

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE QUIMICA**



---

**ANALISIS TEORICO Y EXPERIMENTAL DE UN  
PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR  
TUBULAR EVACUADO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A**

**JOSE ANTONIO MACHADO SOBERANES**

**México, D. F.**

**1979**



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.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA  
LAB. TESIS 1979  
ADO. M.T.  
FECHA 207  
PROG.  
S



EXAMEN DE TESIS Y EXAMEN FINAL DE M.T.  
LABORATORIO DE QUIMICA  
MEXICO



LIBRO  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA  
MEXICO

PRESIDENTE: PROF. ENRIQUE VILLARREAL D.  
VOCAL: PROF. GUILLERMO ALCAYDE L.  
SECRETARIO: PROF. DOMINGO ALARCON ORTIZ  
1er. SUPLENTE: PROF. CLAUDIO A. AGUILAR M.  
2do. SUPLENTE: PROF. ENRIQUE BRAVO MEDINA

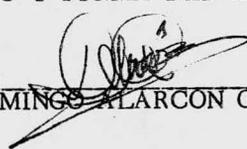
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Centro de Investigación de Materiales. UNAM

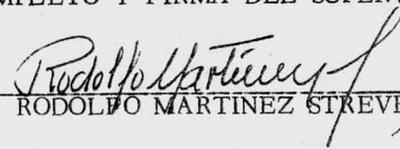
NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUSTENTANTE:

  
JOSE ANTONIO MESCHADO SOBERANES

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL ASESOR DEL TEMA:

  
MTRÓ. DOMINGO ALARCON ORTIZ

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUPERVISOR TECNICO:

  
ING. RODOLFO MARTINEZ STREVEL

A mi MADRE; cuya dedicación  
y esfuerzo se ve cristalizado  
con la culminación de este logro.

Con profunda gratitud.

A mis FAMILIARES; que han sido  
sostén para poder concluir esta obra.  
Especialmente a mi TIO ARMANDO,  
que su fiel guía me ha dirigido en la vida.

A mi ESPOSA; que con su amor  
y apoyo efectivo me ha impulsado  
a lograr esta meta.

A PAOLA Y PEPETOÑO;

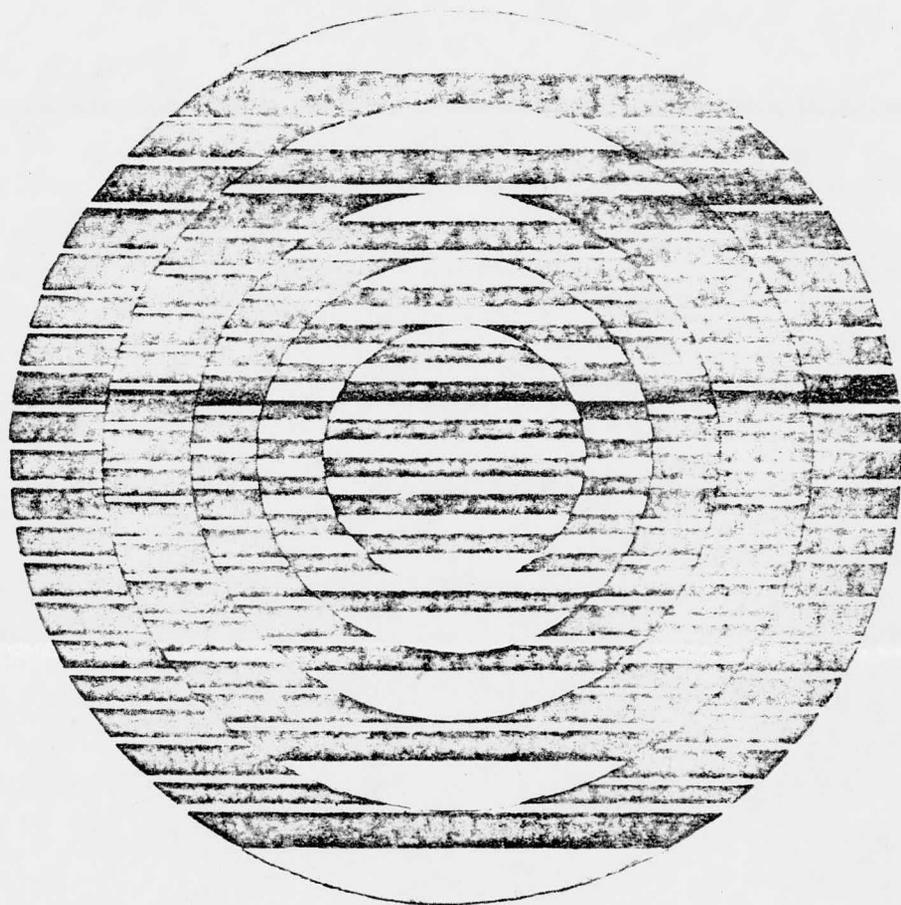
cuya presencia es mi mayor estímulo.

## AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi agradecimiento al Personal del Centro de Investigación de Materiales de la UNAM, por proporcionarme los medios necesarios para la realización de este trabajo.

Particularmente reconozco la amplia colaboración y disposición del Dr. Luis del Castillo y del Ing. Rodolfo Martínez, en la atinada dirección y redacción de esta Tesis.

Además, y en forma especial, mi sincero agradecimiento al M. en C. Domingo Alarcón, por su acertada asesoría, por su consejo y amistad.



"Cuando Agoteis la Energía del Mundo,  
Voltead la Cara al Sol,  
Fuente Inagotable de Poder."

A. Einstein

## I N D I C E

OBJETIVO	3
CAPITULO I.- GENERALIDADES	5
I.1 Colectores Solares	
I.1.1 Colector Solar de Placa Plana	
I.1.2 Colector Solar de Placa Plana a Presión Reducida.	
I.1.3 Colector Solar Tubular Evacuado	
I.1.4 Colector Solar de Placa Plana con Sistema Anticonvectivo y antirradiativo (Honeycomb).	
I.1.5 Colector Solar con Concentración.	
CAPITULO II.- ANALISIS TEORICO DEL COLECTOR SOLAR TUBULAR EVACUADO	21
II.1 Balance Energético del Colector	
II.1.1 Eficiencia del Colector	
II.1.2 Coeficiente de Pérdidas	
II.1.3 Radiación Global Incidente	

CAPITULO III. - DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y  
RESULTADOS

40

- III.1 Descripción del Colector Experimental
  - III.1.1 Materiales
- III.2 Proceso de Electrodeposición de la Superficie Selectiva.
- III.3 Resultados Experimentales.
- III.4 Modelo Matemático.
  - III.4.1 Componente Directa
  - III.4.2 Componente Difusa
  - III.4.3 Consideraciones Térmicas
- III.5 Resultados Teóricos.

APENDICES:

- A. Influencia de la Presión Sobre los Mecanismos de Transferencia Térmica. 94
- B. Radiación Solar: Definiciones e Instrumentos de Medición. 98
- C. Método Experimental de Prueba 110
- CONCLUSIONES 117
- REFERENCIAS 120
- BIBLIOGRAFIA GENERAL 124

## OBJETIVO

En este trabajo se presenta el estudio de un tipo de colector que permita cubrir una amplia gama de temperaturas de operación (80-120°C), por medio del uso combinado de un recubrimiento selectivo y una baja presión, disminuyendo de este modo las pérdidas por radiación y eliminando las de convección. Se propone un prototipo de colector tubular evacuado, presentándose el análisis teórico de su funcionamiento y la determinación experimental de su eficiencia térmica, mediante un método de prueba (1). Así como se comparan estos resultados contra los teóricos calculados mediante un modelo matemático (2). Este tipo de colector satisface teóricamente los requerimientos térmicos de algunos procesos, como: refrigeración por absorción, aire acondicionado o estaciones de pequeña y mediana potencia.

CAPITULO I

GENERALIDADES

## I. 1 COLECTORES SOLARES

La transformación de energía radiante proveniente del sol en energía térmica se realiza en dispositivos térmicos denominados colectores solares. Estos basan su funcionamiento en la captación de energía radiante mediante una superficie absorbente, la cual transfiere la energía calorífica a un fluido circulante.

Un colector solar difiere en varios aspectos a los demás cambiadores de calor convencionales. En estos dispositivos se efectúa un intercambio de calor entre fluidos, particularmente por convección. Mientras que en un colector solar la transferencia energética es desde una fuente lejana de energía radiante a un fluido.

La captación de energía solar puede realizarse a través de diversos tipos de colectores solares. La selección de un tipo dado depende de las temperaturas que se requieran en el fluido de trabajo.

Una clasificación detallada para colectores solares la proporciona Hollands (3), como se muestra en la fig. I.1.1

Los colectores solares sin concentración interceptan la radiación global proveniente del sol, es decir, tanto radiación directa como difusa, y por tanto su orientación no es crítica. Los colectores solares con concentración interceptan la radiación directa, por

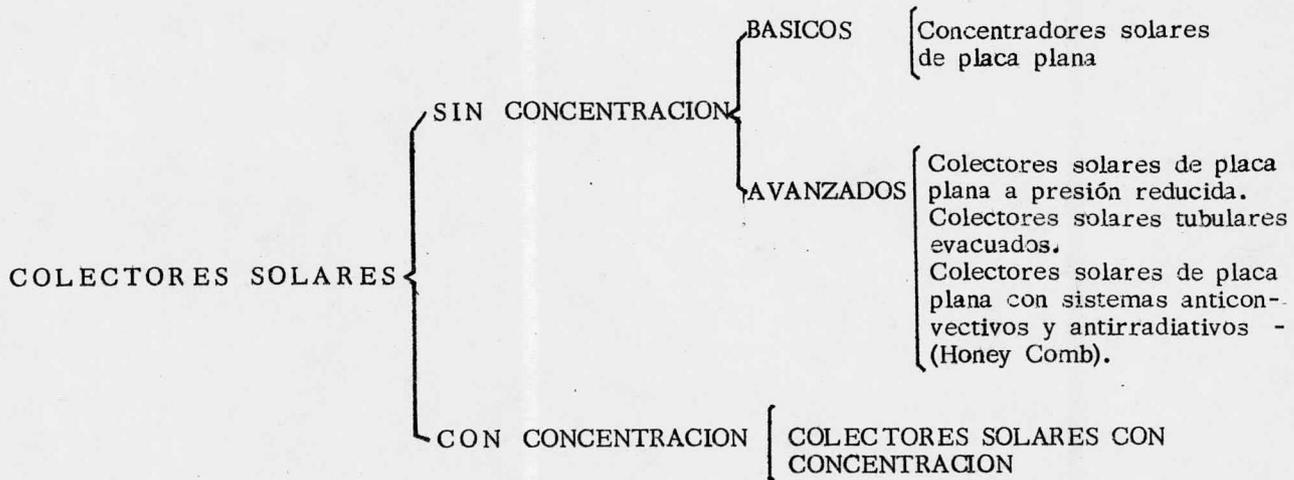


Fig. I.1.1 CLASIFICACION DE LOS COLECTORES SOLARES.

lo que es necesario usar mecanismos de rastreo, de tal manera - que se tenga la máxima captación durante las horas de insolación. La concentración puede variar desde la unidad en colectores de - placa plana hasta valores altos como en los colectores parabólicos.

### 1.1.1 COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

La captación y aprovechamiento de energía solar por medio - de colectores de placa plana ha sido estudiada por diversos investigadores desde 1940 (4,5).

Para los colectores de placa plana, el área de absorción de - la radiación solar es casi la misma que la de intercepción. Su amplia propagación se debe principalmente a que constituyen el tipo - básico y el más simple; además de que presentan ciertas ventajas - sobre otros tipos, que son las siguientes:

- a) Pueden ser fácilmente manufacturados en tamaños grandes sin la necesidad de métodos de precisión.
- b) Aprovechan la radiación global (es decir, tanto la radiación directa como la difusa).
- c) Su operación es más simple que la de los concentradores.

- d) El colector puede ser usado como parte de un techo en construcciones, para calentamiento de agua de uso doméstico y aire acondicionado.
- e) Su mantenimiento es mínimo.

Las partes importantes de un colector solar de placa plana típico se ilustran en la fig. I.1.1.1

El funcionamiento de estos colectores es razonablemente eficiente (40-60%) hasta una temperatura máxima de 80°C. A partir de esta temperatura su eficiencia decae drásticamente debido principalmente a las pérdidas de calor por convección y radiación. Es posible alcanzar temperaturas de trabajo superiores conservando una buena eficiencia, si se utiliza una doble cubierta transparente y/o superficie selectiva, pero aún así el límite superior práctico es de 100°C. Por lo tanto el uso de este tipo de colectores se limita casi exclusivamente al calentamiento de agua para uso doméstico y al secado de granos.

### I.1.2 COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA A PRESION REDUCIDA.

En la sección anterior se menciona que los colectores sola-

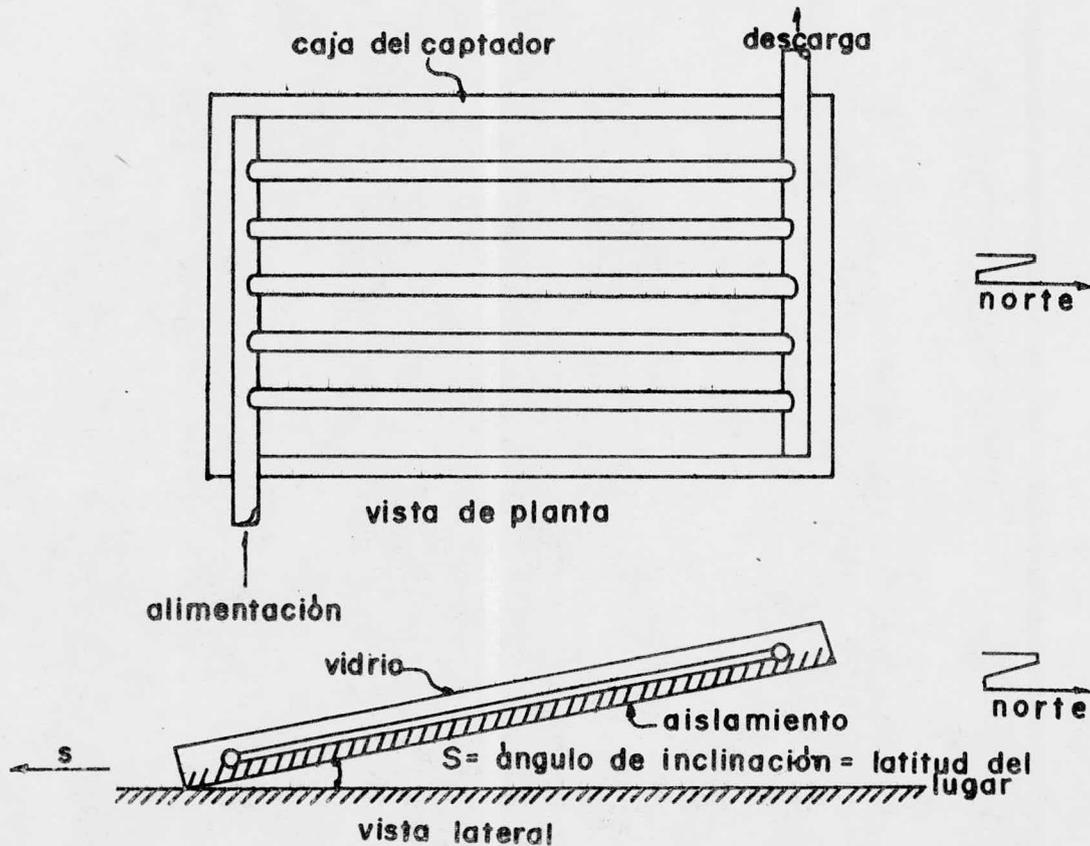


FIG. I.1.1.1

res de placa plana operan eficientemente a una temperatura máxima de 80°C. Pero cuando se requieren temperaturas superiores es necesario disminuir las pérdidas por convección, mediante el uso de una baja presión (1-100 mm Hg).

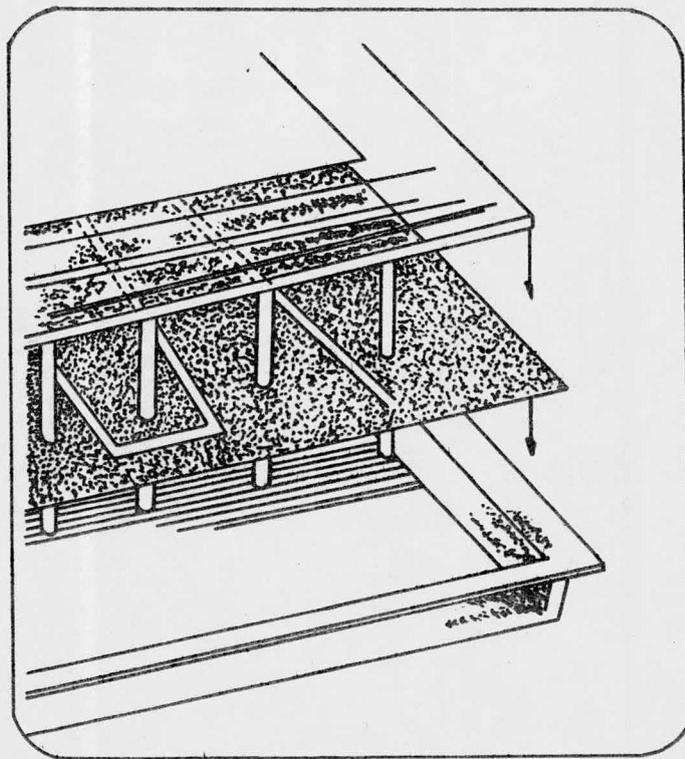
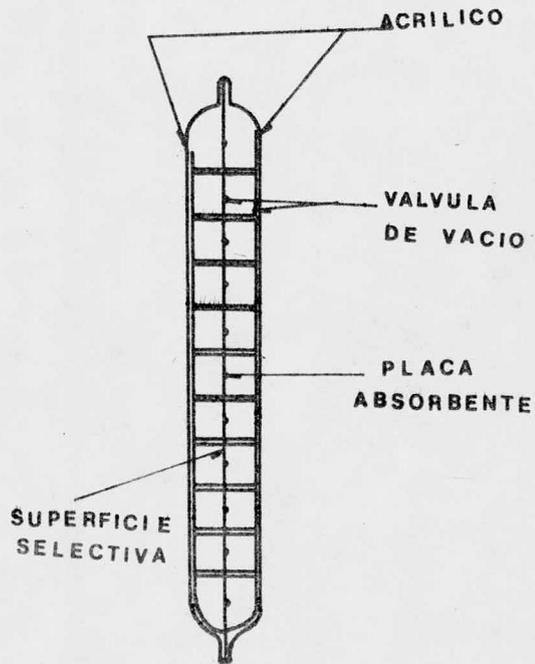
Los colectores solares de placa plana a presión reducida constituyen una variante del tipo básico. En estos, el uso de un recubrimiento selectivo disminuye las pérdidas por radiación. Y por otro lado, al reducir la presión en la capa de aire entre la superficie absorbente y la cubierta transparente se elimina el movimiento de convección libre del fluido.

Un esquema de este dispositivo térmico se ilustra en la figura I.1.2.1

Hollands (3) estudió la influencia de la presión sobre el coeficiente de intercambio térmico por convección libre. Algunos de los cálculos se analizan en el Apéndice A.

### I.1.3 COLECTOR SOLAR TUBULAR EVACUADO.

Cuando se requiere una operación eficiente a temperaturas de trabajo de 80 a 150 °C es necesario afectar, tanto los mecanismos de transferencia de calor por radiación y convección, como el de conducción gaseosa. Esto se logra mediante el uso combinado de



Vista interior

FIG. I.1.2.1

una superficie selectiva y una baja presión (menor de  $10^{-4}$  torr) - en un colector solar.

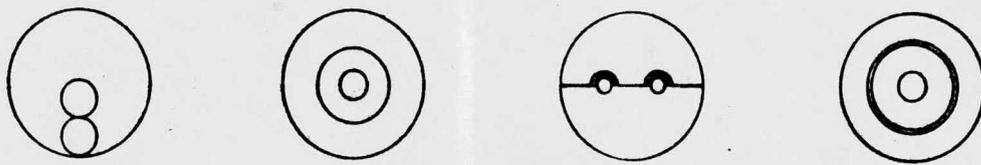
Estos dispositivos presentan las siguientes características:

- a) El uso de una geometría cilíndrica garantiza la conservación de la baja presión por largos períodos de tiempo.
- b) La emisividad de la radiación térmica del tubo absorbente - se reduce mientras que la absorptividad de la radiación solar se incrementa debido a la deposición de una superficie selectiva, por lo que las pérdidas térmicas por radiación disminuyen significativamente (Capítulo III).
- c) Las pérdidas de calor por convección se eliminan y las pérdidas por conducción son reducidas al evacuar el espacio entre el tubo absorbente y el tubo de cubierta (Apéndice A).

Existen diversas geometrías para lograr estos efectos, algunas de ellas se ilustran en la figura I.1.3.1

#### I.1.4 COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA CON SISTEMA ANTICONVECTIVO Y ANTIRRADIATIVO. (HONEYCOMB).

El uso de cubiertas de vidrio adicionales en un colector de -



**DIVERSOS DISEÑOS DE COLECTORES EVACUADOS**

**FIG. 1.1.3.1**

placa plana al mismo tiempo que disminuyen las pérdidas térmicas incrementan la atenuación de la radiación que incide sobre la placa colectora. De tal manera que estas pérdidas ópticas conducen a una disminución en la eficiencia térmica del colector. Sin embargo si dichas cubiertas se colocan perpendicularmente a la placa absorbente, en vez de paralelas a ella, aparece un resultado interesante. En el caso de cubiertas de vidrio paralelas a la placa absorbente las reflexiones de la radiación solar se alejan de ella, mientras que si las cubiertas son perpendiculares las reflexiones no se pierden. Esto se ilustra en la figura I.1.4.1

Si se dimensionan apropiadamente las cubiertas verticales (que pueden ser circulares, rectangulares, hexagonales, etc.) se reducen las corrientes de convección libre. Además las múltiples reflexiones de la radiación solar incidente en este sistema, permiten una mayor captación de energía en la placa absorbente. Cabe mencionar que el espesor de las cubiertas verticales debe ser lo suficientemente pequeño para que la absorción de energía sea mínima. Un colector con estas características se denomina colector de placa plana con sistema anticonvectivo y antirradiativo (Honeycomb).

#### I.1.5 COLECTOR SOLAR CON CONCENTRACION.

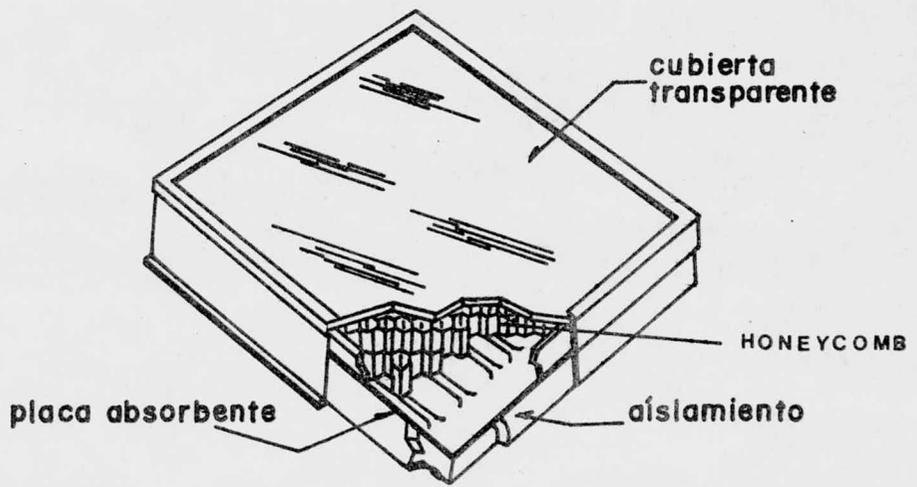
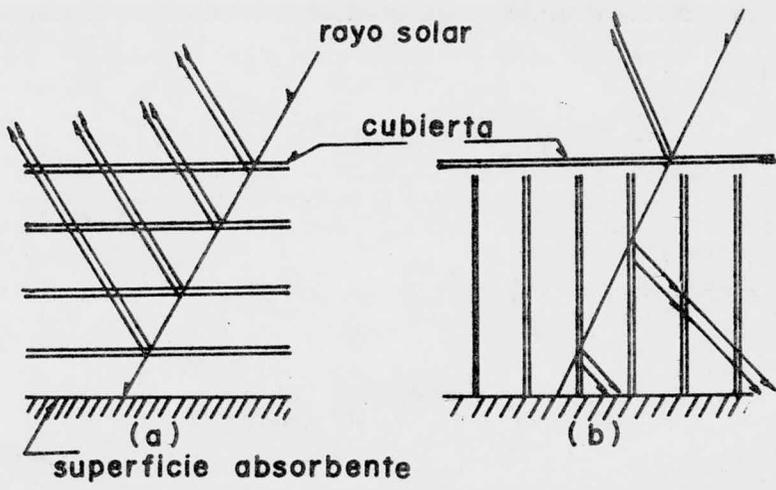


FIG. 1.4.1

Este tipo de dispositivos de captación es capaz de alcanzar temperaturas superiores a los 200°C, lo que permite satisfacer los requerimientos térmicos de sistemas de generación de electricidad y energía mecánica.

Las altas temperaturas logradas se deben a los siguientes factores:

- a) La geometría de los captadores (cilindros parabólicos, paraboloides, semiesferas, espiral logarítmicos) recubiertos con materiales reflejantes que facilitan la concentración de la radiación.
- b) El absorbedor recubierto con una superficie selectiva con el fin de minimizar las pérdidas por radiación. En algunos concentradores el tubo absorbente se coloca dentro de tubos de vidrio evacuados a presiones menores de  $10^{-2}$  torr. Con el fin de reducir las pérdidas el absorbedor está rodeado por un medio no evacuado.

En la práctica estos sistemas térmicos se identifican de la siguiente manera:

- a) Captadores lineales de concentración. Por ejemplo: cilíndricos parabólicos, cilíndrico espiral-logarítmicos (Fig. I.1.5.1).

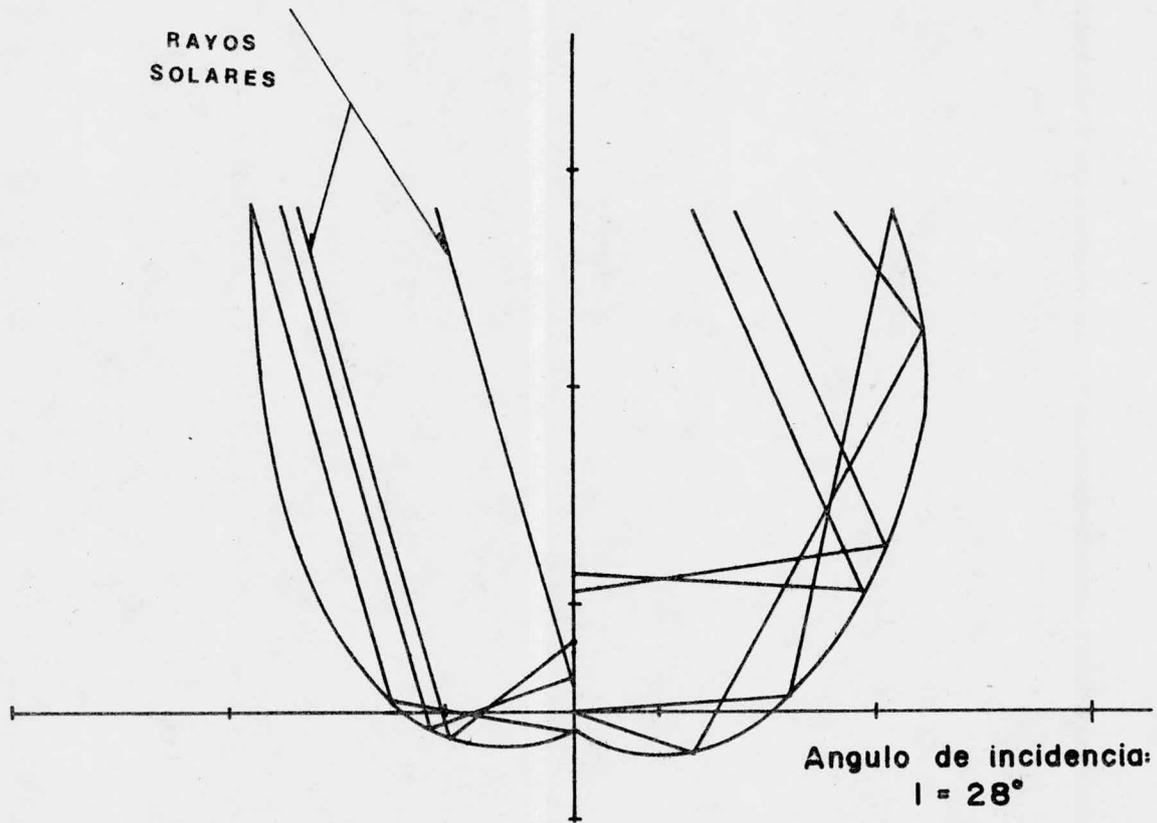


FIG. I.1.5.1

b) Captadores de enfoque tridimensional con absorbedor fijo y colector movable. Por ejemplo: paraboloides de revolución.

c) Captadores de enfoque tridimensionales con absorbedor movable y colector fijo. Por ejemplo: semi-esferas fijas con el absorbedor movable.

Los colectores solares con concentración utilizan sistemas ópticos como reflectores o refractores para incrementar la intensidad de radiación solar sobre la superficie absorbente. Estos valores de concentración fluctúan desde  $x = 2$  hasta  $x = 37,000$ .

De este modo la gran cantidad de energía sobre una superficie absorbente relativamente pequeña, reduce las pérdidas térmicas. Al efectuar los balances de energía, se muestra que la operación a altas temperaturas es posible. Mientras que las pérdidas térmicas son reducidas, aparecen dos clases de pérdidas adicionales: la mayoría de los concentradores operan solamente con la componente directa de la radiación solar y se pierde la difusa, y además, se vuelven significativas las pérdidas ópticas por reflexión.

## CAPITULO II

### ANALISIS TEORICO DEL COLECTOR SOLAR TUBU - LAR EVACUADO.

## II.1 BALANCE ENERGETICO DEL COLECTOR.

Se define como calor útil de un colector ( $Q_U$ ) la diferencia entre la energía solar incidente ( $Q_I$ ) y las pérdidas caloríficas ( $Q_L$ ) y está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_U = Q_I - Q_L \quad \dots\dots\dots (1)$$

La forma explícita del calor útil para el caso de un colector evacuado se expresa como:

$$Q_U = \left[ F_R A_C \alpha \tau I_G - U_L \left( \frac{A_L}{A_C} \right) (T_e - T_a) \right] \quad \dots\dots (2)$$

donde:

$F_R$  = Factor de calor removido

$A_C$  = Es el diámetro del tubo absorbedor por la longitud del colector.

$A_L$  = Area lateral del tubo absorbedor ( $\pi A_C$ ).

$\alpha$  = Absortividad

$\tau$  = Transmisividad.

$I_G$  = Radiación global incidente sobre el plano del colector.

$U_L$  = Coeficiente de pérdidas del colector

$T_e$  = Temperatura de entrada

$T_a$  = Temperatura ambiente.

El colector evacuado consiste de 4 tubos concéntricos. Los exteriores son de vidrio, entre los cuales se ha realizado el vacío. Y por los dos tubos interiores de cobre circula el fluido de trabajo.

Para determinar el perfil de temperaturas a lo largo del colector se realiza un balance de calor, considerando todos los parámetros térmicos, geométricos y ópticos. En la figura II.1.1 se ilustra la localización de estos parámetros.

Si suponemos que el fluido de trabajo es agua, la capacidad calorífica de los tubos de vidrio y de cobre puede ser despreciada por pequeña, comparada con la capacidad calorífica del agua.

Las ecuaciones (3) y (4) se derivan del balance de calor.

$$\rho_f C_p A_{x_1} \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} \right) + \dot{m} C_p \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + U_1 P_1 T_1 - U_1 P_1 T_2 = 0 \dots (3)$$

$$\rho_f C_p A_{x_2} \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} \right) - \dot{m} C_p \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) - U_1 P_1 T_1 + \left( \frac{U_L P_L}{1 + \frac{U_L P_L}{U_3 P_3}} \right) T_2 =$$

$$\left( \frac{1}{1 + \frac{U_L P_L}{U_3 P_3}} \right) (\alpha \tau I_G P_c + U_L P_L T_a) \dots \dots \dots (4)$$

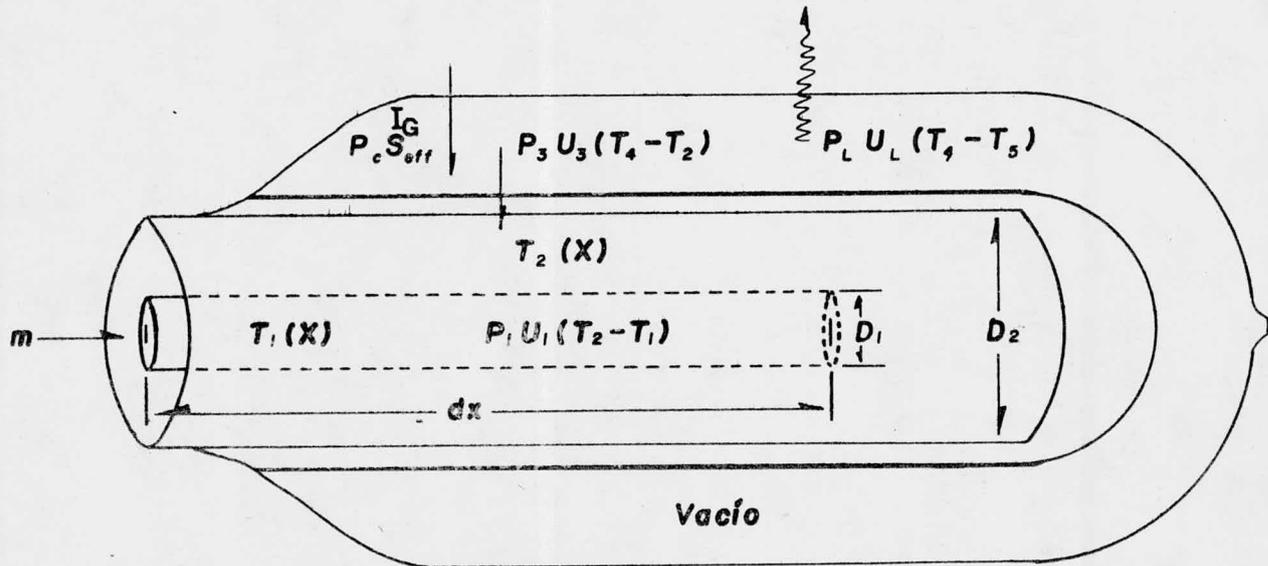


FIG. II.1.1 LOCALIZACION DE LOS PARAMETROS

la ecuación (3) representa el balance calorífico entre los tubos interiores, mientras que la ecuación (4) resulta del balance entre el ánulo formado por estos tubos y los exteriores.

$\rho_f$  = Densidad del fluido

$C_p$  = Capacidad calorífica del fluido.

$A_{x1}$  = Area de la sección transversal

$T_1$  = Temperatura en el tubo interno

$t$  = Tiempo

$\dot{m}$  = Flujo volumétrico

$x$  = Distancia determinada en el colector

$U_1$  = Coeficiente de pérdidas en el tubo interno

$P_1$  = Perímetro del tubo interno

$T_2$  = Temperatura en el tubo externo

$A_{x2}$  = Area de la sec. transversal

$U_L$  = Coeficiente de pérdidas totales

$P_L$  = Perímetro total del tubo

$U_3$  = Coeficiente de pérdidas en el tubo de cubierta

$P_3$  = Perímetro del tubo externo

$\alpha$  = Absortividad

$\tau$  = Transmisividad

$I_G$  = Radiación Global Incidente.

$P_c$  = Perímetro de la cubierta

$T_a$  = Temperatura ambiente

$\frac{\partial T_1}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial T_2}{\partial t}$  representa la variación de la temperatura 1 y 2 con respecto al tiempo.

$\frac{\partial T_1}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial T_2}{\partial x}$  representa la variación de la temperatura 1 y 2 con respecto a la longitud del colector.

Para simplificación de las ecuaciones (3) y (4) se resuelven en términos de las siguientes variables reducidas:

$$\bar{F} = \frac{U_3 P_3 x}{m C_p} \quad ; \quad \hat{t} = \frac{U_3 P_3 t}{P_f C_p A_{x_2}}$$

y los parámetros:

$$a = \frac{A_{x_1}}{A_{x_2}} \quad ; \quad b = \frac{U_1 P_1}{U_3 P_3} \quad ; \quad F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L P_L}{U_3 P_3}} \quad ; \quad T_e = \left( \frac{\alpha T I_G P_c}{U_L P_L} \right) + T_a$$

La condición de estado estable ocurre cuando  $\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0$  y  $T_e$  es constante. Estas condiciones nunca existen en la práctica pero en muchas ocasiones el colector puede ser descrito como operando en una condición "cuasi" estable, donde la solución de estado estable da una buena aproximación del funcionamiento del colector.

#### SOLUCION A LAS ECUACIONES

El cálculo se realizó de la siguiente manera:

- 1.- Se resolvieron las ecuaciones parciales en forma general.

2.- Se introdujeron las variables reducidas y los parámetros para obtener las ecuaciones en forma particular.

1. ECUACIONES EN FORMA GENERAL:

$$\alpha \frac{\partial T_1}{\partial x} + \beta T_1 - \beta T_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$-\alpha \frac{\partial T_2}{\partial x} - \beta T_1 + (\beta + \gamma) T_2 = \delta \quad \dots\dots\dots(6)$$

donde:

$$\alpha = \dot{m} C_p$$

$$\beta = U_1 P_1$$

$$\gamma = \frac{U_2 P_2}{1 + \frac{U_2 P_2}{U_3 P_3}}$$

$$\delta = \left( \frac{1}{1 + \frac{U_2 P_2}{U_3 P_3}} \right) (\alpha T_{iG} R + U_2 P_2 T_a)$$

despejando  $T_2$  de Ec. (5) y sustituyendo en Ec. (6)

obtenemos la ecuación diferencial no homogénea:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} - \frac{\gamma}{\alpha} \frac{dT_1}{dx} - \frac{\beta \gamma}{\alpha^2} T_1 = - \frac{\delta \beta}{\alpha^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

siendo la correspondiente ecuación diferencial homogénea:

$$R^2 - \frac{\gamma}{\alpha} R - \frac{\beta\gamma}{\alpha^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

la solución es del tipo:

$$R_1, R_2 \quad T_{HI} = Ae^{R_1x} + Be^{R_2x}$$

$$T_I = T_{HI} + T_{PART}$$

$$T_{PART} = C \quad ; \quad \frac{d^2 T_I}{dx^2} = \frac{dT_I}{dx} = 0$$

$$-\frac{\beta\gamma}{\alpha^2} C = -\frac{\delta\beta}{\alpha^2} \quad ; \quad C = \frac{\delta}{\gamma}$$

$$T_I = Ae^{R_1x} + Be^{R_2x} + \frac{\delta}{\gamma} \quad \dots\dots\dots(9)$$

sustituyendo el valor de  $T_I$  en la ecuación (6) se obtiene la ecuación no homogénea:

$$-\alpha \frac{dT_I}{dx} - \beta \left( Ae^{R_1x} + Be^{R_2x} + \frac{\delta}{\gamma} \right) + (\beta + \gamma) T_I = \delta \quad \dots\dots\dots(10)$$

siendo la homogénea:

$$R - \frac{\beta + \gamma}{\alpha} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$T_{H2} = C e^{\frac{\beta+\gamma}{\alpha} x}$$

$$T_{PART} = K + L e^{R_1 x} + M e^{R_2 x}$$

$$T_2 = C e^{\frac{\beta+\gamma}{\alpha} x} + K + L e^{R_1 x} + M e^{R_2 x} \dots (12)$$

2. - Introducción de las variables reducidas y parámetros para obtener las ecuaciones en forma particular.

a partir de las variables reducidas:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \frac{U_3 B}{\dot{m} C_p} \quad ; \quad \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial T_1}{\partial \hat{t}} \frac{U_3 B}{\rho_f C_p A x_2}$$

de la misma manera para  $T_2$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial \xi} \frac{U_3 B}{\dot{m} C_p} \quad ; \quad \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial T_2}{\partial \hat{t}} \frac{U_3 B}{\rho_f C_p A x_2}$$

sustituyendo en la ecuación ( 3 ) e introduciendo los parámetros se obtiene la expresión:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \xi} + b T_1 - b T_2 = 0 \quad \dots \dots \dots ( 13 )$$

sustituyendo para  $T_2$  en la ecuación ( 4 ) e introduciendo los parámetros se obtiene la expresión:

$$-\frac{\partial T_2}{\partial \xi} - bT_1 + (b + 2\omega_1)T_2 = 2\omega_1 T_e \dots\dots\dots( 14 )$$

donde:

$$\omega_1 = \frac{U_L R F'}{2U_3 P_3}$$

despejando  $T_2$  de ( 13 ) y sustituyendo en ( 14 ), además reduciendo términos se obtiene la ecuación no homogénea:

$$\frac{d^2 T_1}{d\xi^2} - \frac{dT_1}{d\xi} - 2\omega_1 - 2\omega_1 bT_1 = -2\omega_1 T_e b \dots\dots\dots( 15 )$$

siendo la ecuación homogénea:

$$R^2 - 2\omega_1 R + 2\omega_1 b = 0 \dots\dots\dots( 16 )$$

resolviendo esta ecuación, posteriormente la particular con el valor de las constantes a partir de las suposiciones de estado estable y las condiciones a la frontera:

$$T_1(0) = T_e \quad ; \quad T_1(\xi_1) = T_2(\xi_1) \quad ; \quad \xi_1 = \frac{U_3 P_3 l}{\dot{m} C_p}$$

$$T_1(\xi) = C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi}$$

$$r_1 = \omega_1 + 1/2 [4\omega_1^2 - 8\omega_1]^{1/2}$$

$$r_2 = \omega_1 - 1/2 [4\omega_1^2 - 8\omega_1]^{1/2}$$

$$C_1 + C_2 = 0 \quad ; \quad r_1 C_1 + r_2 C_2 = T_1(\xi_1)$$

resolviendo el sistema:

$$C_2 = \frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1} \quad \text{ya que} \quad C_1 = -C_2$$

$$C_1 = -\frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1}$$

$$T_1(\xi) = -\frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1} e^{r_1 \xi} + \frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1} e^{r_2 \xi} + E$$

donde:  $E = T_{PART} = T_e \quad \therefore$

$$T_1(\xi) = -\frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1} e^{r_1 \xi} + \frac{T_1(\xi_1)}{r_2 - r_1} e^{r_2 \xi} + T_e \quad \dots (17)$$

donde dicha ecuación señala las temperaturas del fluido a lo largo del tubo colector.

Sustituyendo los valores de  $r_1$  y  $r_2$  y acomodando los términos en función de  $W$  y  $W_2$

$$T_1(\xi) = (T_{in} - T_e) e^{W\xi} \left\{ \frac{\cosh W_2(\xi_1 - \xi) + (W_1/W_2) \sinh W_2(\xi_1 - \xi)}{\cosh W_2 \xi_1 + (W_1/W_2) \sinh W_2 \xi_1} \right\} + T_e \dots (18)$$

donde: 
$$W_2 = \frac{U_L P_c F' \left(1 + \frac{4U_L P_c}{U_L P_c F'}\right)^{1/2}}{2 U_3 P_3}$$

el calor útil obtenido del tubo colector es:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_2(0) - T_1(0))$$

$$Q_u = \left( \frac{\sinh W_2 \xi_1}{W_2 \xi_1 (\cosh W_2 \xi_1 + (W_1/W_2) \sinh W_2 \xi_1)} \right) (F' A_c \alpha T_{IG} - U_L (A_L/A_c) (T_{in} - T_e)) \dots (19)$$

donde la definición de  $\frac{F_R}{F'}$  es el índice de funcionamiento:

$$\frac{F_R}{F'} = \frac{\sinh W_2 \xi_1}{W_2 \xi_1 (\cosh W_2 \xi_1 + (W_1/W_2) \sinh W_2 \xi_1)} \dots (20)$$

### II.1.1 EFICIENCIA DEL COLECTOR

Se define la eficiencia de un colector solar como el cociente entre el calor útil por unidad de superficie y la radiación global incidente. La relación queda expresada de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_G} \dots\dots\dots( 21 )$$

### II.1.2 COEFICIENTE DE PERDIDAS

Las pérdidas de calor ( $Q_L$ ) de un colector solar dependen de las características geométricas y térmicas, de la siguiente manera:

$$Q_L = U_L A_L (T_p - T_a) \dots\dots\dots( 22 )$$

donde:  $U_L$  = coeficiente de pérdidas de calor

$A_L$  = Area de pérdidas de calor

$T_p$  = Temperatura del tubo absorbente

$T_a$  = Temperatura ambiente

Mientras que las pérdidas caloríficas ( $Q_L$ ) pueden ser reducidas al disminuir cualquiera de estos términos, el coeficiente de pérdidas ( $U_L$ ) es el término que rápidamente se reduce por el uso combinado de baja presión y superficie selectiva.

Las pérdidas de calor determinan la máxima temperatura de operación del colector. Por lo cual es indispensable realizar un análisis del coeficiente de pérdidas de calor. Para esto en la fig. II.1.2 se ilustran las diferentes resistencias térmicas, considerando los tres mecanismos de transferencia de calor (convección, conducción y radiación). En consecuencia, el coeficiente de pérdidas de calor para este diseño experimental se determina así:

$$U_L = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4} + \frac{1}{h_5} \right)^{-1} \dots\dots\dots (23)$$

donde:

$h_1 = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}$  (Coeficiente de pérdidas de calor por convección y radiación)

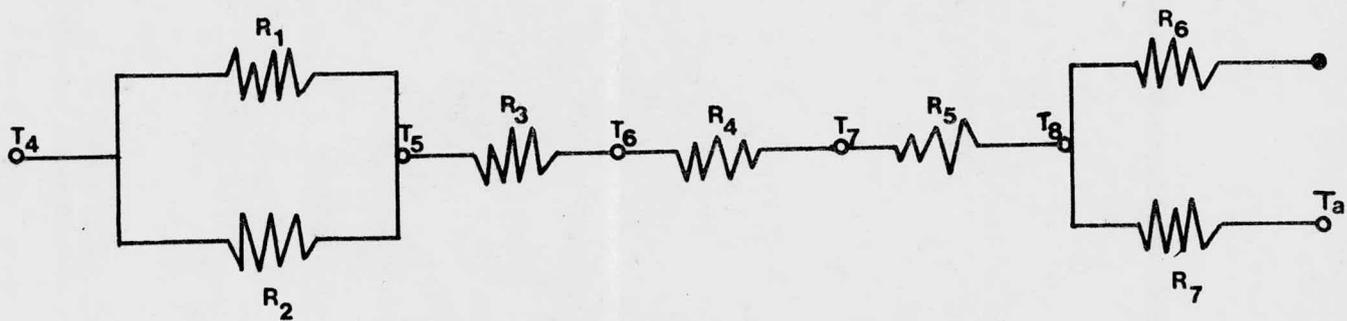
$$h_1 = h_{\text{conv}} + \frac{\sigma(T_4 - T_5)(T_4^2 + T_5^2)}{\frac{1 - \epsilon_4}{\epsilon_4} + \frac{1}{F_{4-5}} + \frac{(1 - \epsilon_5)(A_4)}{\epsilon_5 A_5}}$$

$h_2 = h_{\text{cond}}$  (Coeficiente de pérdidas por conducción).

$$h_2 = \frac{K}{\left(\frac{D_4}{2}\right) \ln\left(\frac{D_6}{D_5}\right)}$$

$h_3 = h_{\text{rad}}$  (Coeficiente de pérdidas por radiación)

$$h_3 = \left\{ \frac{\sigma(T_6 + T_7)(T_6^2 + T_7^2)}{\frac{1 - \epsilon_5}{\epsilon_5} + \frac{1}{F_{5-6}} + \frac{(1 - \epsilon_6)(A_6)}{\epsilon_6 A_7}} \right\} \left( \frac{A_6}{A_4} \right)$$



RESISTENCIAS TERMICAS

FIG.II.1.2.1

$h_4 = h_{\text{cond}}$  (Coeficiente de pérdidas por conducción)

$$h_4 = \frac{k}{\left(\frac{D_4}{2}\right) \ln\left(\frac{D_8}{D_7}\right)}$$

$h_5 = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}$  (Coeficientes de pérdidas por convección y radiación).

$$h_5 = \left\{ h_{\text{conv}} + \frac{\epsilon_7 \sigma (T_8 + T_a)(T_8^2 + T_a^2)}{\frac{1 - \epsilon_6}{\epsilon_6} + \frac{1}{F_{6-7}} + \left(\frac{1 - \epsilon_7}{\epsilon_7}\right) \left(\frac{A_8}{A_6}\right)} \right\} \left(\frac{A_8}{A_4}\right)$$

### II.1.3 RADIACION GLOBAL INCIDENTE

La radiación global consta de las componentes directa y difusa. La radiación directa es aquella que proviene directamente del disco solar. Mientras que la difusa es la reflejada por la atmósfera.

El tubo del colector tiene un ángulo de  $360^\circ$  para la captación de la energía solar, ya que la radiación que pasa a los lados del tubo puede ser parcialmente aprovechada si se coloca en su parte posterior un material reflector que incrementa la radiación incidente (fig. II.1.3.1)

Existe una gran variedad de geometrías de superficies reflectoras (cilindro parabólicas, espiral logarítmicas, etc.), pero en este estudio se considera exclusivamente una superficie reflectora plana (papel aluminio).

El eje del colector tiene una orientación y un ángulo de inclinación de  $19^\circ$  (latitud de la Cd. de México) con el fin de obtener la máxima captación anual de energía solar.

En el caso de un arreglo de varios tubos los parámetros a considerar son básicamente los mismos, pero además habrá que tomar en cuenta el espaciamiento entre tubos como un factor importante.

El que exista un espaciamiento óptimo entre tubos incrementa

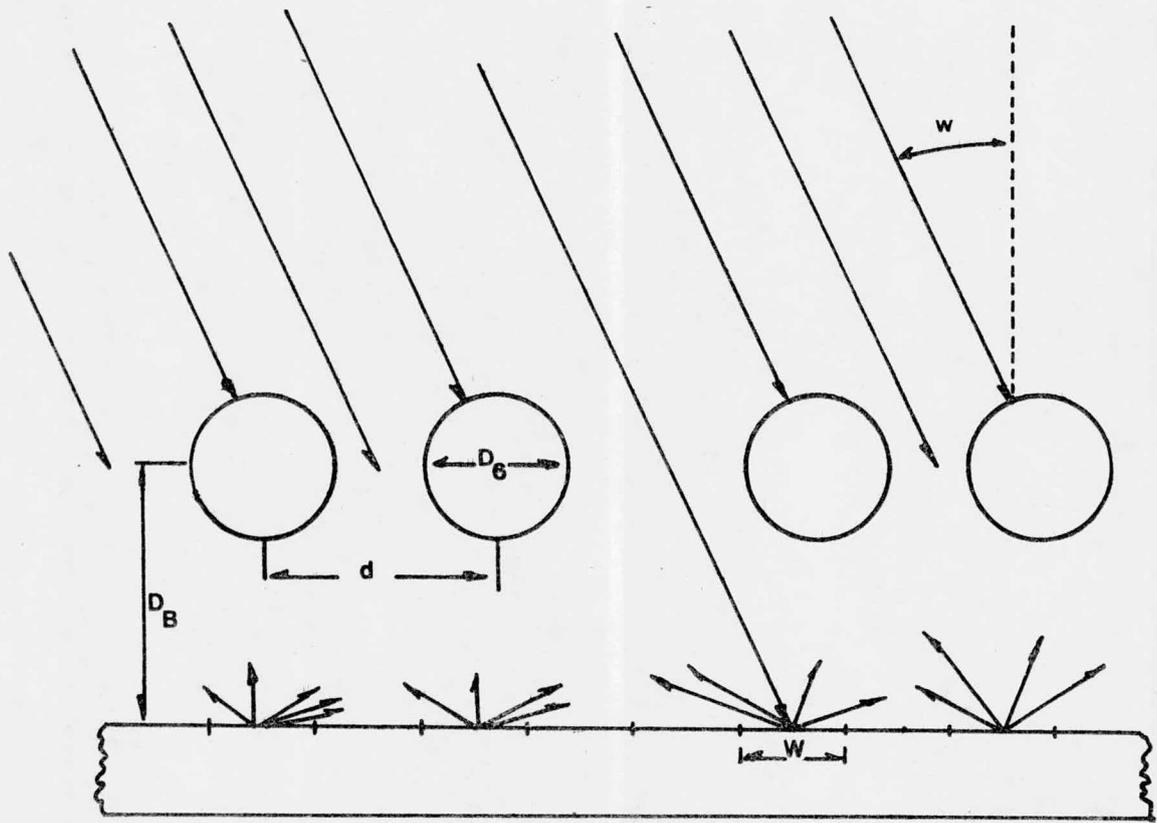


FIG. II.1.3.1

ta la insolación disponible, como se describe a continuación.

- a) Cada tubo tiene un área de captación independiente de la hora del día, por lo cual no existe proyección de sombras por los tubos vecinos, durante el tiempo de operación.
- b) La radiación global disponible a un tubo es generalmente mayor que la de una superficie plana ocupando la misma área de proyección y además se incrementa con el espaciamiento entre tubos.

El análisis de la componente directa y difusa de la radiación solar se describe en el Apéndice B.

CAPITULO III

**DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS**

### III.1 DESCRIPCION DEL COLECTOR EXPERIMENTAL

El colector propuesto consiste de cuatro tubos concéntricos, - los dos exteriores de vidrio, rodean al tubo absorbente, el cual es tá cubierto por una superficie selectiva y se encuentran sellados - en sus extremos formando un espacio anular entre ellos. Esta in terfase ha sido evacuada para eliminar esencialmente la transfere ncia de calor por conducción. Además los tubos de cubierta prote - gen a la superficie selectiva del medio ambiente. El tubo central es de cobre y funciona como tubo absorbente, se encuentra recu - bierto en su parte externa por una superficie selectiva, de cromo negro, la cual tiene propiedades de alta absortividad en el espec - tro solar y baja emisividad en el espectro infrarrojo (6), por lo - que las pérdidas por radiación disminuyen sensiblemente. Un cuar to tubo se inserta dentro del tubo absorbente, a través del cual se introduce el fluido de trabajo; por lo tanto la entrada y salida del fluido de trabajo se realiza por el mismo extremo del tubo (fig. - III.1.1). Este diseño presenta las ventajas de un sello vidrio-vi - drio en los tubos de cubierta y una junta soldada entre los tubos - metálicos, logrando sellos herméticos en ambas uniones.

En la figura III.1.2 se muestra la sección transversal del co lector experimental. Las dimensiones del colector se dan en la - tabla III.1.1

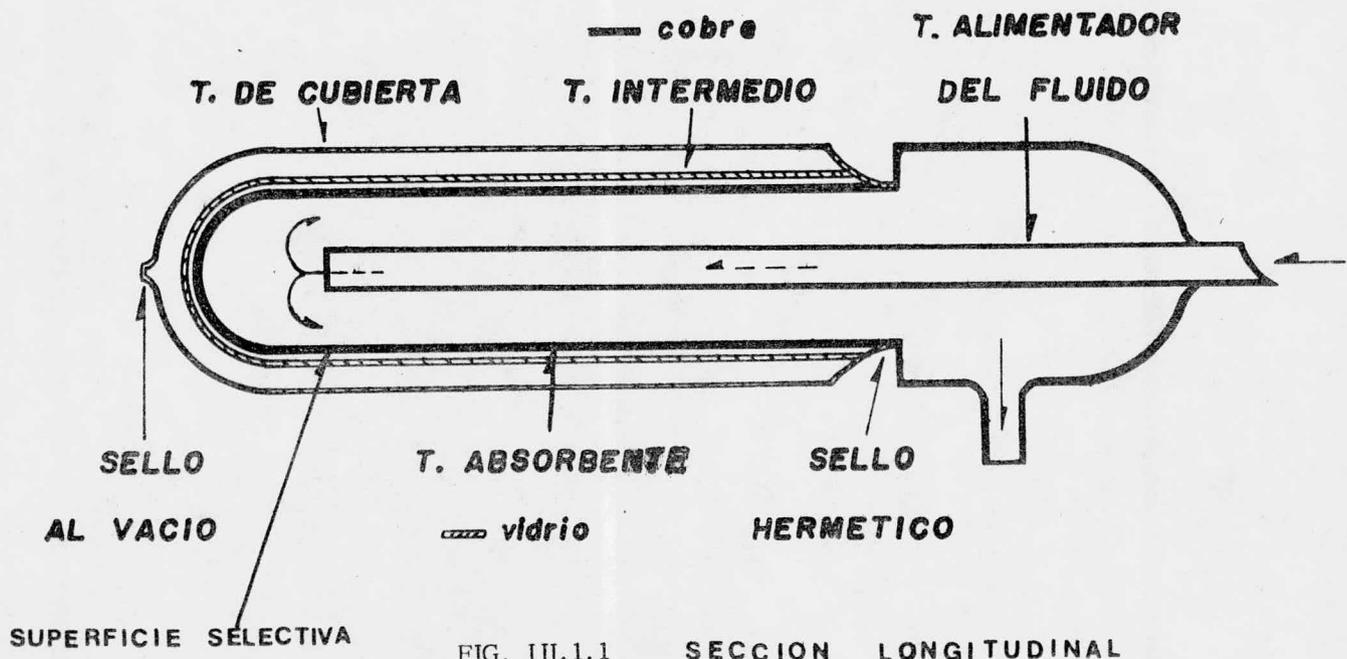


FIG. III.1.1

SECCION LONGITUDINAL

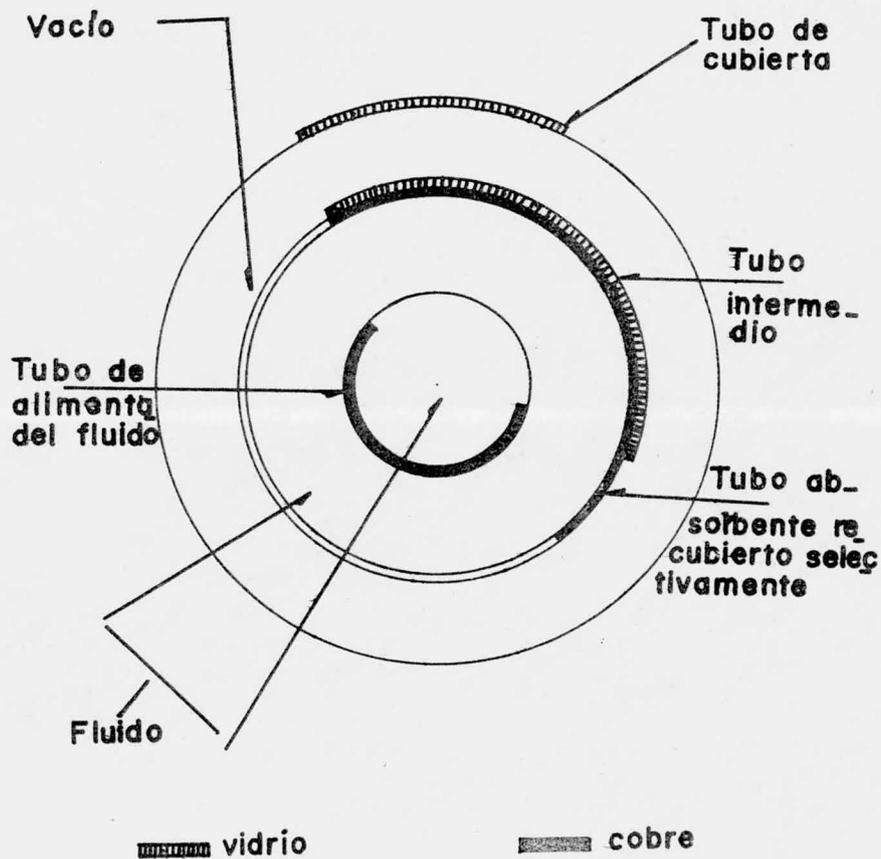


FIG. III.1.2 SECCION TRANSVERSAL

Para evaluar las características térmicas se montó el colector en un banco de pruebas de orientación norte-sur e inclinado sobre la horizontal 19°.

Toda la experimentación se realizó usando una lámina reflectora plana colocada sobre el banco de pruebas, con el propósito de incrementar la radiación incidente.

En las fotos 1, 2 y 3 se muestra el dispositivo experimental.

TUBO	$\frac{l}{m}$	D.O m	D.I. m	E m	MATERIAL
DE CUBIERTA	0.62	0.052	0.0485	0.0035	VIDRIO
INTERMEDIO	0.62	0.042	0.038	0.0032	VIDRIO
ABSORBENTE	0.65	0.036	0.034	0.002	COBRE CON S. S.
DE ALIMENTACION	0.80	0.012	0.009	0.003	COBRE

CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL COLECTOR SOLAR  
TUBULAR EVACUADO

TABLA III.1.1

AREA DE COLECCION= AREA DEL TUBO ABSORBENTE= 0.0735 m<sup>2</sup>  
 VOLUMEN DEL COLECTOR= VOLUMEN DEL TUBO ABSORBENTE=  
 0.751 l.  
 AREA DE LAMINA REFLECTORA: 0.8 m<sup>2</sup>.

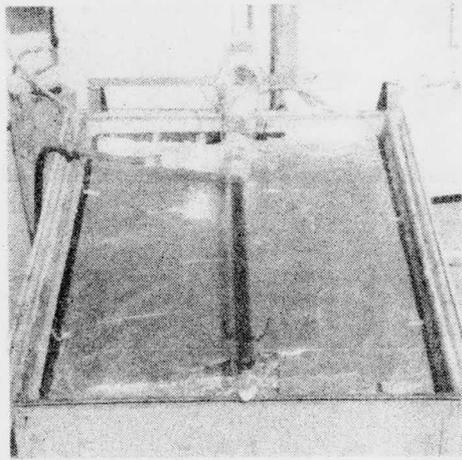


FOTO 1. VISTA FRONTAL DEL COLECTOR

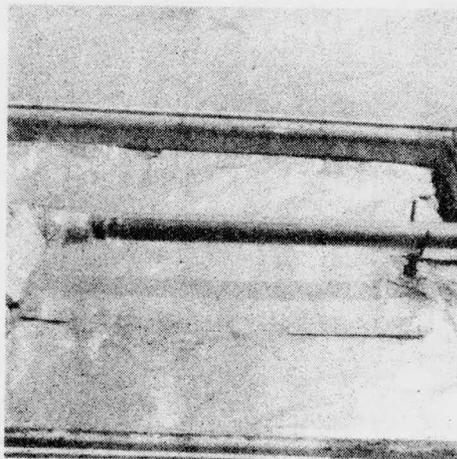


FOTO 2. VISTA LATERAL

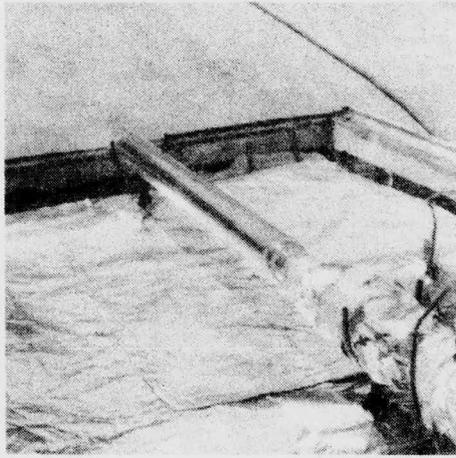


FOTO 3. VISTA POSTERIOR

### III.1.1 MATERIALES

Para seleccionar los materiales que se utilizaron, así como el proceso de la construcción se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- a) El material de los tubos exteriores deberá tener buenas propiedades ópticas, es decir, una alta transmisividad y bajos valores de absorptividad y reflectividad de la radiación solar. Además de tener buena resistencia a la intemperie.
- b) El material base, deberá tener bajos valores de emisivi-

dad de la radiación infrarroja, así como una buena resistencia a la corrosión.

De acuerdo a esto se eligió como material para los tubos exteriores vidrio borosilicato (Pyrex) y como material base cobre.

- c) El recubrimiento selectivo deberá ser un buen absorbente de la radiación solar y al mismo tiempo ser un pobre emisor de la radiación térmica (absortividad 0.9 a 0.95, emisividad 0.1 a 0.2). Como consecuencia se reducen las pérdidas de calor, incrementándose la eficiencia. Tal superficie es conocida como un negro espectralmente selectivo ( 7 ).

Uno de los medios de lograr este tipo de selectividad es recubrir la placa o tubo metálico con una película de elevado coeficiente de absorción para el intervalo de longitudes de onda del visible (0.2-3 $\mu$ ) y con transparencia en el infrarrojo ( $> 3\mu$ ).

J. Quintana ( 7 ) obtuvo buenos resultados experimentales con materiales base como el cobre y el aluminio y como recubrimientos para depositar: óxido de manganeso, cromo negro y sulfuro de cobre. Las mejores propiedades fueron para una muestra de cromo negro sobre cobre, siendo éstas propiedades:

$$\alpha = 0.915 \quad \text{y} \quad \epsilon = 0.079$$

El problema principal radica en lograr la deposición sobre el metal base de tal manera que se cumpla las siguientes características:

- Buenas propiedades ópticas
- Estabilidad química
- Resistencia a la temperatura (250°C)
- Resistencia a la intemperie
- Bajo costo

### III.2 PROCESO DE ELECTRODEPOSICION DE LA SUPERFICIE SELECTIVA

Para el depósito de la superficie selectiva sobre el cobre se efectuó previamente un proceso de decapado y desengrasado, utilizando el siguiente método: El tubo de cobre se sumergió en tricloroetileno caliente durante 15 minutos, con el objeto de desengrasar la superficie y posteriormente se llevó a una solución ácida con la siguiente composición ( 8 ):

Acido sulfúrico .....	800 g/l
Acido Nítrico.....	100 g/l
Acido clorhídrico.....	2.5 g/l
Agua.....	480 g/l

Una vez limpio el tubo se procedió a hacer la electrodeposición. El recubrimiento selectivo elegido para ello fue cromo negro debido a sus excelentes propiedades ópticas en las superficies mostradas en pruebas experimentales ( 7 ). Otras ventajas de usar este recubrimiento fue la disponibilidad de los materiales, y que además, su temperatura máxima de operación es de 250°C sin alteración en su composición química.

El cromo negro es una mezcla de óxidos de cromo que se deposita sobre el metal electrolíticamente a partir de una solución con la siguiente composición:

Trióxido de cromo $\text{CrO}_3$ .....	250-300 g.
Acido acético $\text{CH}_3\text{CO-OH}$ .....	210 ml.
Acetato de bario $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{CO-O})_2$ .....	1 g.
Agua.....	828 ml.

Al efectuar la deposición electroquímica. el tubo de cobre sirvió como cátodo mientras que como ánodo se utilizó láminas de plomo. Las condiciones de la deposición electrolítica fueron:

Temperatura (°C) de 32-45
Tiempo de deposición (min.) variable
Densidad de corriente ( $\text{Amp}/\text{dm}^2$ ) 4-9

El proceso se repitió varias veces variando las condiciones-

de operación (concentración, densidad de corriente, tiempo de deposición y temperatura) hasta lograr una deposición electroquímica de aspecto uniforme de un tono negro mate.

### III. 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

La parte experimental se desarrolló siguiendo la norma internacional propuesta por la National Bureau of Standards (NBS), la cual está ampliamente explicada en el Apéndice C. Los parámetros que se registraron durante cada período de 15 minutos, se presentan en la tabla III.3.1. En las tablas III.3.2 a III.3.17 se muestran los datos y resultados experimentales que corresponden a las 16 corridas reportadas. En cada tabla se presenta la siguiente información obtenida durante períodos de 15 minutos:

- 1.- Fecha del experimento.
- 2.- Hora solar verdadera.
- 3.- Temperatura ambiente media.
- 4.- Flujo másico.
- 5.- Temperatura de entrada (cada minuto).
- 6.- Temperatura de salida (cada minuto).
- 7.- Promedio de temperatura de entrada.
- 8.- Promedio de temperatura de salida.
- 9.- Temperatura media del fluido.

- 10. - Integral en el tiempo de la diferencia de temperaturas de entrada y salida del fluido durante el período.
- 11. - Radiación global media.
- 12. - Radiación global total en el período.
- 13. - Temperatura media del fluido menos temperatura media ambiente entre la radiación global media.

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I}$$

- 14. - Temperatura media de entrada del fluido menos temperatura media ambiente entre la radiación global media.

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I}$$

- 15. - Eficiencia de colección durante el período.

FECHA: 1º de diciembre de 1978

FLUJO MASICO: 20 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>

PERIODO: 12:00 a 12:15 HSV

HORA	RADIACION GLOBAL HOR. (I <sub>G</sub> ) W/m <sup>2</sup>	RADIACION DIRECTA (I <sub>DIR</sub> ) W/m <sup>2</sup>	TEMPERATURA ENTRADA (T <sub>e</sub> ) °C	TEMPERATURA SALIDA (T <sub>s</sub> ) °C	TEMPERATURA PLACA (T <sub>p</sub> ) °C	RADIACION GLOBAL INCL. (G <sub>INC</sub> ) W/m <sup>2</sup>	TEMPERATURA AMBIENTE (T <sub>a</sub> ) °C
12:00	650	651.9	37.5	40.25	41	777	20.7
12:01	646.6	651.5	37.5	40	40.25	772.9	21.5
12:02	640.8	632.2	37.5	40	40.25	781.1	20.7
12:03	646.6	635.1	37	40	40.25	786.1	20.7
12:04	656.5	654.3	37	40	40	795.9	20.2
12:05	615	633.3	37	40	40	795.9	21
12:06	660.8	658.9	37	40	40	801.6	21
12:07	675	680.4	37	40	40	816.4	21.2
12:08	685	692.6	37	40	40	828.7	21
12:09	685.8	689.1	37	40	40	824.6	21.2
12:10	675	668.2	37	40	40	813.9	20.7
12:11	690	685	37	40	40	826.2	21
12:12	695	694.3	37	40	39.5	832.8	20.7
12:13	696.6	692	37	40	39.5	839.3	21.2
12:14	697.5	688	37	40	39.5	841	21
12:15	695.8	679.2	37	40	39.5	836.9	21.7

TABLA III.3.1 PARAMETROS REGISTRADOS DURANTE CADA PERIODO DE 15 MINUTOS

CORRIDA No. 1

FECHA: 11 de noviembre de 1978

PERIODO: 11:30 - 11:45 HS

TEMPERATURA AMBIENTE: 19.8°C

FLUJO MASICO: 85 c.c. min<sup>-1</sup>

$$\frac{T_m - T_a}{I} = \frac{32.8 - 19.8^\circ\text{C}}{965.79} = 0.0134 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\frac{T_e - T_a}{I} = \frac{32 - 19.8}{965.79} = 0.0126 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\eta = \underline{0.1469}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>32</u>	<u>33</u>
2.-	<u>32</u>	<u>33</u>
3.-	<u>32</u>	<u>33.2</u>
4.-	<u>32</u>	<u>33.2</u>
5.-	<u>32</u>	<u>33.5</u>
6.-	<u>32</u>	<u>33.5</u>
7.-	<u>32</u>	<u>33.7</u>
8.-	<u>32</u>	<u>33.7</u>
9.-	<u>32.2</u>	<u>34</u>
10.-	<u>32</u>	<u>34</u>
11.-	<u>32.2</u>	<u>34.2</u>
12.-	<u>32.2</u>	<u>34.2</u>
13.-	<u>32.5</u>	<u>34.2</u>
14.-	<u>32</u>	<u>34.2</u>
15.-	<u>32.2</u>	<u>34.5</u>

PROMEDIOS:

Te: 32°C

Ts: 33.7°C

Tm: 32.8°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 1488 °C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 965.79 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 869215.2 J/m<sup>2</sup>

CORRIDA No. 2

FECHA: 11 de noviembre de 1978

PERIODO: 11:45 a 12:00 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C

FLUJO MASICO: 85 c.c. min<sup>-1</sup>

$$\frac{\overline{T_m - T_a}}{I} = \frac{33.7 - 20}{955.21} = 0.0143 \frac{^\circ\text{Cm}^2}{\text{W}}$$
$$\frac{\overline{T_e - T_a}}{I} = \frac{32.5 - 20}{955.21} = 0.0130 \frac{^\circ\text{Cm}^2}{\text{W}}$$

$$\eta = \underline{0.2277}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>32</u>	<u>34.2</u>
2.-	<u>32.2</u>	<u>34.2</u>
3.-	<u>32.2</u>	<u>34.5</u>
4.-	<u>32</u>	<u>34.7</u>
5.-	<u>32</u>	<u>34.7</u>
6.-	<u>32</u>	<u>34.7</u>
7.-	<u>32.2</u>	<u>35</u>
8.-	<u>32.5</u>	<u>35</u>
9.-	<u>32.7</u>	<u>35.2</u>
10.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
11.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
12.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
13.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
14.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
15.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>

PROMEDIOS:

Te: 32.25°C

Ts: 35°C

Tm: 33.7°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2280°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 955.21 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 85% 97.4 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.3

CORRIDA No. 3

FECHA: 11 de Noviembre de 1978

$$\frac{\overline{T_m} - \overline{T_a}}{I} = \frac{34 - 20}{927.98} = 0.015$$

PERIODO: 12:00 a 12:15 HSV

$$\frac{\overline{T_e} - \overline{T_a}}{I} = \frac{32.7 - 20}{927.98} = 0.0136$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C

$\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.2370}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
2.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
3.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
4.-	<u>32.5</u>	<u>35.5</u>
5.-	<u>32.5</u>	<u>35.5</u>
6.-	<u>32.5</u>	<u>35.5</u>
7.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
8.-	<u>32.5</u>	<u>35.5</u>
9.-	<u>32.2</u>	<u>35.2</u>
10.-	<u>32.2</u>	<u>35.2</u>
11.-	<u>32.5</u>	<u>35.5</u>
12.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
13.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
14.-	<u>33.2</u>	<u>35.7</u>
15.-	<u>33.2</u>	<u>35.7</u>

PROMEDIOS:

Te: 32.7°C

Ts: 35.5°C

Tm: 34°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2496°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 927.98 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 835188 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.4

CORRIDA No. 4

FECHA: 11 de noviembre de 1978

PERIODO: 12:15 a 12:30 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 20.4°C

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{\overline{T_m} - \overline{T_a}}{\overline{I}} = \frac{34.1 - 20.4}{907.96} = 0.0150$$

$$\frac{\overline{T_e} - \overline{T_a}}{\overline{I}} = \frac{32.8 - 20.4}{907.96} = 0.0136$$

$$\eta = \frac{0.2299 \text{ } \frac{\text{°Cm}^2}{\text{W}}}{1}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>33.2</u>	<u>35.7</u>
2.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
3.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
4.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
5.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
6.-	<u>32.7</u>	<u>35.5</u>
7.-	<u>33</u>	<u>35.7</u>
8.-	<u>32.2</u>	<u>35.5</u>
9.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
10.-	<u>33.2</u>	<u>35.5</u>
11.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
12.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
13.-	<u>33</u>	<u>35.7</u>
14.-	<u>33</u>	<u>35.7</u>
15.-	<u>32.7</u>	<u>35.2</u>

PROMEDIOS:

Te: 32.8 °C

Ts: 35.5°C

Tm: 34.1 °C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2394°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 907.96 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 817171.2 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.5

CORRIDA No. 5

FECHA: 11 de noviembre de 1978

PERIODO: 12:30 a 12:45 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.2°C

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{34.4 - 21.2}{886.03} = 0.0148$$

$$\frac{T_e - T_a}{I} = \frac{33.4 - 21.2}{886.03} = 0.0137$$

$\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$

$$\eta = \underline{0.1970}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>32.7</u>	<u>35.2</u>
2.-	<u>33</u>	<u>35.2</u>
3.-	<u>33</u>	<u>35.2</u>
4.-	<u>33</u>	<u>35.2</u>
5.-	<u>33</u>	<u>35.5</u>
6.-	<u>33.2</u>	<u>35.5</u>
7.-	<u>33.5</u>	<u>35.5</u>
8.-	<u>33.2</u>	<u>35.2</u>
9.-	<u>33.5</u>	<u>35.5</u>
10.-	<u>33.7</u>	<u>35.5</u>
11.-	<u>33.7</u>	<u>35.7</u>
12.-	<u>34</u>	<u>35.7</u>
13.-	<u>34.2</u>	<u>35.7</u>
14.-	<u>34</u>	<u>35.7</u>
15.-	<u>34</u>	<u>35.7</u>

PROMEDIOS:

Te: 33.4°C

Ts: 35.5°C

Tm: 34.4°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 1830°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 886.03 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 797431.2 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.6

CORRIDA No. 6

FECHA: 11 de noviembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{35 - 21.5}{852.17} = 0.0158$$

PERIODO: 12:45 a 13:00 HSV

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{34.1 - 21.5}{852.17} = 0.0147$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.5°C

°Cm<sup>2</sup>

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.1820}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>34</u>	<u>35.7</u>
2.-	<u>34.5</u>	<u>36</u>
3.-	<u>34.2</u>	<u>36</u>
4.-	<u>33.5</u>	<u>35.5</u>
5.-	<u>33.7</u>	<u>35.7</u>
6.-	<u>33.7</u>	<u>35.5</u>
7.-	<u>33.7</u>	<u>35.7</u>
8.-	<u>34.2</u>	<u>36</u>
9.-	<u>34.2</u>	<u>36</u>
10.-	<u>34.5</u>	<u>36</u>
11.-	<u>34.7</u>	<u>36.2</u>
12.-	<u>34</u>	<u>36</u>
13.-	<u>34</u>	<u>36</u>
14.-	<u>34.5</u>	<u>36.2</u>
15.-	<u>34.2</u>	<u>36.2</u>

PROMEDIOS:

Te: 34.1°C

Ts: 35.9°C

Tm: 35°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2226°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 852.17 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 756960.8 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.7

CORRIDA No. 7

FECHA: 20 de noviembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{42.5 - 19}{798.3} = 0.0294$$

PERIODO: 11:00 a 11:15 HSV

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{40.9 - 19}{798.3} = 0.0274$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 19°C

$$\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$$

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.1114}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>40.7</u>	<u>44</u>
2.-	<u>40.7</u>	<u>44</u>
3.-	<u>41</u>	<u>44.2</u>
4.-	<u>41</u>	<u>44.2</u>
5.-	<u>41.2</u>	<u>44.5</u>
6.-	<u>41.2</u>	<u>44.5</u>
7.-	<u>41.5</u>	<u>44.7</u>
8.-	<u>41.2</u>	<u>44.5</u>
9.-	<u>41</u>	<u>44.2</u>
10.-	<u>41.5</u>	<u>44.2</u>
11.-	<u>41</u>	<u>44</u>
12.-	<u>40.7</u>	<u>43.7</u>
13.-	<u>40.5</u>	<u>43.7</u>
14.-	<u>40.5</u>	<u>43.5</u>
15.-	<u>40.5</u>	<u>43.7</u>

PROMEDIOS:

Te: 40.9°C

T<sub>S</sub>: 44.1°C

T<sub>m</sub>: 42.5°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2844°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 798.3 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 718475.4 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.8

CORRIDA No. 8

FECHA: 20 de noviembre de 1978

PERIODO: 11:15 a 11:30 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 19.8°C

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{\overline{T_m} - \overline{T_a}}{I} = \frac{41.9 - 19.8}{828.14} = 0.0263$$

$$\frac{\overline{T_e} - \overline{T_a}}{I} = \frac{41 - 19.8}{838.14} = 0.0252$$

$$\eta = \frac{0.0252}{0.0263} = 0.942$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>40.5</u>	<u>43.7</u>
2.-	<u>40.5</u>	<u>43.5</u>
3.-	<u>40.2</u>	<u>43</u>
4.-	<u>40.2</u>	<u>43</u>
5.-	<u>40.5</u>	<u>42.7</u>
6.-	<u>40.7</u>	<u>42.5</u>
7.-	<u>40.7</u>	<u>42.5</u>
8.-	<u>41</u>	<u>42.5</u>
9.-	<u>41</u>	<u>42.5</u>
10.-	<u>41.2</u>	<u>42.5</u>
11.-	<u>41.5</u>	<u>42.7</u>
12.-	<u>41.5</u>	<u>42.7</u>
13.-	<u>41.7</u>	<u>43</u>
14.-	<u>42</u>	<u>43</u>
15.-	<u>42.2</u>	<u>43.2</u>

PROMEDIOS:

Te: 41°C

Ts: 42.9 °C

Tm: 41.9°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 1656°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 828.14 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 754327.8 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.9

CORRIDA No. 9

FECHA: 20 de noviembre de 1978

PERIODO: 11:30 a 11:45 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 20.5°C

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{T_m - T_a}{I} = \frac{43.6 - 20.5}{849.67} = 0.0271$$

$$\frac{T_e - T_a}{I} = \frac{43.2 - 20.5}{849.67} = 0.0267$$

$\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$

$$\eta = \underline{0.0747}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>42.5</u>	<u>43.5</u>
2.-	<u>42.5</u>	<u>43.5</u>
3.-	<u>42.7</u>	<u>43.5</u>
4.-	<u>42.7</u>	<u>43.7</u>
5.-	<u>43</u>	<u>43.7</u>
6.-	<u>43</u>	<u>43.7</u>
7.-	<u>43.2</u>	<u>43.7</u>
8.-	<u>43.2</u>	<u>44</u>
9.-	<u>43.5</u>	<u>44</u>
10.-	<u>43.5</u>	<u>44.2</u>
11.-	<u>43.7</u>	<u>44.2</u>
12.-	<u>43.7</u>	<u>44.2</u>
13.-	<u>43.7</u>	<u>44.5</u>
14.-	<u>43.7</u>	<u>44.5</u>
15.-	<u>43.7</u>	<u>44.5</u>

PROMEDIOS:

Te: 43.2°C

Ts: 44°C

Tm: 43.6°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 666°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 849.67 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 754704.8 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.10

CORRIDA No. 10

FECHA: 20 de noviembre de 1978

PERIODO: 11:45 a 12:00 HSV

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.5°C

FLUJO MASICO: 85 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{T_m - T_a}{I} = \frac{45 - 21.5}{846.55} = 0.028$$

$$\frac{T_e - T_a}{I} = \frac{44.6 - 21.5}{846.55} = 0.0272$$

$$\eta = \frac{0.0272 \text{ } ^\circ\text{Cm}^2}{\text{W}} = 0.1000$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>43.7</u>	<u>44.5</u>
2.-	<u>43.7</u>	<u>44.7</u>
3.-	<u>44</u>	<u>45</u>
4.-	<u>44</u>	<u>45.2</u>
5.-	<u>44.5</u>	<u>45.5</u>
6.-	<u>44.5</u>	<u>45.7</u>
7.-	<u>44.7</u>	<u>45.7</u>
8.-	<u>44.7</u>	<u>45.7</u>
9.-	<u>45</u>	<u>46</u>
10.-	<u>45</u>	<u>45.7</u>
11.-	<u>45</u>	<u>45.7</u>
12.-	<u>45</u>	<u>46</u>
13.-	<u>45.2</u>	<u>46.2</u>
14.-	<u>45.2</u>	<u>46</u>
15.-	<u>45.2</u>	<u>46</u>

PROMEDIOS:

Te: 44.6°C

Ts: 45.8 °C

Tm: 45°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 888°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 846.55 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 761901.6 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.11

CORRIDA No. 11

FECHA: 28 de noviembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{57.5 - 21.5}{878.25} = 0.0410$$

PERIODO: 12:00 a 12:15 HSV

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{56.9 - 21.5}{878.25} = 0.0403$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.5°C

$$\eta = \frac{0.0403}{0.0410} = 0.98$$

FLUJO MASICO: 40 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \frac{0.0403}{0.0410} = 0.98$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>58.2</u>	<u>58.7</u>
2.-	<u>58</u>	<u>59</u>
3.-	<u>57.8</u>	<u>58.7</u>
4.-	<u>57.8</u>	<u>58.5</u>
5.-	<u>57.6</u>	<u>58.2</u>
6.-	<u>57.4</u>	<u>58.2</u>
7.-	<u>57.2</u>	<u>58.2</u>
8.-	<u>57</u>	<u>58.2</u>
9.-	<u>56.7</u>	<u>58</u>
10.-	<u>56.2</u>	<u>58</u>
11.-	<u>56.5</u>	<u>58</u>
12.-	<u>56.</u>	<u>57.8</u>
13.-	<u>56.2</u>	<u>57.6</u>
14.-	<u>55.7</u>	<u>57.6</u>
15.-	<u>55.7</u>	<u>57.2</u>

PROMEDIOS:

Te: 56.9°C

Ts: 58.1°C

Tm: 56.5°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 1074°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 878.25 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 790426.2 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.12

CORRIDA No. 12

FECHA: 28 de noviembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{60.4 - 21.2}{923.11} = 0.0425$$

PERIODO: 12:15 a 12:30 HSV

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{60.1 - 21.2}{923.11} = 0.0421$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.2°C

$$\frac{\text{°Cm}^2}{W}$$

FLUJO MASICO: 40 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.0281}$$

**MEDICIONES  
EXPERIMENTALES**

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>60.8</u>	<u>61.2</u>
2.-	<u>61</u>	<u>61.2</u>
3.-	<u>60.8</u>	<u>61.2</u>
4.-	<u>60.8</u>	<u>61</u>
5.-	<u>60.4</u>	<u>60.8</u>
6.-	<u>60.6</u>	<u>61</u>
7.-	<u>60.2</u>	<u>61</u>
8.-	<u>59.7</u>	<u>60.8</u>
9.-	<u>59.7</u>	<u>60.6</u>
10.-	<u>59.2</u>	<u>60.4</u>
11.-	<u>59.5</u>	<u>60.2</u>
12.-	<u>59.7</u>	<u>60.6</u>
13.-	<u>60</u>	<u>60.8</u>
14.-	<u>60</u>	<u>60.6</u>
15.-	<u>59.7</u>	<u>60.4</u>

**PROMEDIOS:**

Te: 60.1°C

Ts: 60.8°C

Tm: 60.4°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 582°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 923.11 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL 830803.2 J/m<sup>2</sup>

TABLA III. 3.13

CORRIDA No. 13

FECHA: 1º de diciembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{38.5 - 21.8}{808.79} = 0.0206$$

PERIODO: 12:00 a 12:15 HSV

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{37.2 - 21.8}{808.79} = 0.019$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.8°C

$$\eta = \frac{0.1319 \text{ } ^\circ\text{Cm}^2}{\text{W}}$$

FLUJO MASICO: 20 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.1319}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>37.5</u>	<u>40</u>
2.-	<u>37.5</u>	<u>40.2</u>
3.-	<u>37.5</u>	<u>39.8</u>
4.-	<u>37.2</u>	<u>40</u>
5.-	<u>37.5</u>	<u>40.2</u>
6.-	<u>37.5</u>	<u>40</u>
7.-	<u>37.5</u>	<u>40</u>
8.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
9.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
10.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
11.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
12.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
13.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
14.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
15.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>

PROMEDIOS:

Te: 37.2°C

Ts: 39.9°C

Tm: 38.5°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2376°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 808.79 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 727917.6 J/m<sup>2</sup>

CORRIDA No. 14

FECHA: 1º de diciembre de 1978

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{38.2 - 21.5}{799.39} = 0.021$$

PERIODO: 12:15 a 12:30

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{36.8 - 21.5}{799.39} = 0.0191$$

TEMPERATURA AMBIENTE: 21.5°C

$$\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$$

FLUJO MASICO: 20 cc min<sup>-1</sup>

$$\eta = \underline{0.1355}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>T<sub>e</sub></u>	<u>T<sub>s</sub></u>
1.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
2.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
3.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
4.-	<u>37.2</u>	<u>39.8</u>
5.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
6.-	<u>37</u>	<u>39.8</u>
7.-	<u>37</u>	<u>39.6</u>
8.-	<u>37</u>	<u>39.6</u>
9.-	<u>37</u>	<u>39.6</u>
10.-	<u>36.7</u>	<u>39.6</u>
11.-	<u>36.7</u>	<u>39.4</u>
12.-	<u>36.7</u>	<u>39.4</u>
13.-	<u>36.7</u>	<u>39.2</u>
14.-	<u>36.7</u>	<u>39.2</u>
15.-	<u>36.5</u>	<u>39.2</u>

PROMEDIOS:

T<sub>e</sub>: 36.8°C

T<sub>s</sub>: 39.6°C

T<sub>m</sub>: 38.2°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2412°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 799.39 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 719458.8 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.15

CORRIDA No. 15

FECHA: 1º de diciembre de 1979

PERIODO: 12:30 a 12:45

TEMPERATURA AMBIENTE: 21°C

FLUJO MASICO: 20 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{37.6 - 21}{761.53} = 0.022$$

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{36.3 - 21}{761.53} = 0.020$$

$$\eta = \frac{0.1312}{\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}}$$

**MEDICIONES  
EXPERIMENTALES**

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>36.5</u>	<u>39.2</u>
2.-	<u>36.5</u>	<u>39.2</u>
3.-	<u>36.5</u>	<u>39.2</u>
4.-	<u>36.5</u>	<u>39.2</u>
5.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
6.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
7.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
8.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
9.-	<u>36.2</u>	<u>38.7</u>
10.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>
11.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>
12.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>
13.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>
14.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>
15.-	<u>36.2</u>	<u>38.5</u>

**PROMEDIOS:**

Te: 36.3°C                      Ts: 38.8°C                      Tm: 37.6°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2226°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 761.53 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 685377. J/m<sup>2</sup>

TABLA III. 3.16

CORRIDA No. 16

FECHA: 1<sup>o</sup> de diciembre de 1978

PERIODO: 12:45 a 13:00

TEMPERATURA AMBIENTE: 22°C

FLUJO MASICO: 20 cc min<sup>-1</sup>

$$\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} = \frac{37.2 - 22}{777.59} = 0.0195$$

$$\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} = \frac{36 - 22}{777.59} = 0.018 \frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$$

$$\eta = \underline{0.1258}$$

MEDICIONES  
EXPERIMENTALES

	<u>Te</u>	<u>Ts</u>
1.-	<u>36.5</u>	<u>38.7</u>
2.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
3.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
4.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
5.-	<u>36.5</u>	<u>39</u>
6.-	<u>36.2</u>	<u>38.7</u>
7.-	<u>36.2</u>	<u>38.7</u>
8.-	<u>36</u>	<u>38.7</u>
9.-	<u>36</u>	<u>38.7</u>
10.-	<u>36</u>	<u>38.5</u>
11.-	<u>36</u>	<u>38.2</u>
12.-	<u>35.7</u>	<u>38.2</u>
13.-	<u>35.7</u>	<u>38</u>
14.-	<u>35.5</u>	<u>37.5</u>
15.-	<u>35.5</u>	<u>37.2</u>

PROMEDIOS:

Te: 36°C

Ts: 38.5°C

Tm: 37.2°C

DIFERENCIA INTEGRADA: 2148°C seg

RADIACION GLOBAL MEDIA: 777.59 Wm<sup>-2</sup>

RADIACION GLOBAL TOTAL: 699835.8 J/m<sup>2</sup>

TABLA III.3.17

RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

EXPERIMENTO	$\frac{T_m - T_a}{I}$ $\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$	$\frac{T_e - T_a}{I}$ $\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}$	$T_m$ $^{\circ}\text{C}$	$\eta$
1	$1.34 \times 10^{-2}$	$1.26 \times 10^{-2}$	32.8	0.1469
2	1.43 "	1.30 "	33.7	0.2277
3	1.50 "	1.36 "	34	0.2370
4	1.50 "	1.36 "	34.1	0.2299
5	1.48 "	1.37 "	34.4	0.1970
6	1.58 "	1.47 "	35	0.1820
7	2.94 "	2.74 "	42.5	0.1114
8	2.63 "	2.52 "	41.9	0.0942
9	2.71 "	2.67 "	43.6	0.0747
10	2.80 "	2.72 "	45	0.1000
11	4.10 "	4.03 "	56.5	0.0549
12	4.25 "	4.21 "	60.4	0.0281
13	2.06 "	1.90 "	38.5	0.1319
14	2.10 "	1.91 "	38.2	0.1355
15	2.20 "	2.00 "	37.6	0.1312
16	1.95 "	1.80 "	37.2	0.1258

TABLA III 3.18

Se realizaron las siguientes gráficas:

Fig. III 3-1  $\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I} \text{ Vs } \eta$

Fig. III 3-2  $\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I} \text{ Vs } \eta$

Fig. III 3-3  $T_m \text{ Vs } \eta$

Fig. III 3-4  $T \text{ Vs HSV}$

Aplicando en los tres primeros casos el método de mínimos cuadrados para ajustar las curvas.

En las gráficas de eficiencia contra diferencia de temperaturas entre insolación (Figs. III 3-1, III 3-2) la ordenada al origen es una función de la transmisividad de la cubierta por la absorptividad del tubo ( $F_R (\tau\alpha)$ ) este valor es bajo ( $\approx .40$ ) por el uso de dos - cubiertas de vidrio.

La pendiente de las curvas es a su vez función del coefi - ciente de pérdida ( $F_R U_L$ ). Dicho valor no es tan bajo como se - esperaba, debido a las pérdidas por convección y radiación existen - tes entre el tubo de cobre y el primer tubo de cubierta.

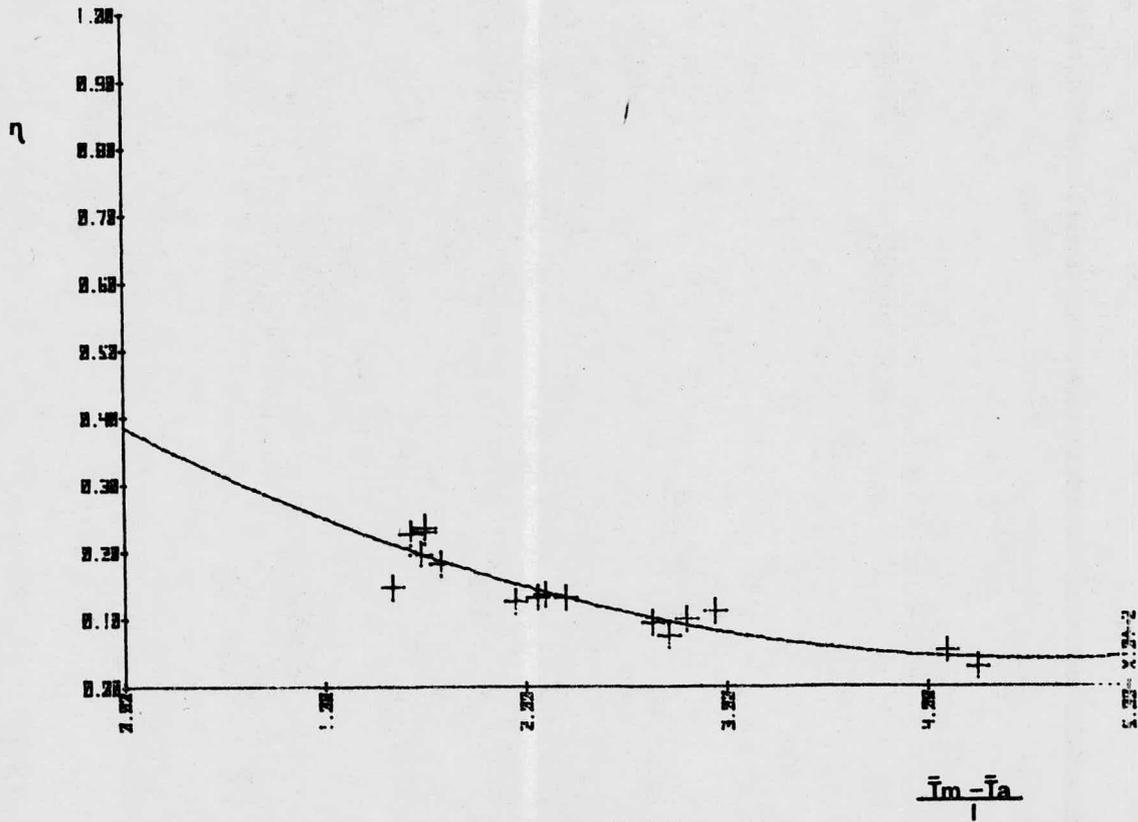


FIG. III.2.1

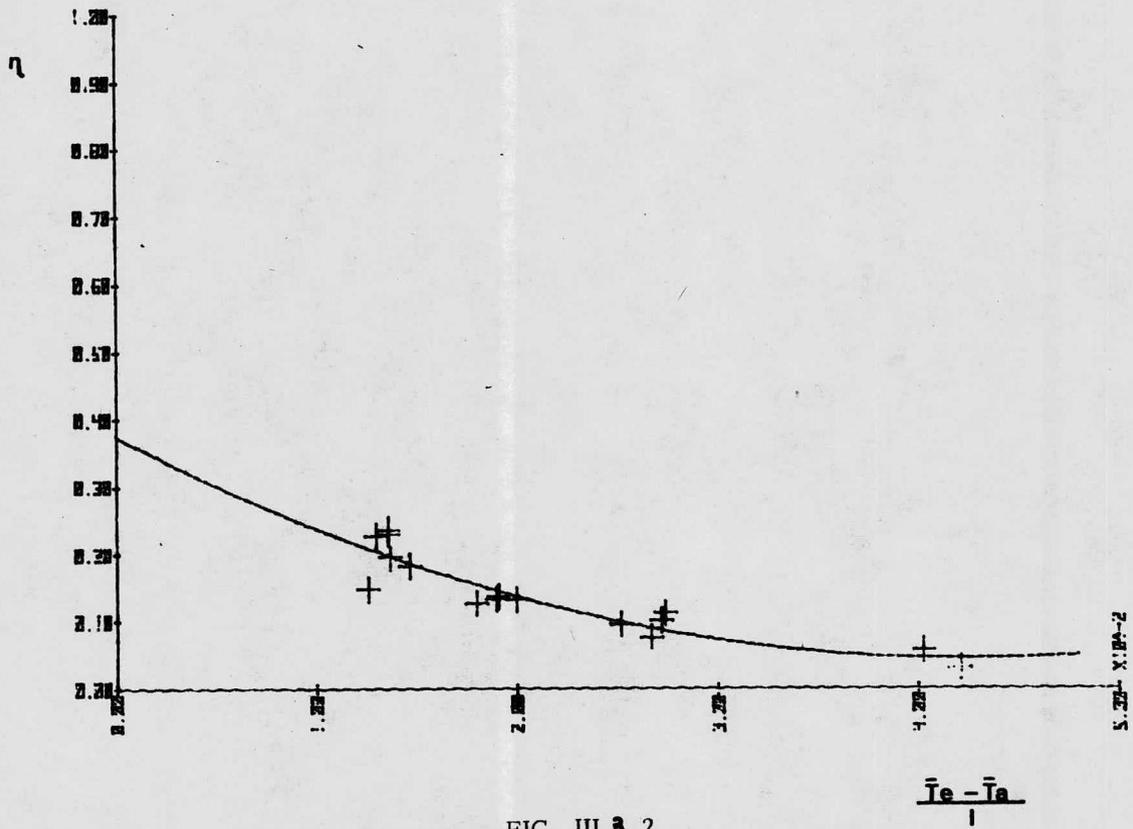


FIG. III.3.2

7

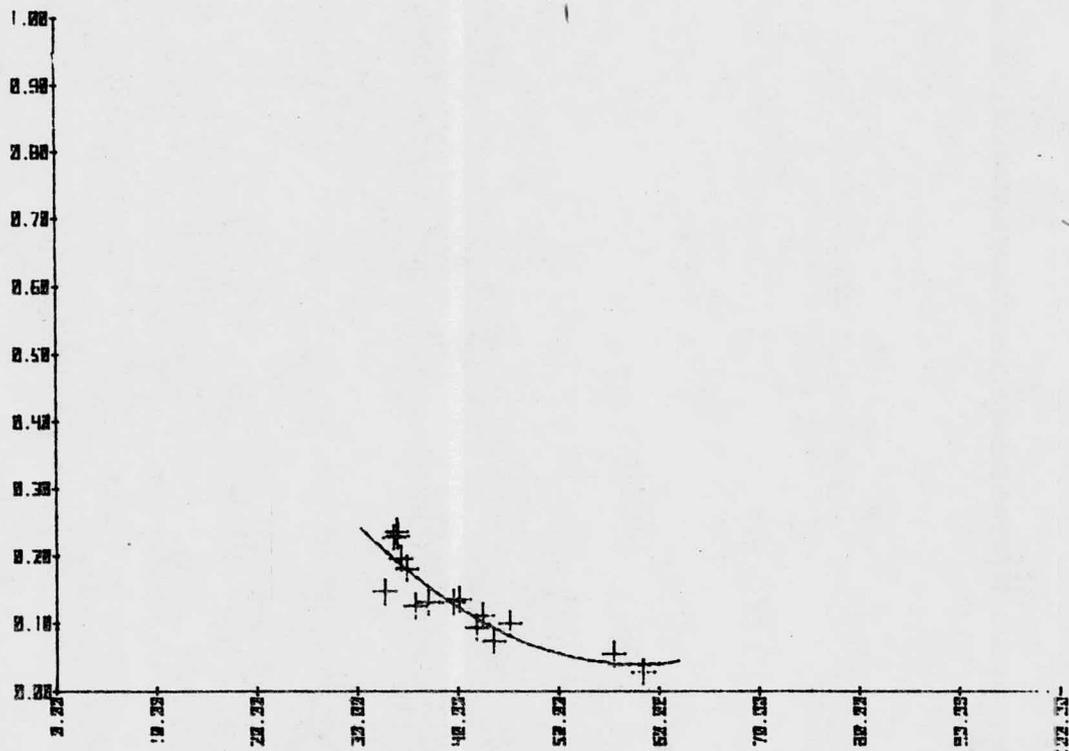


FIG. III.3.3

Tm

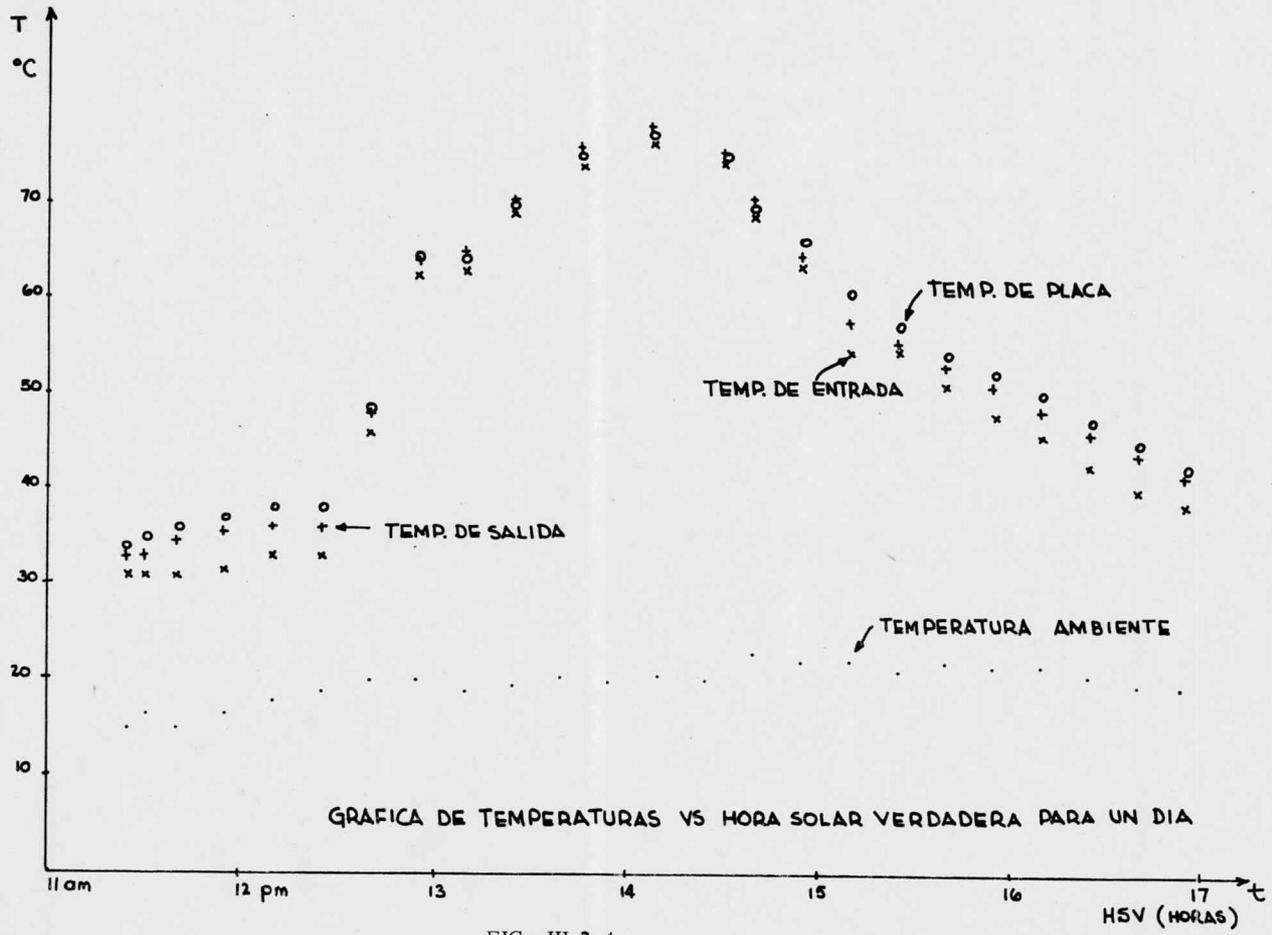


FIG. III.3.4.

### III.4 MODELO MATEMATICO

La radiación global incidente está constituida, tanto por la componente directa como la difusa.

#### III.4.1 Componente Directa. -

En un tubo evacuado intercepta tanto la componente directa de la radiación solar como la porción reflejada por la superficie posterior (aluminio). La componente directa interceptada puede determinarse considerando el eje del tubo en orientación norte-sur inclinado a un ángulo sobre la horizontal a una latitud  $L$ . Si  $S_{DIR}$  es la radiación directa incidente en un plano perpendicular a los rayos del sol, inciden a una declinación dada  $S$  y considerando el ángulo horario  $w$  como cero al mediodía solar, entonces la componente interceptada directamente por el tubo absorbedor  $S_{BD}$  se puede expresar como ( 9 ):

$$S'_{BD} = S_{DIR} \left( 1 - \left[ \sin(\Theta - L) \cos \delta \cos w + \cos(\Theta - L) \sin \delta \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots ( 24 )$$

Esta ecuación es válida solamente cuando toda la longitud del tubo no está sombreada, que sería el caso de un tubo colector individual o de un arreglo de tubos adecuadamente espaciados.

Para el caso particular en que el ángulo de inclinación  $\Theta$  es igual a la latitud  $L$ , se puede ver de la ec. (24) que  $S'_{BD}$  es inde

pendiente de  $w$  durante el período de insolación. De donde se obtiene:

$$S'_{BD} = S_{DIR} \cos \delta \dots\dots\dots (25)$$

Cuando se tiene un arreglo con los tubos espaciados una distancia  $d$ , el sombreado ocurre a ángulos horarios.

donde: 
$$\left| w_o \right| = \cos^{-1} \left[ \frac{D_{COL} + D_{CUB}}{2d} \right] \dots\dots\dots (26)$$

$D_{COL}$  = Diámetro tubo colector

$D_{CUB}$  = Diámetro tubo cubierta

La componente directa interceptada por un tubo en un arreglo es:

$$S_{BD} = g(w) S'_{BD} \dots\dots\dots (27)$$

donde  $g(w)$  es el factor de sombreado, el cual está dado por:

$$g(w) = 1 \quad ; \quad \left| w \right| \leq \left| w_o \right|$$

$$g(w) = \frac{d}{D_{COL}} \cos w + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{D_{CUB}}{D_{COL}} \right) ; \quad \left| w \right| > \left| w_o \right|$$

Beekley y Mather en la práctica han demostrado que es una buena aproximación suponer que  $D_{COL} \approx D_{CUB}$  para evaluar el factor de sombreado  $g(w)$  (9). Así llegaron a la conclusión de que si se toma una separación  $d = 2 D_{CUB}$ ,  $\left| w_o \right| = 60^\circ$  los tubos individuales no proyectarán sombras a los tubos vecinos durante 8 horas al día. La gama de  $g(w)$  para la cual no se produce sombreado es:  $1 \leq g(w) \leq 2 \cos w$ .

Además de la componente directa interceptada  $S_{BD}$  en un arreglo de tubos es significativa la componente debido a las reflexiones de radiación directa de la lámina de aluminio  $S_{BR}$ .

En general, la radiación reflejada por la parte posterior tiene una componente, tanto especular así como difusa, aunque para estimar la componente  $S_{BR}$  se supone únicamente reflexiones difusas. La fig. III 4.1.1 presenta la geometría del arreglo.

Para estimar este parámetro Beekley y Mather (9) introducen la cantidad de energía que incide en cada banda de la lámina reflectora, la cual se expresa:

$$Q_{BIN} = R_p S_{BH} W_I \dots\dots\dots(28)$$

donde  $R_p$  es el factor angular para convertir la radiación directa sobre una superficie horizontal a una superficie orientada al sur e inclinada un ángulo  $\theta$ .

$$R_p = \frac{\cos(L-\theta) \cos \delta \cos W + \sin(L-\theta) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \cos W + \sin L \sin \delta} \dots\dots\dots(29)$$

$S_{BH}$  = Radiación directa sobre una superficie horizontal

$W$  = Ancho de la banda.

Si la superficie reflectora tiene una reflectividad difusa  $p$ , la cantidad de la energía reflejada está dada por:

$$Q_{BOUT} = p R_p S_{BH} W_I \dots\dots\dots(30)$$

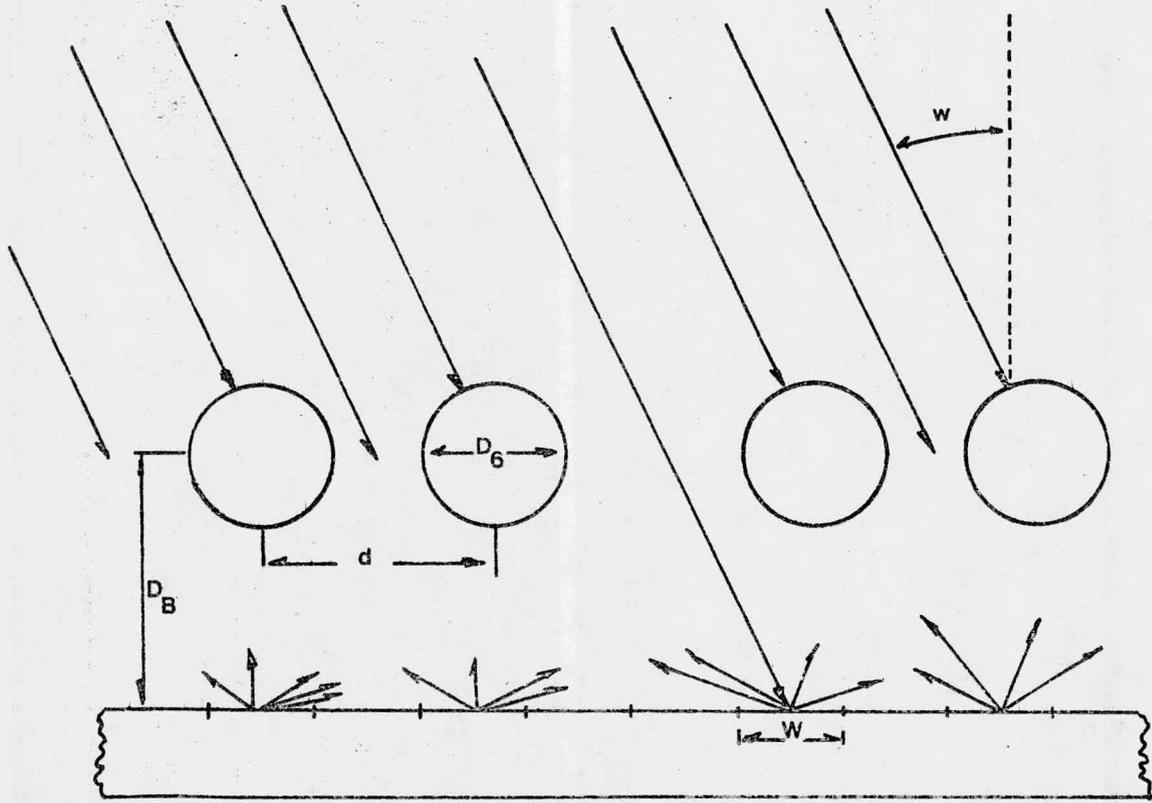


FIG. III.4.1.1

considerando los factores de forma geométricos y sumando las contribuciones sobre todas las bandas reflectoras, se obtiene:

$$S_{BR} = \frac{\rho R_p S_{BH}}{2} \sum_i \tan^{-1} \frac{W/D_B}{1 + (x_{iT}^2 - W^2/4)/D_o^2} \dots (31)$$

un análisis detallado muestra que para una distancia menor o igual a 2 veces el diámetro de la cubierta

está dada por :

$$S_{BR} = \frac{\rho R_p S_{BH} W \Delta}{D_{CUB}} \dots (32)$$

donde:  $\Delta \equiv \frac{D_{CUB}}{D_{COL}} \sum_i F_{it} \Big|_{W=0} \dots (33)$

Existe una porción de la componente directa que incide tangencialmente a los tubos de cubierta y por tanto tiene un ángulo de reflexión grande. Parte de esta radiación alcanza a los tubos vecinos ya sea directa o indirectamente, vía reflexiones secundarias de la lámina posterior. Se ha probado (9) que la contribución completa de estas reflexiones es pequeña, por lo que no se consideran en este análisis.

### III.4.2 Componente Difusa

Como en el caso de la componente directa, la componente difusa de radiación solar es aceptada directamente por los tubos e indirectamente después de reflejarse en la superficie posterior. Si



el origen aparente de la radiación difusa se localiza sobre una región del cielo cerca del disco solar, como puede ser el caso en un día claro, es aceptable tratar la componente difusa como radiación directa y usar la radiación global en lugar de la radiación directa en las ecuaciones de la sección anterior.

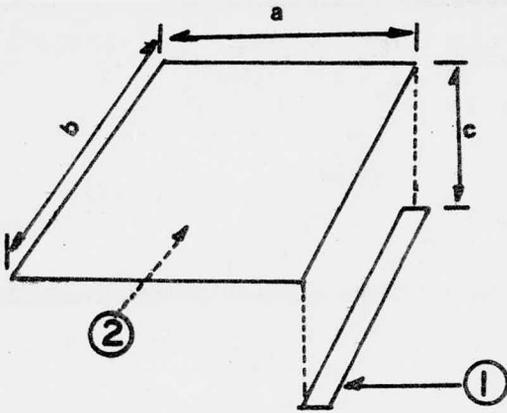
Si por otro lado, la componente difusa se distribuye uniformemente sobre la bóveda celeste, como puede ser el caso de un día nublado, su contribución a la radiación global sobre el tubo debe calcularse por separado. En el siguiente análisis se supone que la radiación difusa se distribuye uniformemente sobre el cielo.

Si  $S_d$  es la radiación difusa proveniente de la bóveda celeste y  $F_{TS}$  es el factor de forma entre el tubo absorbedor y el cielo, el flujo difuso aceptado directamente por el tubo absorbente es:

$$S_{dD} = \pi F_{TS} S_d \dots\dots\dots(34)$$

El flujo  $S_{dD}$  está definido por unidad de la superficie de la sección transversal de tubo absorbente.

La componente  $S_{dR}$  de radiación difusa reflejada de la lámina reflectora deberá adicionarse a  $S_{dD}$ . Consideremos una banda delgada de la lámina reflectora con un ancho  $dx$  y una longitud  $l$  paralela al eje del tubo, representada en la figura III.4.2.1 de acuerdo a los factores de configuración de Siegel y Howell (10).



Factor de config. entre -  
 una tira elemental A y un  
 rectángulo en un plano, -  
 paralelo a la tira.

FIG. III.4.2.1

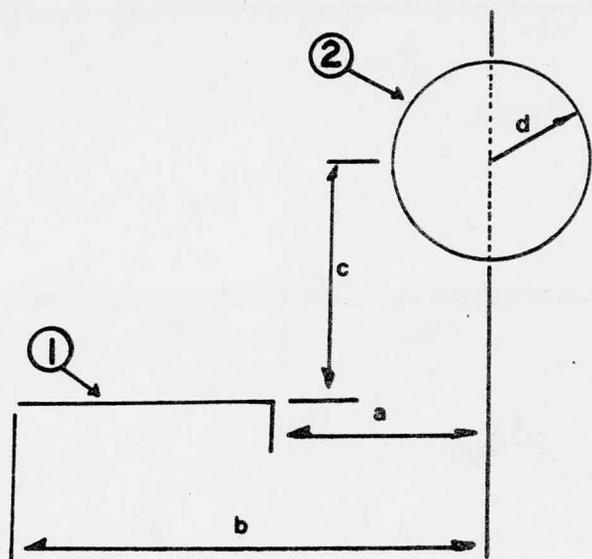
Sea  $F_{dx,S}(G)$  dicho factor de forma de esta banda al cielo a través de una abertura particular G. Entonces el factor de forma total de la tira al cielo a través de todas las aberturas es:

$$F_{dx,S} = \sum_G F_{dx,S}(G) \dots\dots\dots (35)$$

donde la sumatoria incluye a todas las aberturas G a través de las cuales la luz difusa puede alcanzar la tira dx. La radiación posterior reflejada por unidad de área de sección transversal del tubo absorbente es:

$$dS_{dr} = \pi p S_d F_{dx,S} dF_T, dx \dots\dots\dots (36)$$

donde  $dF_T, dx$  es el factor de forma entre un tubo absorbente dado a una tira dx, representado en la fig. III.4.2.2



Factor de configuración en  
tre una placa de ancho fi-  
nito y un cilindro paralelo.

FIG. III.4.2.2

y está definido por:

$$F_{1-2} = F_{T,dx} = \frac{r}{b-a} \left[ \tan^{-1} \frac{b}{c} - \tan^{-1} \frac{a}{c} \right];$$

y  $p$  es la reflectividad de la lámina para radiación difusa, aquí se supone igual a aquella para la radiación directa.

Integrando sobre todas las bandas  $dx$ ,

$$S_{dR} = \pi p S_d \int_{\text{lámina}} dF_{T,dx} F_{dx}, S \quad \pi p S_d F_{TP} \bar{F} \dots \dots \dots (37)$$

donde  $F_{TP}$  es el factor de forma de un tubo absorbente a la parte posterior de la lámina y la función  $\bar{F}$  está definida como:

$$\bar{F} = \frac{1}{F_{TP}} \int_{\text{lámina}} dF_{T,dx} F_{dx}, S \dots \dots \dots (38)$$

Para una lámina suficientemente grande, es una buena aproximación considerar  $F_{TP} \approx F_{TS}$ , así que la insolación difusa total en un tubo absorbente se convierte en:

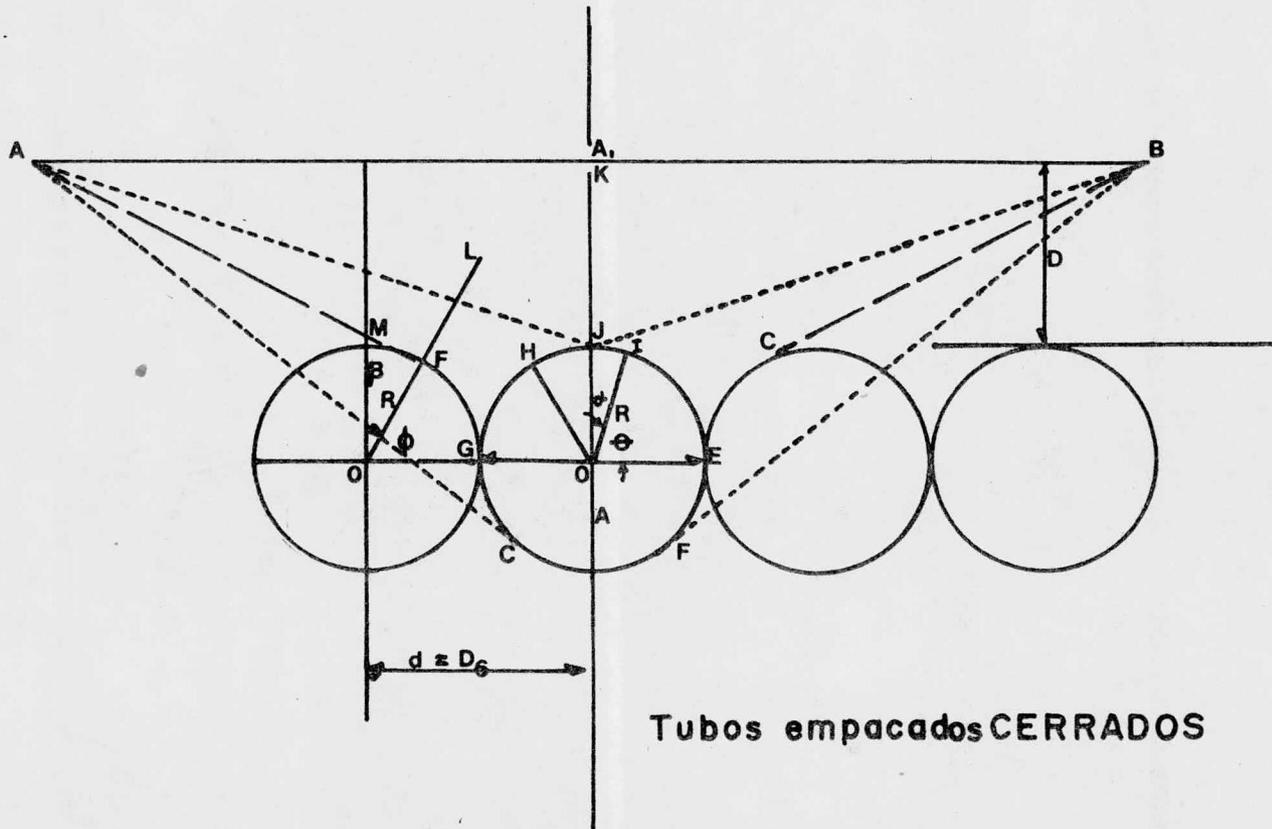
$$S_{dT} = \pi F_{TS} S_d (1 + p \bar{F}) \dots\dots\dots (39)$$

El factor  $F_{TS}$  está evaluado por el método de Hottel (11) "de cuerda cruzada y no cruzada" como se muestra en las figuras (III. 4. 2. 3, 4, 5) y como resultado se encontró que varía de acuerdo al espaciamiento entre tubos "d" entre los límites  $0.27 \leq F_{TS} \leq 0.5$

El límite inferior corresponde a una serie de tubos unidos uno a otro (empacados), tal como se muestra en la fig. III. 4. 2. 3 junto con el cálculo del valor para  $F_{TS}$  obtenido por el método de Hottel (11). Mientras que el límite superior corresponde a tubos finitamente separados ( es el caso de un tubo individual ) fig. III. 4. 2. 4.

Mather sugiere (9) para cuando se tiene una serie de tubos una separación óptima entre centros de tubos vecinos igual  $d=2D_{CUB}$ , en la fig. III. 4. 2. 5 se ilustra este caso con el cálculo respectivo del factor  $F_{TS}$ .

La función  $\bar{F}$  definida por la ec. (38) comprende todos los factores de forma de la radiación difusa reflejada hacia los tubos



Tubos empacados CERRADOS

FIG. III.4.2.3

$$F = \frac{\Delta JIE + BJHG - AFG - BCE}{2A}$$

$$AJIE = BJHG$$

$$F = \frac{2AJIE - 2AFG}{2A}$$

$$AFG = BCE$$

$$F = \frac{AJIE - AFG}{2\pi R}$$

DONDE:  $AJIE = L_1$  y  $AFG = L_2$

$$L_1: AJ = [(JK)^2 + (AK)^2]^{\frac{1}{2}} \quad ; \quad JI = [(OJ)^2 - R^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$IE = \ominus R \text{ DEL TRIANGULO OIJ} \quad \text{sen } \alpha = \frac{JI}{OJ}$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \frac{JI}{OJ} \quad \ominus = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - \text{sen}^{-1} \frac{JI}{OJ} \cdot R$$

$$L_2: AF = [(AL)^2 - (LF)^2]^{\frac{1}{2}} \quad ; \quad FG = \phi R \text{ DEL } \Delta OFM$$

$$FG = \phi R \quad \phi = 90^\circ - \text{sen}^{-1} \frac{FM}{OM} \cdot R$$

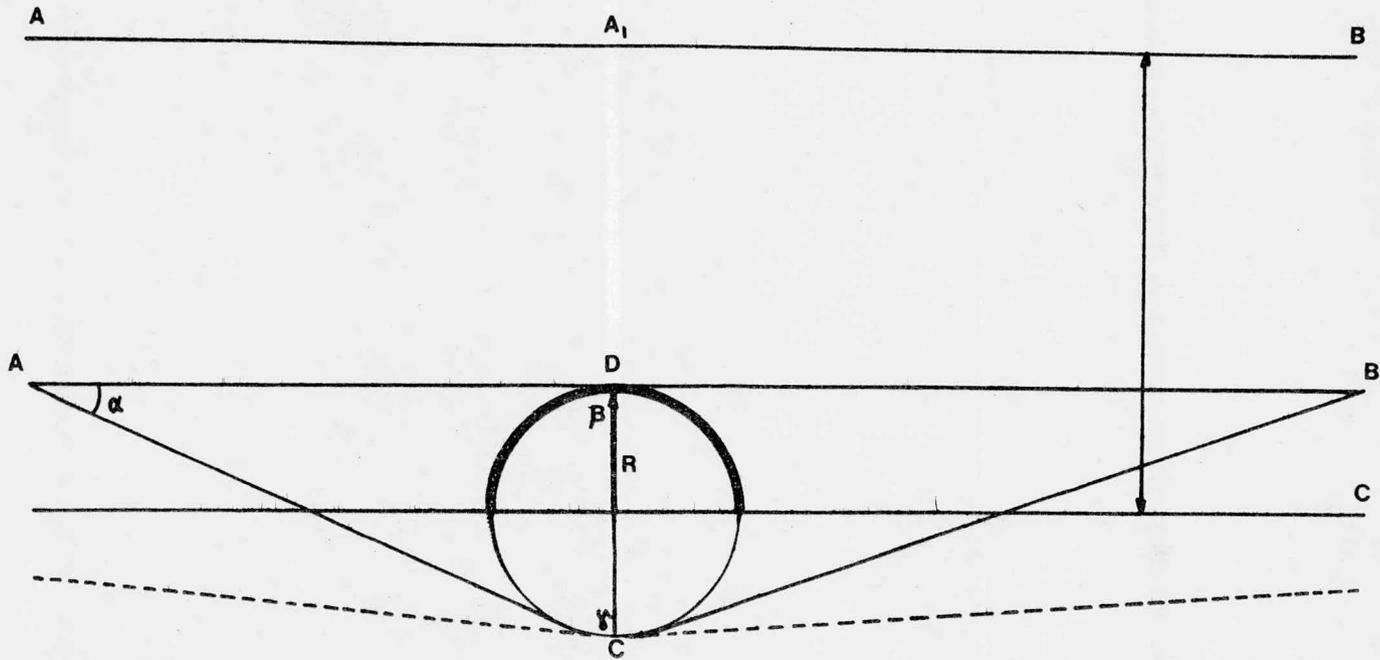
$$F_{1-2} = \frac{[(JK)^2 + (AK)^2]^{\frac{1}{2}} + [(OJ)^2 - R^2]^{\frac{1}{2}} + [(90^\circ - \text{sen}^{-1} \frac{JI}{OJ}) R]}{2\pi R} -$$

$$\frac{[(AL)^2 - (LF)^2]^{\frac{1}{2}} + [(90^\circ - \text{sen}^{-1} \frac{FM}{OM}) R]}{2\pi R}$$

$$2\pi R$$

SUSTITUYENDO VALORES SE OBTIENE :

$$\underline{\underline{F_{1-2} = 0.2690}}$$



Tubos infinitamente separados

FIG. III.4.2.4

$$F = \frac{ADC + BDC - AC - BC}{4\pi R}$$

$$F_{1-2} = \frac{2ADC - 2AC}{4\pi R} = \frac{ADC - AC}{2\pi R}$$

$$\begin{aligned} DC &= 2R & \text{sen } \alpha &= \frac{DC}{AC} = 0.001745 \\ \gamma &= 89.9^\circ \\ \alpha &= 0.1^\circ \end{aligned}$$

$$AC = \frac{10.6 \text{ cm.}}{0.001745} = 6074.5 \text{ cm.}$$

$$AC^2 - DC^2 = AD^2$$

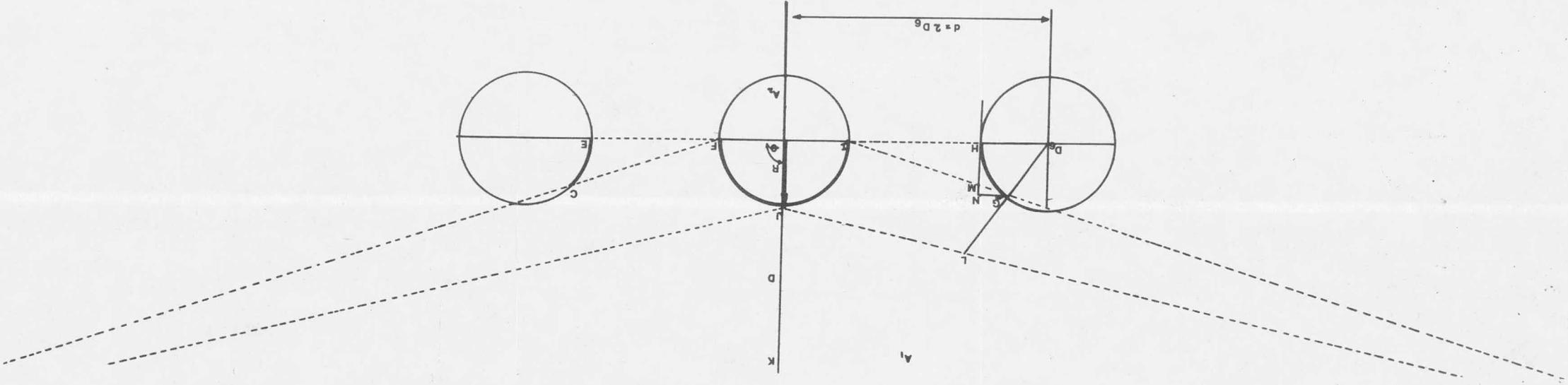
$$\sqrt{(6074.5)^2 - (10.6)^2} = \sqrt{AD^2} = 6074.49$$

$$DC = \theta R = \pi R$$

SUSTITUYENDO VALORES SE OBTIENE:

$$\underline{\underline{F_{1-2} = 0.499}}$$

Tubos separados por una distancia de centro a centro  $2D_0$   
FIG. III.4.2.5



$$F_{1-2} = \frac{AJF + BJI - AGI - BCF}{2A_2}$$

$$F_{1-2} = \frac{2AJF - 2AGI}{2A_2}$$

$$F_{1-2} = \frac{AJF - AGI}{A_2}$$

$$AJ = [(AK)^2 + (KJ)^2]^{\frac{1}{2}} ; JF = R\theta ; \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$AG = [(AL)^2 - (LG)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$GI = GM + MI ; GM = [(MN)^2 + (GN)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$MI = [(HI)^2 + (HM)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore GI = [(HI)^2 + (HM)^2]^{\frac{1}{2}} + [(MN)^2 + (GN)^2]^{\frac{1}{2}}$$

SUSTITUYENDO VALORES SE OBTIENE :

$$\underline{\underline{F_{1-2} = 0.3673}}$$

evacuados. Mediante el método de Hottel (11) se obtiene que  $F_{dx, S}$  (G) se puede calcular así:

$$F_{dx, S}(G) = \frac{1}{2} \left[ F_+(G) + F_-(G) \right] \dots \dots (40)$$

$$F_{\pm}(G) = \frac{(d/2 \pm x) \left[ (d/2 \pm x)^2 + D_B^2 - D_{cub}^2/4 \right] - D_B D_{cub}/2}{(d/2 \pm x)^2 + D_B^2} \dots \dots (41)$$

donde:

$x$  = CENTRO DE LA BANDA

$D_B$  = DISTANCIA DEL TUBO A LA SUP. REFLECTORA

cuando la inclinación del colector  $\theta$  es diferente a cero, las reflexiones del suelo también contribuyen a la radiación difusa en el arreglo. Dichas reflexiones pueden ser en algunos casos significativas y se consideran en la siguiente relación:

$$S_{dT} = \pi F_{TS} (1 + p\bar{F}) \left[ S_d \left( \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) + P_G (S_d + S_{SH}) \left( \frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \right]$$

donde  $P_G$  es la reflectividad del suelo.

.....(42)

### III.4.3 CONSIDERACIONES TERMICAS.-

Los cálculos para determinar los coeficientes de transferencia de calor, el coeficiente de pérdidas de calor  $U_L$ , los factores  $F'$  y  $F_R$ , así como la eficiencia del colector se realizaron mediante las relaciones expresadas en el Capítulo II.

En la fig. III.4.3.1 se muestra el diagrama de flujo del mo-

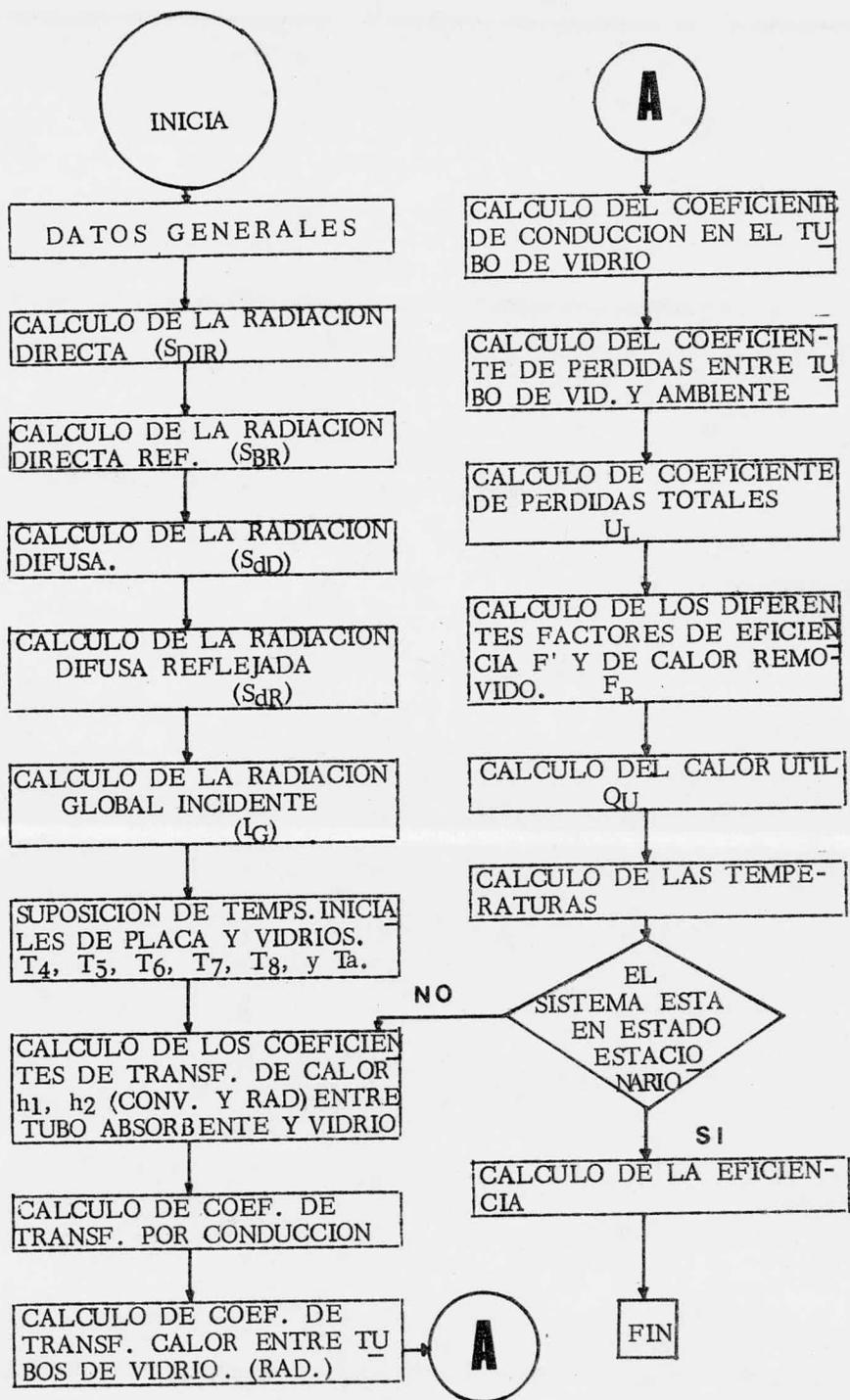
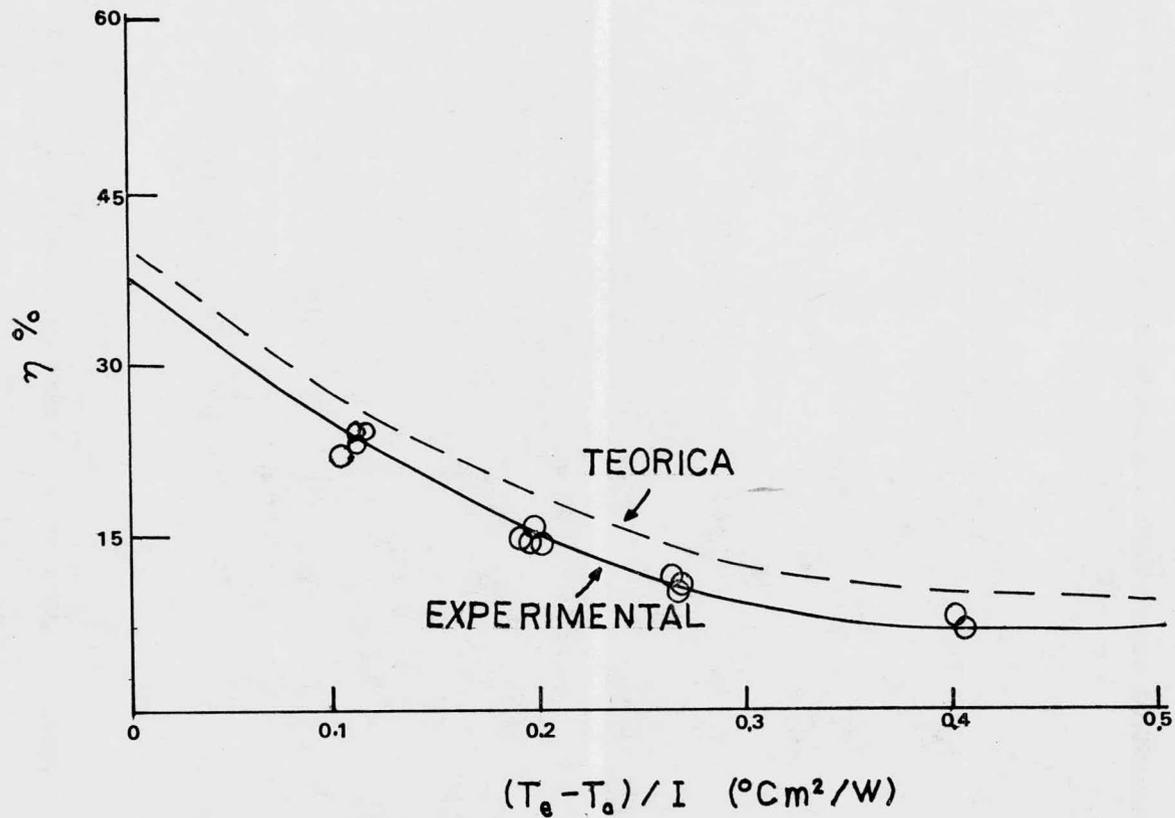


FIG. III.4.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO MATEMATICO.

delo matemático.

### III.5 RESULTADOS TEORICOS

En la fig. III.5.1 se comparan los resultados experimentales de este trabajo con los resultados teóricos obtenidos mediante un modelo matemático (2). Determinándose una diferencia máxima de 10% entre los resultados teóricos y experimentales.



COMPARACION DE LAS EFICIENCIASTEORICAS Y EXPERIMENTALES DEL COLECTOR EVACUADO.

FIG. III.5.1

A P E N D I C E

A

## APENDICE A

### INFLUENCIA DE LA PRESION SOBRE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA TERMICA.

Los mecanismos de transferencia de calor por convección libre y conducción gaseosa se ven afectados dependiendo de la presión que se establece entre la placa colectora y la cubierta de vidrio. Para el caso de colectores a presión reducida, la reducción de la presión ( $\approx 52$  torr) es suficiente para eliminar la convección libre a través de la capa de aire, y de este modo eliminar parcialmente las pérdidas de calor por convección.

Mientras que para colectores evacuados la reducción de la presión ( $10^{-4}$  torr) es suficiente para eliminar, tanto las pérdidas de calor por convección, como para disminuir las pérdidas por conducción.

La baja presión obtenida en este tipo de colectores afecta la conductividad térmica del aire. Esta dependencia de la conductividad térmica sobre la presión se rige por el número de Knudson,  $Kn$ , definido como:

$$Kn = \frac{\Lambda}{L} \dots\dots\dots(43)$$

donde  $\Lambda$  es el camino libre medio de la molécula y L es el espesor entre el tubo de cubierta y el tubo absorbente.

Para el aire  $\Lambda$  está dada con buena exactitud por:

$$\Lambda = \Lambda_0 \left( \frac{T_m}{T_0} \right) \left( \frac{P_0}{P} \right) \dots\dots\dots(44)$$

donde:

$$\Lambda_0 = 6.38 \times 10^{-8} \text{ m.}; T_0 = 288 \text{ }^\circ\text{K}; P_0 = 1 \text{ atm.}$$

La conductividad térmica es prácticamente independiente de la presión hasta que  $K_n = 0.003$ . Cuando las presiones son muy bajas el número de Knudson adquiere valores altos,  $K_n = 10$ , siendo para estos valores la relación de la conductividad térmica que satisface esta condición:

$$K = \left( \frac{K_0}{\Lambda_0} \right) L \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T_m} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(45)$$

donde  $K_0$  es el valor de la conductividad térmica (K) a presión atmosférica y  $T_m$  es la temperatura media del fluido dada por la expresión:

$$T_m = \frac{T_p + T_v}{2}$$

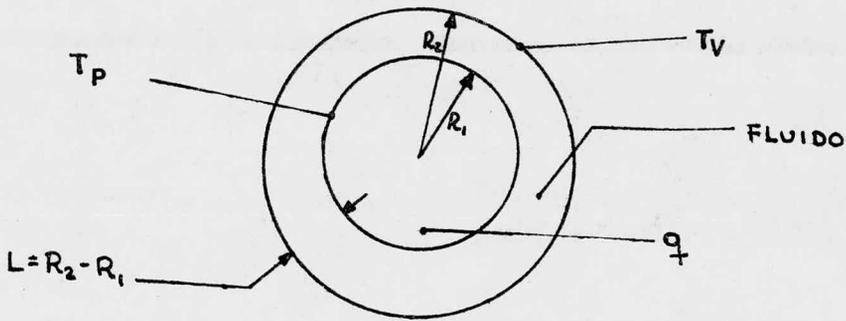
donde:

$T_p$  = Temperatura de la placa

$T_v$  = Temperatura del vidrio

En la figura A-1 se ilustra un esquema de estos factores pa-

ra cilindros concéntricos.



En un colector solar evacuado es recomendable que se obtenga una reducción en la conducción gaseosa de un factor de 10 (3). Si a manera de ejemplo, consideramos  $T_m = 323^\circ\text{K}$ ,  $L = 1 \text{ cm}$   $K/K_0 = 0.1$  sustituyendo en la ecuación (45) nos lleva a una  $P = 8.24 \times 10^{-4} \text{ mm Hg}$ .

A P E N D I C E

**B**

## APENDICE B

### RADIACION SOLAR

#### DEFINICIONES E INSTRUMENTOS DE MEDICION

En este capítulo se mencionan los instrumentos para la medición de la radiación solar, tanto directa, como global, calculando se algebraicamente la difusa, además se incluyen mapas que muestran datos promedio de radiación y se reportan datos obtenidos experimentalmente. La manipulación de estos datos en la estimación de la energía disponible a un proceso solar se analiza en el Capítulo III.

#### DEFINICIONES

Radiación Solar Global. - La radiación solar global o hemisférica total incluye tanto la parte directa como la difusa.

Radiación Solar Directa. - Este tipo de radiación es el que se recibe en el tope de la atmósfera y se caracteriza por una curva de emisión energética similar a la de un cuerpo negro a 6,000 °K y un rango de longitud de onda de 0.3 a 3  $\mu$ .

La radiación en la superficie de la tierra se ve atenuada por

diversos factores como:

- a) Variaciones relativas en la distancia de la tierra al sol, a este respecto la radiación es menor en los meses de verano que en los de invierno (hemisferio norte).
- b) Variaciones por la dispersión atmosférica, debida a la concentración de moléculas de aire, vapor de agua y polvo.
- c) Variaciones en la absorción atmosférica por el oxígeno, ozono, agua y bióxido de carbono.

Radiación Solar Difusa. - Este tipo de radiación es la que se recibe del sol después de que su dirección ha sido cambiada por reflexión y dispersión de la atmósfera, y se presenta aún en días despejados. Esta radiación solar es notablemente atenuada debido a las pérdidas energéticas que sufre al atravesar la atmósfera. Las causas de estas pérdidas son las siguientes:

- a) Difusión molecular (cielo despejado)
- b) Difusión por los aerosoles (cielo turbio)
- c) Absorciones por vapor de agua, ozono y gas carbónico.
- d) Absorción y difusión por las nubes.

MEDICION DE LA RADIACION SOLAR DIRECTA

La radiación solar directa se mide por medio del instrumento llamado pirheliómetro o actinómetro, los principales son:

- a) Pirheliómetro de compensación Angstrom.
- b) Actinómetro Michelson
- c) Actinómetro Termoeléctrico Sarinou-Yanishevsky
- d) Actinómetro Linke-Feussner

Este último fue el utilizado en el presente trabajo. El aparato emplea una termopila de Moll constituida por tiras delgadas de Constantan-Magnanin. Las uniones calientes están situadas a través de la línea central de la termopila y las frías en los bordes. El fabricante del actinómetro Linke-Feussner (foto 4) es Kipp and Zonen (Holanda).

El actinómetro Linke-Feussner produce una fuerza electromotriz de 12 milivolts a 20°C cuando la radiación es de 1 cal cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup>, habiendo una corrección por temperatura ya que se tiene un error de 0.2% por cada grado centígrado. La radiación entonces se mide por medio de la ecuación:

$$I_D = \frac{mV}{12(1-0.002)(t-20)} \dots\dots\dots(46)$$

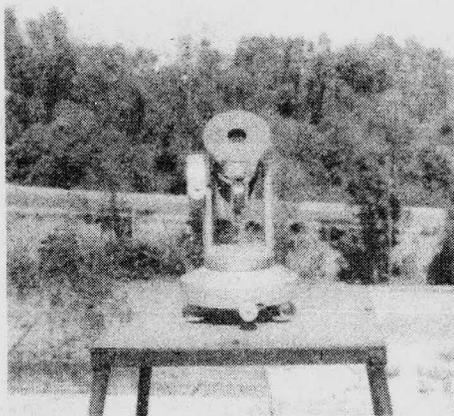


FOTO 4. ACTINOMETRO LINKE-FEUSSNER

#### MEDICIÓN DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL

Dicha radiación global se mide por medio del instrumento llamado piranómetro o solarímetro, y los principales tipos son:

- a) Piranómetro Yanishevsky
- b) Piranómetro Eppley gran angular
- c) Solarímetro Moll-Gorczyński

El instrumento empleado es del tipo Moll-Gorczyński (foto 5). Este piranómetro está formado por una termopila de Moll con 14 - termoelementos Constantan-Magnanín en forma de tiras delgadas. La rápida respuesta de la termopila a cambios de radiación incidente, - la pequeña dependencia con respecto a la temperatura ambiente y la relación esencialmente lineal entre la intensidad de la radiación y la respuesta del instrumento son algunas ventajas que presentan (12).

Para los aparatos utilizados, la calibración es:

$$\text{Solarímetro I} \quad 1 \text{ W m}^{-2} = 0.0120 \text{ mV.}$$

$$\text{Solarímetro II} \quad 1 \text{ W m}^{-2} = 0.0122 \text{ mV.}$$

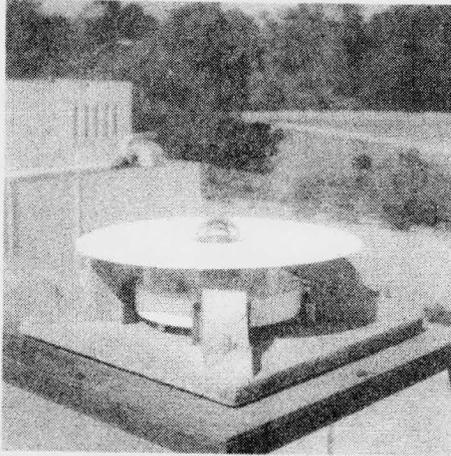


FOTO 5 SOLARIMETRO MOLL-GORCZYNSKI

#### DISTRIBUCION DE LAS COMPONENTES DE LA RADIACION SOLAR

Se realizaron por varios días en el mes de Diciembre de 1978, mediciones tanto de radiación directa, como de radiación global; ésta última se midió en un plano horizontal y en un plano inclinado a  $19^\circ$  (misma inclinación del colector) que corresponde aproximadamente a la latitud de México, D.F.

Algebraicamente se calcularon:

La radiación difusa de acuerdo a:

$$I_G = I_{DIR} \sin h + I_{DIF} \dots\dots\dots(47)$$

en donde  $h$  es la altura solar y se describe:

$$h = \text{sen}^{-1}(\text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \phi \text{ cos } \delta \text{ cos } w) \dots\dots\dots(48)$$

donde:  $\phi$  = Latitud

$\delta$  = Declinación

$w$  = Angulo horario

Son ángulos que describen la trayectoria diaria del sol.

La declinación solar en cualquier día del año se puede obtener de datos astronómicos (13), o ser evaluada por la expresión de Cooper (14).

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left( 360 \frac{284 + i}{365} \right) \dots\dots\dots(49)$$

donde  $i$  es el día del año.

En el mediodía solar verdadero  $W = 0^\circ$  ya que los planos meridianos coinciden. Como el período de rotación terrestre es de 24 horas, 1 hora equivale a un ángulo horario de  $15^\circ$ . El ángulo horario ( $w$ ), se mide a partir del mediodía verdadero, considerándosele positivo en la mañana y negativo por la tarde, aunque también se acostumbra medirlo conforme a la tabla B-1-1.

TIEMPO SOLAR VERDADERO	6 HRS	9 HRS	12 HRS	15 HRS	18 HRS	21 HRS	24 HRS
ANGULO HORARIO (w) CORRESPONDIENTE	+90°	+45°	0°	-45°	-90°	-135°	-180°

TABLA B-1. RELACION ENTRE EL ANGULO HORARIO Y LA HORA.

El tiempo solar verdadero no coincide con el tiempo (hora) local, (únicamente sucede esto en algunos lugares localizados sobre los meridianos y solo algunos días del año) y es necesario convertir la standar a la solar, haciendo dos correcciones:

1. - Una corrección constante por cualquier diferencia entre la longitud del lugar y el meridiano para el cual está definida la hora local (en el caso de México, D.F., el meridiano local es de 90° de longitud oeste).
2. - La segunda corrección es la de "ecuación del tiempo" que toma en cuenta las perturbaciones de la órbita terrestre puede obtenerse de publicaciones (13) o por medio de gráficas(15).

En la tabla B-2 se proporcionan los valores medidos de:

- a) Radiación directa normal  $S_{DIR}$

- b) Radiación global sobre plano horizontal  $I_G$
- c) Radiación global sobre plano inclinado  $G_{INC}$

y los cálculos de:

- d) Altura solar (h)
- e) Radiación difusa en plano horizontal ( $S_{dD}$ )
- f) Angulo horario (w)
- g) Hora solar verdadera ( $H_{SV}$ )

Datos obtenidos para el 19 de diciembre de 1978, que se puede clasificar como despejado pero contaminado típico de zonas urbanas.

La declinación correspondiente a este día fue:

$$\delta = -23.42^\circ$$

La latitud de México, D.F.,: =  $19.33^\circ$

Los datos aparecen graficados en la fig. B-1

HSV	h	$\rho I_G$	G INC	I DIR	I DIF.		$\delta$	W
CALCULADO	EC (48) CALCULADO	(MEDI- DOS)	(MEDIDOS)	(MEDIDOS)	EC (47) CALCULADO	LATI- TUD	DECLI- NA CION	ANGULO HORARIO
HORAS	GRADOS °	W/m <sup>2</sup>	W m <sup>-2</sup>	W m <sup>-2</sup>	W m <sup>-2</sup>	19.33	-23°42' 23°25'	
9:00	48.05°	170	377	488.3	13.83			45°
9:10	50.34	220	393	348.8	124.47			42.5°
9:20	52.63	229.16	418	569.18				40°
9:30	54.92	258.33	450.8	593				37.5°
9:40	57.21	292.5	491.8	607.35				35°
9:50	59.50	318.3	524.5	619.7				32.5°
10:00	61.80	360	567.3	665.1				30°
10:10	64.08	382.5	573.7	680.8				27.5°
10:20	66.37	419.16	606.5	706.39				25°
10:30	68.65	461.66	664	751.16				22.5°
10:40	70.92	490.83	680.3	756.20				20°
10:50	73.18	506.66	690.7	761				17.5°
11:00	75.42	569.16	721.3	852.3				15°
11:10	77.62	585	725	854				12.5°
11:20	79.78	604.16	736	759				10°
11:30	81.84	609.16	708	813.9				7.5°
11:40	83.72	600	688.5	756.3				5°
11:50	85.18	587.5	705	735.4				2.5°
12:00	85.78	566.6	672.1	569.18	104.46			0°
12:10	85.18	535	668	544.18	125.74			-2.5°
12:30	83.72	526	606.5	525.2	84.45			-5°
12:30	81.84	508	573.7	501	77.77			-7.5°
12:40	79.78	500	565.5	495	78.35			-10°
12:50	77.62	502	557.3	480	88.46			-12.5°
13:00	75.42	518.3	658.5	441	231.70			-15°

TABLA B-2

HSV	h	$G_{INC}$	G INC.	I DIR	I DIF		$\delta$	W
CALCULADO	EC (48) CALCULADO	(MEDIDOS)	(MEDIDOS)	(MEDIDOS)	EC (47) CALCULADO	LATI- TUD	DECLI- NA CION	ANGULO HORARIO
HORAS	GRADOS °	W/m <sup>2</sup>	W m <sup>-2</sup>	W m <sup>-2</sup>	W m <sup>-2</sup>	19.33	-23°42' 23°25'	
13:10	73.18	620.8	705	562.7	166.37			-17.5°
13:20	70.92	620	715	514.5	228.76			-20°
13:30	68.65	715	737.7	382.5	381.44			-22.5°
13:40	66.37	667.5	656	382.5	305.57			-25°
13:50	64.08	563.3	682	682	68.60			-27.5°
14:00	61.80	758	762.3	516.2	307.37			-30°
14:10	59.50	647.5	737.7	687.7	145.15			-32.5°
14:20	57.21	628.3	737.7	681	165.20			-35°
14:30	54.92	628.3	721.3	723.8	128.97			-37.5°
14:40	52.63	610.8	705	716.8	135.33			-40°
14:50	50.34	605.8	705	716	153.79			-42.5°
15:00	48.05	576.6	672.1	727.3	131.18			-45°
15:10	45.76	594.1	672.1	763.9	124.82			-47.5°
15:20	43.47	561.6	672.1	679.6	204.55			-50°
15:30	41.19	507.5	664	607.5	263.92			-52.5°
15:40	38.91	455	655.7	600.1	278.77			-55°
15:50	36.63	493.3	606.5	682	199.58			-57.5°
16:00	34.36	468.3	565.5	423.2	216.14			-60°
16:10	32.09	410.2	510.8	480.7	255.42			-62.5°
16:20	29.82	414.8	512.2	498.6	264.25			-65°
16:30	27.56	335.8	557.3	408	368.52			-67.5°
16:40	25.31	330.2	429.5	376	268.75			-70°
16:50	23.06	170.8	422.4	248.2	325.18			-72.5°
17:00	20.82	90.83	393.4	135.4	345.27			-75°

TABLA B-2 (CONTINUACION)

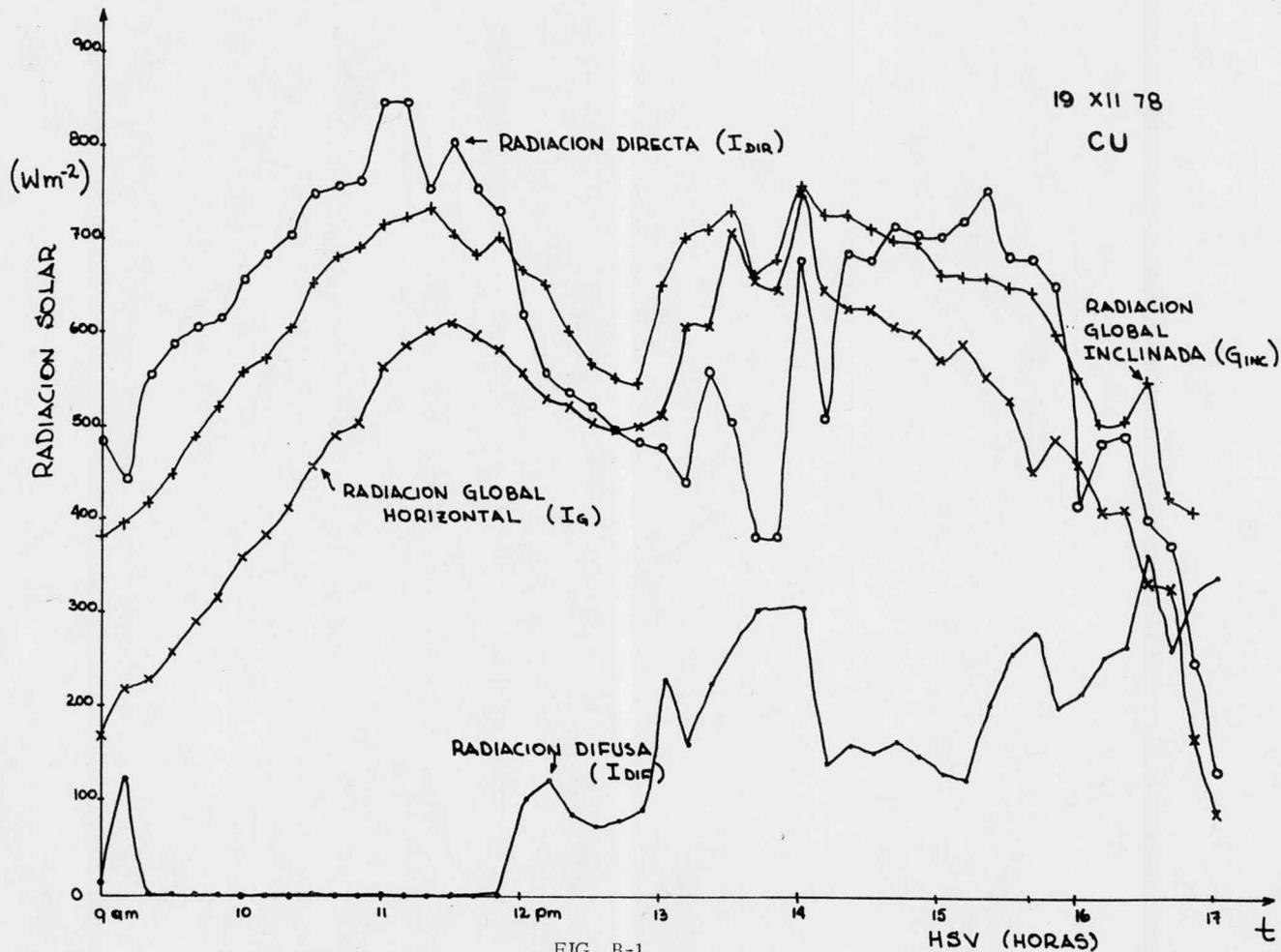


FIG. B-1

A P E N D I C E

C

## APENDICE C

### METODO EXPERIMENTAL DE PRUEBA

El método utilizado se basa en una norma internacional propuesta por la NBS (National Bureau of Standards) (16). Consiste en introducir el fluido al colector solar a 4 diferentes temperaturas, semejantes a las temperaturas de operación (30, 50, 70, 90°C), para cada una de estas temperaturas de entrada se miden las siguientes variables: gasto, insolación, temperatura ambiente, temperatura de salida del fluido y temperatura de placa. Esto durante cuatro períodos de 15 minutos simétricos al mediodía solar (p.e. 11:00 a 11:15; 11:30 a 11:45 12.15 a 12:30 12:45 a 13:00 hrs.).

De esta manera se obtienen al menos 16 puntos con los que se pueden determinar las gráficas de eficiencia (Capítulo III), las líneas obtenidas correlacionan los puntos experimentales y son ajustadas por el método de mínimos cuadrados.

El método propuesto se realiza bajo las siguientes condiciones de trabajo:

- a) El colector debe estar ubicado en un sitio en el cual no exis

ta una contribución significativa de energía reflejada o irradiada, así como de proyección de sombras en los alrededores.

- b) La prueba se realizará durante períodos de 15 minutos, en los cuales la energía solar incidente sobre el plano del colector será mayor de  $630 \text{ watt/m}^2$  ( $0.9 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ ).
- c) La inclinación del colector debe ser tal que el ángulo de incidencia de los rayos solares sea menos de  $40^\circ$  con respecto a la normal del colector.
- d) La temperatura ambiente deberá ser menor de  $30^\circ\text{C}$ .
- e) El gasto por unidad de área transparente del colector deberá ser aproximadamente de  $0.02 \text{ Kg seg}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

## RESULTADOS

Se traza una gráfica de  $\eta$  Vs  $\frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{I}$  y de  $\eta$  Vs  $\frac{\bar{T}_m - \bar{T}_a}{I}$  en donde la ordenada al origen es una función de la transmisividad de la cubierta por la absorptividad del tubo, por lo que el uso de cubiertas altamente transparentes a la radiación y superficies selectivas mejores permitirán disminuir las pérdidas por radiación, lo que permite trabajar a temperaturas más elevadas.

La pendiente de las curvas es a su vez función del coeficiente

de pérdidas  $U_L$ , por lo que el uso de una baja presión elimina básicamente las pérdidas por convección y conducción. Debido a esto el colector opera con buenas eficiencias a temperaturas suficientemente altas a diferencia de los colectores solares planos, las cuales logran buenas eficiencias a temperaturas moderadas, pero a medida que aumenta la temperatura de operación decrece la eficiencia.

## INSTRUMENTACION

En la figura C.1 se aprecia la disposición del equipo necesario para llevar a cabo la prueba. En la Tabla C.1 se describen las características que deben reunir algunos de los siguientes instrumentos de medición:

- 2 Piranómetros para medir la radiación global incidente sobre la superficie horizontal e inclinada, descrito en Apéndice B.
- 1 Pirheliómetro o Actinómetro para medir radiación directa, descrito en Apéndice B.
- 1 Termógrafo para medir la temperatura ambiente.
- 4 Termopares, de cobre-constantan y como punto de referencia se usó un termo con hielo fundente y agua a  $0^{\circ}\text{C}$ .
- 1 Rotámetro, para medir el flujo.
- 1 Graficador, para el registro de insolación de tipo continuo.
- 1 Calentador Eléctrico.

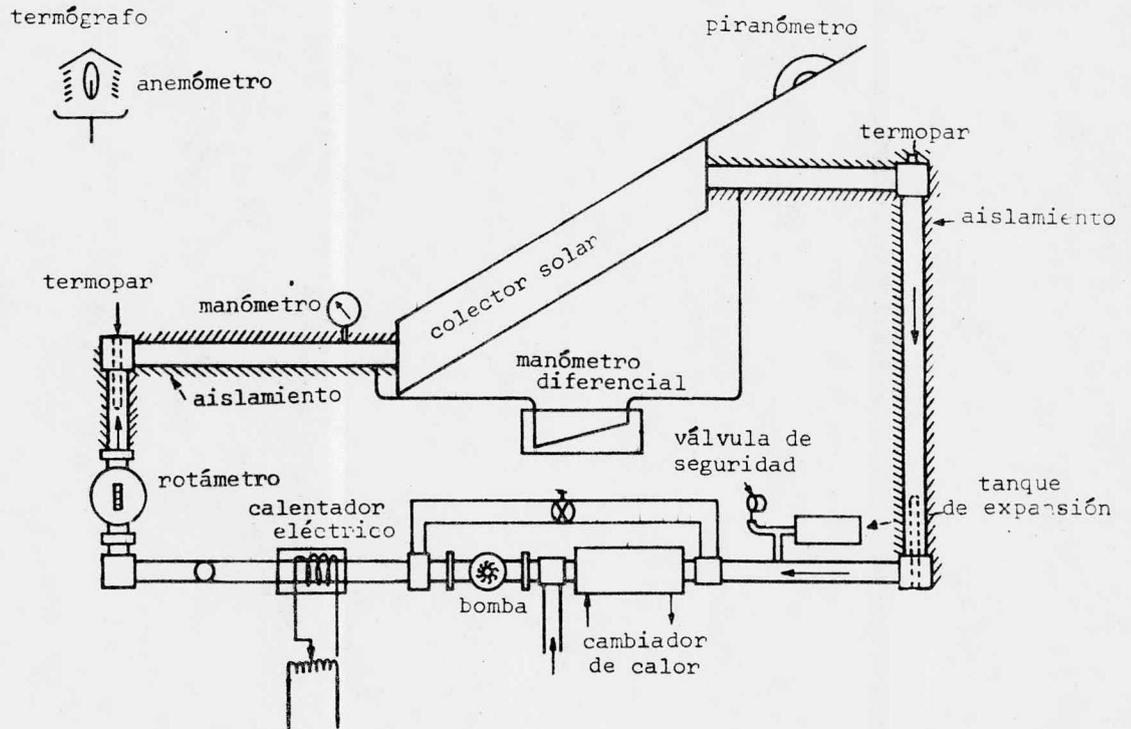


Diagrama del equipo de prueba para colectores solares.

FIG. C-1

1 Bomba de circulación.

1 Scanner conectado a un multímetro para satisfacer los requerimientos de varios canales para medición de voltaje en mV y posterior conversión a temperatura.

Los canales utilizados fueron de la siguiente manera:

CANAL 0	INSOLACION (PIRANOMETRO HORIZONTAL)
CANAL 1	INSOLACION (PIRHELIOMETRO)
CANAL 2	TEMPERATURA (ENTRADA DEL FLUIDO)
CANAL 3	TEMPERATURA (SALIDA DEL FLUIDO)
CANAL 4	TEMPERATURA (DE PLACA)
CANAL 5	INSOLACION (PIRANOMETRO INCLINADO)
CANAL 8	TEMPERATURA (AMBIENTE)

Además se requiere de los siguientes accesorios: Aislante, tubería y estructuras necesarias para probar el colector. En las fotos 6 y 7 se muestra el dispositivo experimental en la instalación de prueba.

Todos los parámetros fueron registrados cada minuto mediante el sistema de adquisición de datos, anteriormente descrito.

---

MEDICION DE TEMPERATURASEXACTITUD

Temperatura

 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 

Diferencia de Temperaturas

 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 

Medición del flujo

 $\pm 1\%$ 

---

TABLA C-1

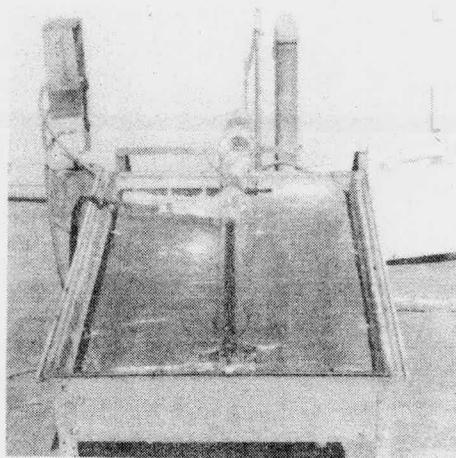


FOTO 6

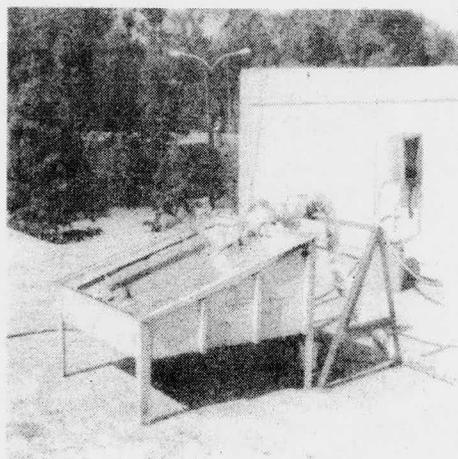


FOTO 7

## CONCLUSIONES

Se comparan los resultados teóricos obtenidos del modelo matemático con los experimentales, observándose una diferencia entre los valores de un 10% aproximadamente. De tal manera que este modelo es útil para simular el funcionamiento del colector bajo otras condiciones de operación (Vel. de viento, radiación incidente, inclinación, separación entre tubos, etc.) optimizando el diseño.

En la fabricación del colector se utilizaron sellos vidrio-vidrio y metal-metal evitando uniones metal-vidrio que no son muy confiables. La geometría cilíndrica del colector permite la conservación de la baja presión por largos períodos de tiempo. Se utilizó vidrio de borosilicato (Pyrex) ya que tiene un alto coeficiente de transmisividad de la radiación visible, resistencia a los cambios bruscos de temperatura y baja conductividad térmica. Por otro lado, el sustrato que se usó fue cobre que tiene una emisividad en el rango infrarrojo de 0.072 (7) a 300°K, y la superficie selectiva se obtuvo con un recubrimiento de cromo negro. No se determinó  $\alpha$  y  $\epsilon$  de dicha superficie selectiva, debido a la falta de equipo para medir superficies grandes, pero en base a resultados obtenidos por J. Quintana (7) puede suponerse que  $\alpha = 0.8-0.9$  y  $\epsilon = 0.15-0.30$ . El colector logra mayor eficiencia en las mañanas y en las tardes,

debido principalmente a la lámina reflectora colocada en la parte posterior que recupera cerca del 50% de la radiación directa que cae a los lados del tubo.

En las gráficas III.3.1 y III.3.2 se aprecia la curva de eficiencia térmica, la cual no corresponde a la esperada, ya que debido a la superficie de captación usada, se manejó un gasto peque ño con el inconveniente de que el instrumento de control disponible (rotámetro) no era preciso en ese rango de flujos, y además, a las pérdidas caloríficas existentes entre el tubo absorbente y el tu bo de vidrio.

El estudio hecho en esta tesis, es sólo el principio de una investigación más profunda que debe hacerse. Principalmente en optimizar el proceso de deposición de la superficie selectiva.

Se sugiere para futuros modelos que la deposición de la superficie selectiva se realice sobre el vidrio, para eliminar las pér did as por transmisión entre el tubo colector y el tubo de vidrio, trayendo como consecuencia un incremento en la eficiencia térmica. Las pérdidas de calor (convección y radiación) se reducen, ya que las temperaturas entre el tubo de vidrio y el ambiente son muy pa recidas. Se sugiere también un tratamiento térmico (degasamiento) al vidrio a 450°C durante 4 horas para garantizar por más tiempo la conservación del vacío.

Las aplicaciones más adecuadas para este tipo de colectores, debido a las altas temperaturas de operación que logran con buenas eficiencias, se encamina a los procesos de refrigeración por absorción (conservación de alimentos, producción de hielo), aire acondicionado y la producción de energía mecánica o eléctrica.

Debido a la posición geográfica de México, cuyo nivel de insolation es muy alto (17), su aplicación está siendo orientada a satisfacer los requerimientos básicos en zonas rurales.

Existe abundancia de hidrocarburos en nuestro país, día a día se descubren nuevos yacimientos petrolíferos, su costo es comparativamente bajo. Sin embargo, es preciso tomar medidas ante la futura escasez de energéticos convencionales, volviendo la vista a otras fuentes de energía, siendo la solar una de las más factibles de ser aprovechada.

## REFERENCIAS

1. "NORMALIZACION DE COLECTORES SOLARES"  
Luis del Castillo y Rodolfo Martínez  
A.N.I.A.C. Octubre (1978).
2. "MODELO MATEMATICO DE UN COLECTOR SOLAR  
EVACUADO".  
Rodolfo Martínez, Luis del Castillo y J. A. Machado  
Próxima Publicación. C.I.M. (1979).
3. "ADVANCED NON - CONCENTRATING SOLAR COLLECTORS"  
K.G. T. Hollands.  
Fifth Course on Solar Energy Conversion. (1978).
4. "THE PERFORMANCE OF FLAT-PLATE SOLAR HEAT  
COLLECTORS".  
H. C. Hottel y B. B. Woertz.  
A.S.M.E. Cambridge, Mass. (1942)

5. "FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR PERFORMANCE AT HIGH TEMPERATURES".  
M. Kudret Selcuk  
Solar Energy. Vol. 8 (1964)
6. "SELECTIVE RADIATION I-II, WAVELENGTH DISCRIMINATION".  
H. Tabor  
Bull. Res. Council of Israel 5A. (1956).
7. "ESTUDIO Y DESARROLLO DE SUPERFICIES SELECTIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR".  
J. Quintana L.  
Publicación interna C.I.M. UNAM. (1976).
8. "AIDE-MEMOIRE DE GALVANOPLASTIE"  
J. Glayman and G. Farkas  
Editions Eyrolles. París (1967).
9. "ANALYSIS AND EXPERIMENTAL TESTS OF A HIGH-PERFORMANCE EVACUATED TUBULAR COLLECTOR".  
D. C. Beekley and G. R. Mather Jr.  
Owens, Illinois. Toledo Ohio. (1976).

10. "THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER"  
Siegel and Howell  
Mc. Graw-Hill, Inc. (1971).
11. "RADIATIVE-TRANSFER"  
H. C. Hottel and A. F. Sarofim  
Mc. Graw-Hill, Inc. New York (1967)
12. "SOLAR AND TERRESTRIAL RADIATION"  
K. L. Coulson  
Academic Press. (1975).
13. "ANUARIO DEL OBSERVATORIO ASTRONOMICO NACIONAL  
PARA EL AÑO DE 1978".  
Instituto de Astronomía. UNAM. (1977)..
14. "THE ABSORPTION OF SOLAR RADIATION IN SOLAR STILL'S".  
P. Cooper  
Solar Energy. (1969).
15. "WORLD DISTRIBUTION OF SOLAR ENERGY".  
G. O. G. Lof, J. A. Duffie, C. O. Smith  
Solar Energy (1966).

16. "DEVELOPMENT OF PROPOSED STANDARDS FOR TESTING SOLAR COLLECTOR AND THERMAL STORAGE DEVICES"

J. Hill, E. Streed, G. Kelly, J. Geist and T. Kusuda.

National Bureau of Standards. Tech.Note (1976).

17. "LA DISTRIBUCION DE LA RADIACION GLOBAL EN MEXICO EVALUADA MEDIANTE LA FOTOINTERPRETACION DE LA NUBOSIDAD OBSERVADA POR SATELITES METEOROLOGICOS"

E. Hernández

Tesis de Maestría, Fac. Ciencias. UNAM. (1976).

## BIBLIOGRAFIA GENERAL

### SOLAR ENERGY THERMAL PROCESSES

John A. Duffie and William A. Beckman

Wiley Interscience (1974)

### LOW TEMPERATURE ENGINEERING APPLICATIONS OF SOLAR ENERGY.

A. Whillier.

ASHRAE New York (1967). Design Factors Influencing Collector.

### SOLAR ENERGY, TECHNOLOGY AND APPLICATIONS

J. R. Williams

Ann Arbor Science Publ. (1974)

### SOLAR HEATING AND COOLING: Engineering, Practical Design and Economics

J. F. Kreider and F. Kreith

Mc. Graw-Hill (1975).

### INTRODUCTION TO THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY

A. M. Zarem and D. D. Erway

Mc. Graw Hill (1963).

ANALISIS DE LA EFICIENCIA TERMICA DE COLECTORES  
SOLARES PLANOS.

Isaac Nissan Levy

Tesis de Licenciatura, Escuela de Ing. y Ciencias Químicas  
U. I. (1977).

LAS COORDENADAS HORARIOS DE LA TRAYECTORIA DIARIA  
DEL SOL SOBRE EL HORIZONTE Y SU REPRESENTACION POLAR  
EN LA REPUBLICA MEXICANA.

E. Hernández

Publicación Interna C.I.M. (1977).

LA VARIACION ANUAL EN MEXICO DE LA RADIACION SOLAR  
DIRECTA SOBRE PLANOS VERTICALES ORIENTADOS HACIA LOS  
CUATRO PUNTOS CARDINALES.

E. Hernández y R. Martínez

Pub. Interna C.I.M. (1977).

DIRECT USE OF SUN'S ENERGY

F. Daniels

Ballantine Books (1975).

SOLAR ENERGY FOR MAN

B. J. Brinkworth

John Wiley and Sons (1972).

THE COMING AGE OF SOLAR ENERGY

D. S. Halacy

Avon (1973).

APPLIED SOLAR ENERGY. AN INTRODUCTION

A. B. Meinel and M. P. Meinel

Addison Wesley Publ. Co. (1976).

THE DERIVATIONS OF SEVERAL "PLATE-EFFICIENCY FACTORS"  
USEFUL IN THE DESIGN OF FLAT-PLATE SOLAR HEAT COLLECTORS.

R. W. Bliss Jr.

National Science Foundation.

A SOLAR ENERGY COLLECTOR FOR HEATING.

V. D. Bevill and H. Brandt

Solar Energy Soc. Conf. (1967).

ENERGY PRIMER, SOLAR, WIND, WATER AND BIOFUELS

Portola Institute

Fricke Parks Press Inc. (1974)

HEAT TRANSMISSION

William H. Mc. Adams

Mc. Graw Hill (1954).

PROCESS HEAT TRANSFER

Donald Q. Kern

Mc. Graw Hill (1950).

PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

F. Kreith

Herrero Hnos. (1970)