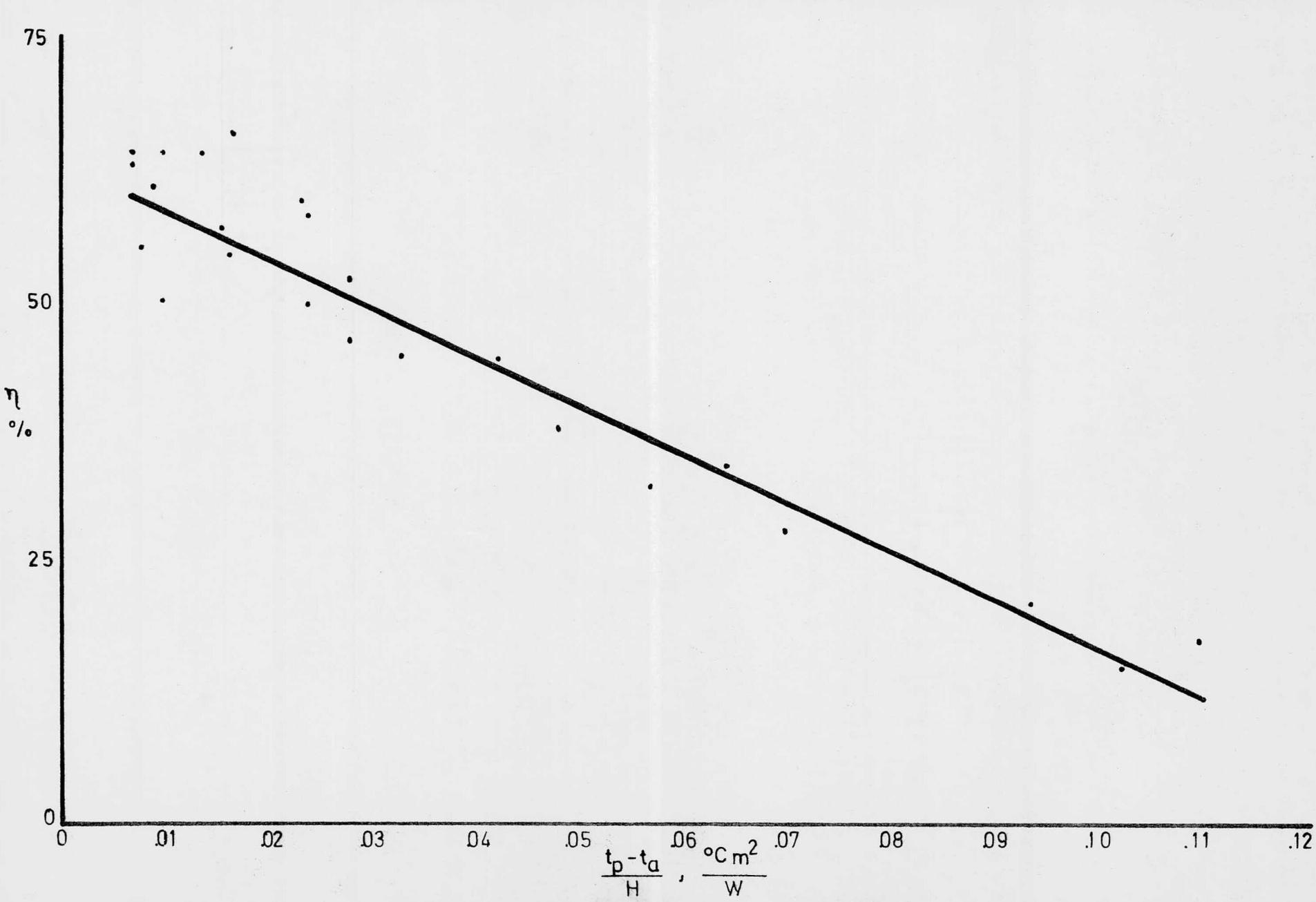
RADIACION GLOBAL



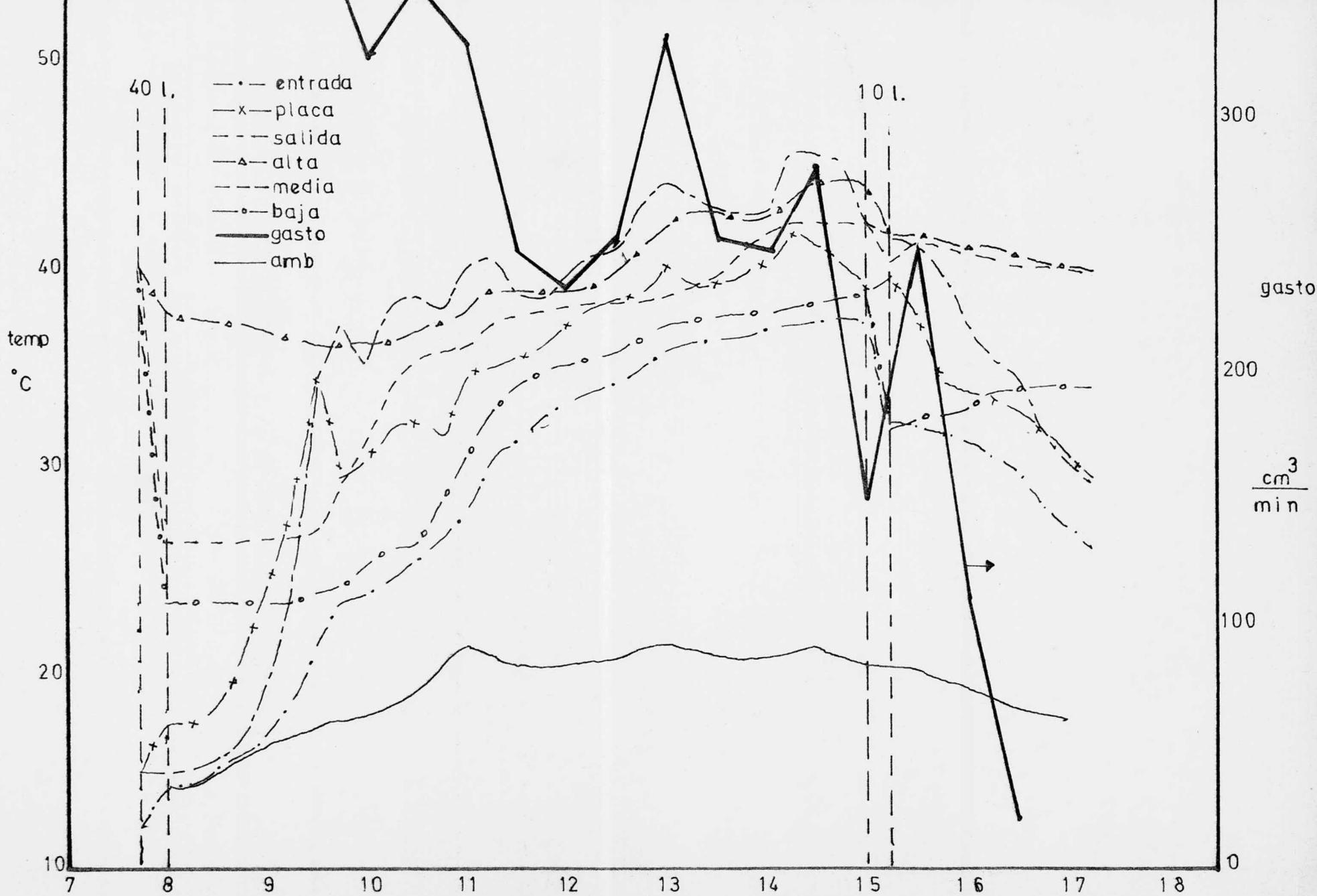




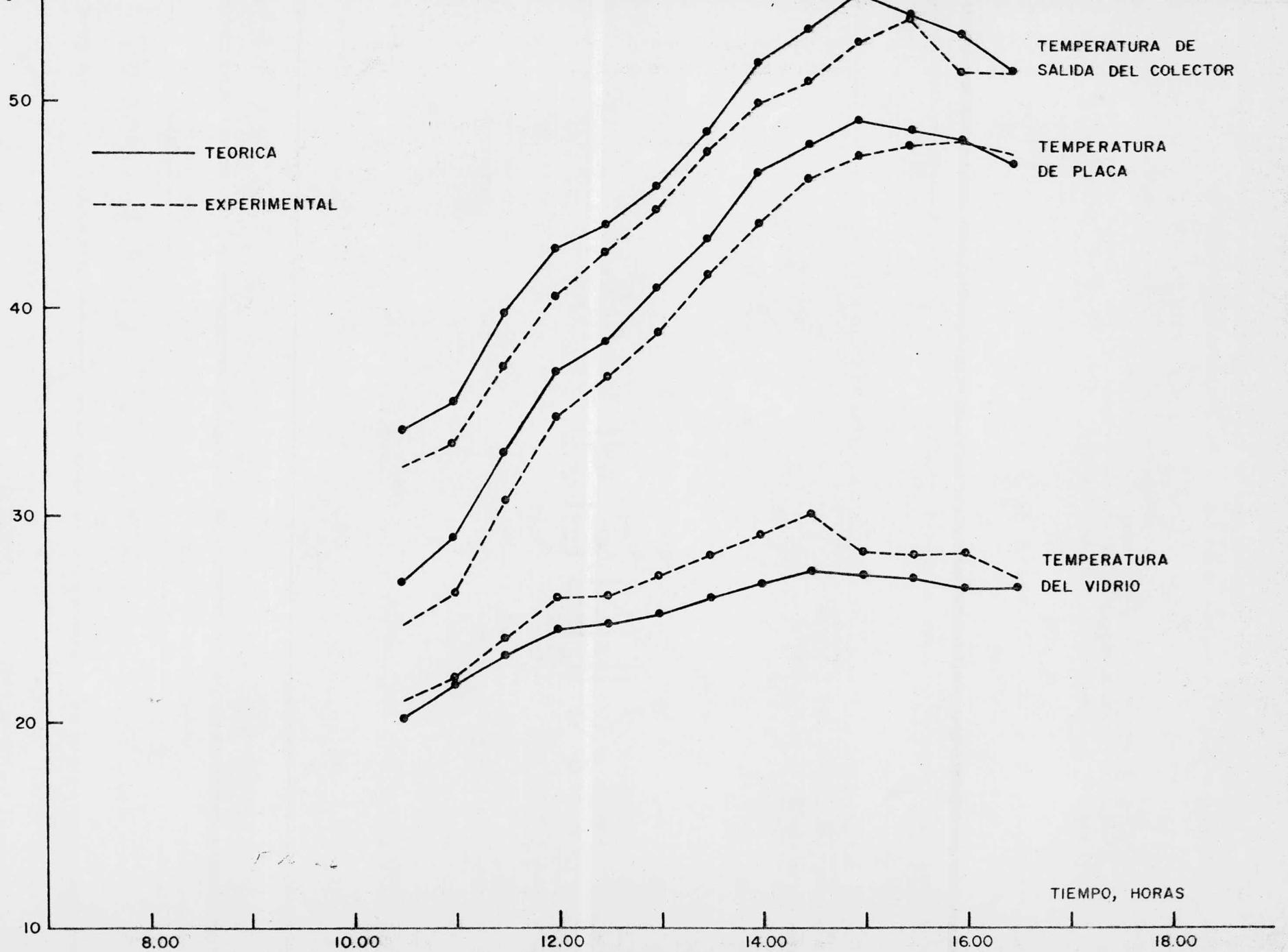
TEMPERATURAS Y GASTOS EN FUNCION DEL TIEMPO

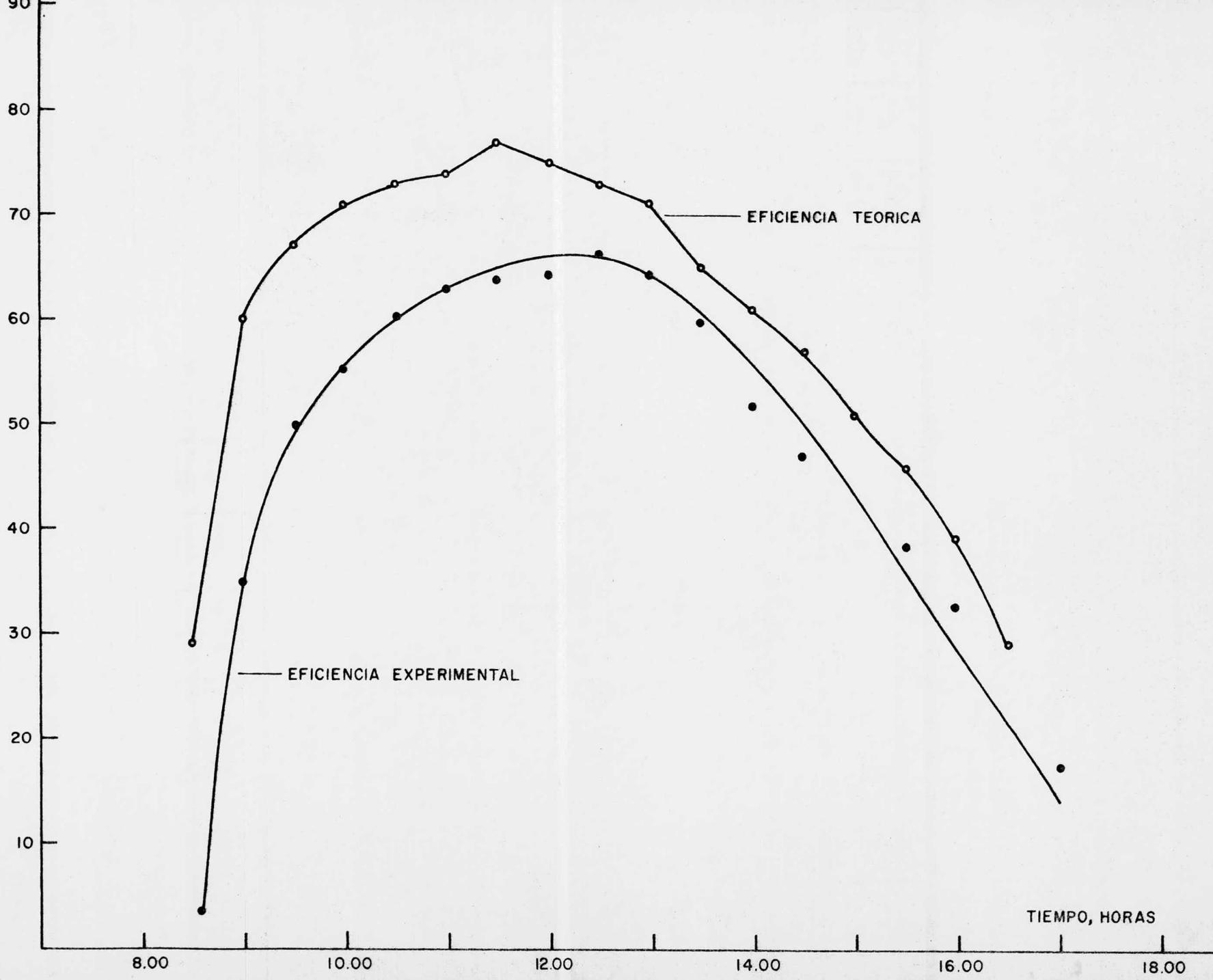


$\frac{t_p - t_a}{H}, \frac{^{\circ}\text{C m}^2}{W}$
CURVA DE EFICIENCIA



EFFECTO DE LA EXTRACCION DE 50 LITROS DE AGUA SOBRE LA TEMPERATURA





CONCLUSIONES

La eficiencia diaria del sistema fué del 47%. Es aceptable si se considera que no es un diseño optimizado.

El flujo inverso que hubo durante la noche, disminuyó la temperatura media del agua contenida en el tanque de almacenamiento. Por lo tanto, la minimización de este fenómeno debe ser objeto de más profundas investigaciones.

La temperatura media del tanque en las mañanas, después de la extracción de agua caliente y suministro de agua fría, así como del enfriamiento por flujo inverso nocturno alcanzó niveles bastante aceptables (40 - 50°C). En cambio si la extracción y el suministro simultáneo se efectúa después del mediodía solar, difícilmente se alcanzan niveles de temperatura aceptables al final del día.

Los resultados obtenidos experimentalmente en el calentador solar de agua, cuya área de captación es de 0.69 m² y con una capacidad del tanque de almacenamiento de 55 litros de agua, son adecuados para usos domésticos. Por lo tanto, para el caso en el que se requiera disponer de 200 litros de agua caliente para su consumo en una casa habitación, se necesitará un área de captación de 2 m².

La diferencia de los resultados obtenidos experimentalmente contra los teóricos, computados en base al modelo matemático alcanzó un valor promedio del 10%. La contribución de energía captada por la superficie de los tubos de sección circular del colector solar (13%) y la caída de presión del mismo no fué considerada en el modelo matemático.

Un análisis de costos contra eficiencia, sería la base para desarrollar diseños optimizados de calentadores solares de agua para usos domésticos y aplicaciones industriales.

Bibliografía

TESIS # 260

67

1. Zarem A.H. y Erway D.D. Introduction to the Utilization of Solar Energy. Mc Graw-Hill. 1963
2. Duffie J.A. y Beckman W.A. Solar Energy Thermal Processes. Wiley & Sons, N.Y. 1974.
3. Mayer E. Present State and Perspective of Solar Energy Applications in Mexico. UNAM. 1976
4. Hernández E. Las Coordinadas Horarias de la Trayectoria Diaria del Sol sobre el horizonte y su Representación Polar en la República Mexicana. Centro de Investigación de Materiales. UNAM. 1977
5. Herrera R. Simulación Digital de un Sistema Anticonvectivo y Antirradiativo en Colectores Solares Planos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 1977
6. Chinnery D.N.W. Solar Water Heating in South Africa. CSIR Res. Rep. 248. Pretoria, South Africa, 1971
7. Mc Adams H. Heat Transmission. Mc Graw_Hill. 3^a Edición. N.Y. 1954
8. Popplewell J. Corrosion Considerations in the use of Aluminum, Copper and Steel. Flat Plate Collectors. International Solar Energy Congress and Exposition. Los Angeles. Julio 1975