

# Colector Solar de Placa Plana

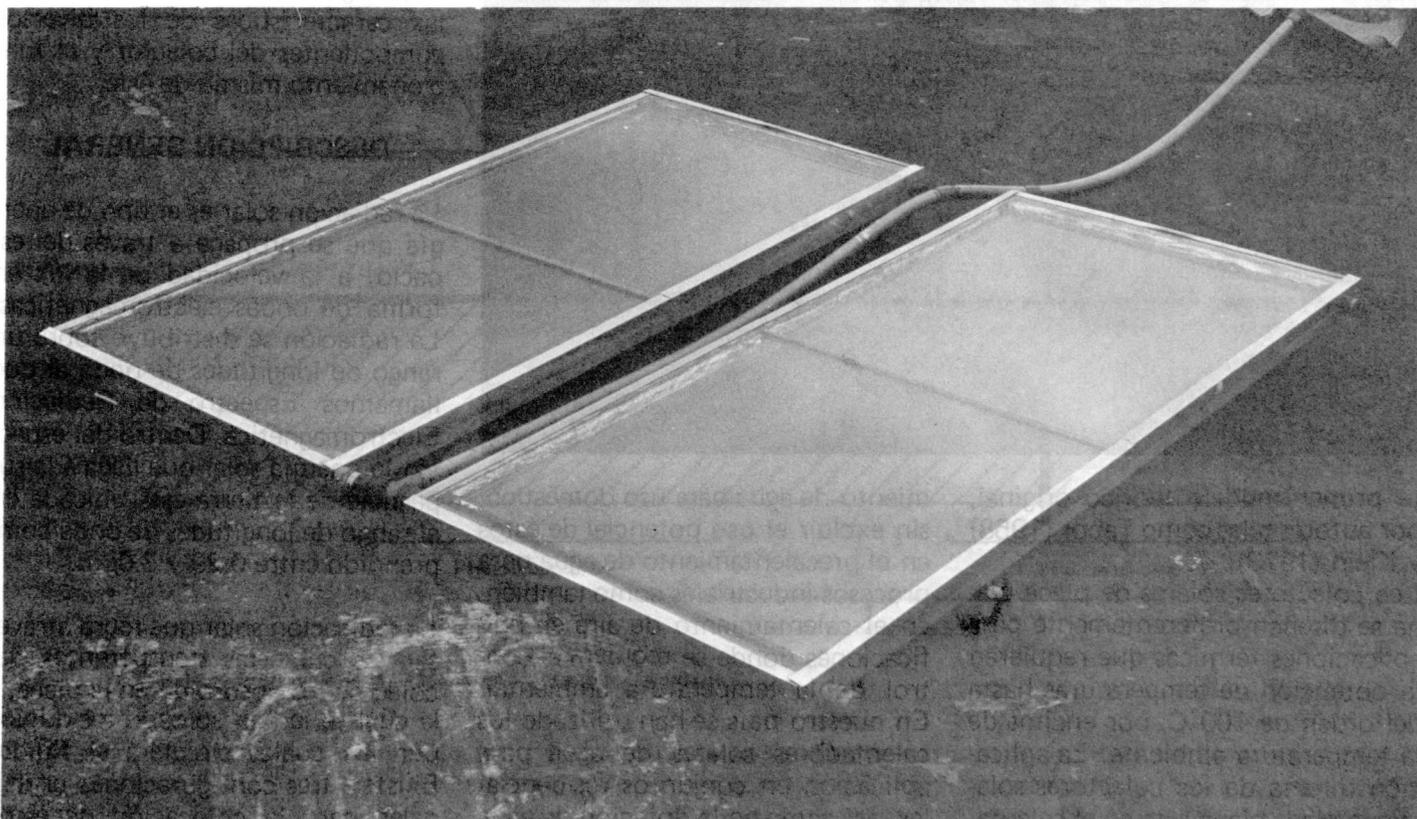
DESARROLLADO EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL

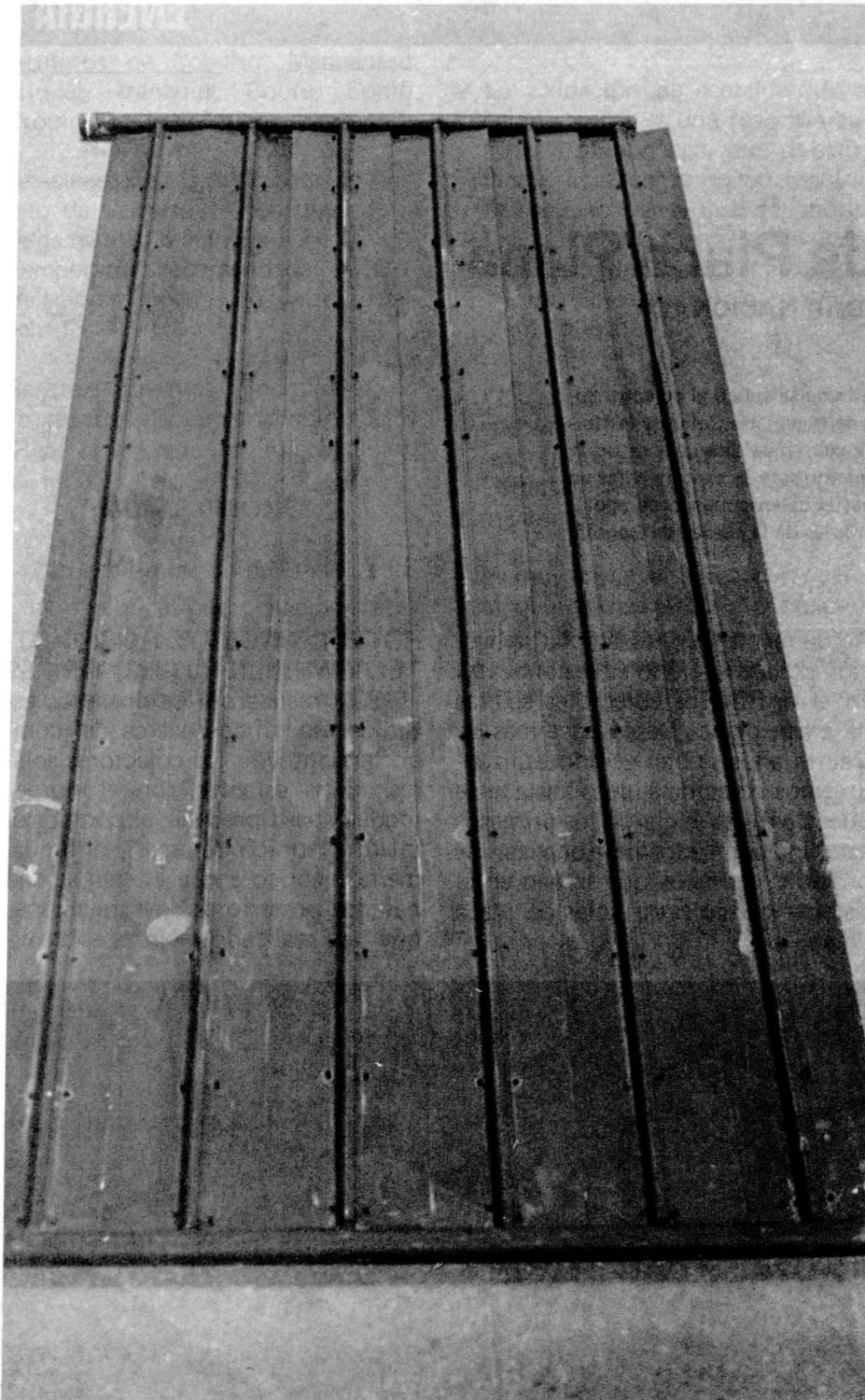
El presente artículo describe el análisis teórico que se aplicó al colector solar de placa plana desarrollado por el Grupo de Ingeniería Solar de la Universidad Nacional. Esta investigación se llevó a cabo para diseñar y estudiar el comportamiento de un dispositivo que transformara la energía solar en energía térmica para una necesidad específica (el calentamiento de agua), en condiciones meteorológicas y geográficas propias de la ciudad de Bogotá.

**Fernando Mesa Claros**  
Est. Ingeniería Mecánica  
Investigador Grupo de Energía Solar.  
Depto. de Física  
Universidad Nacional. Bogotá, D.E.

Actualmente la más amplia aplicación de la energía solar se concentra en el uso de los colectores solares de placa plana. Desde hace más de treinta años se han venido utilizando estos colectores, pero hasta hace pocos años se iniciaron los primeros estudios detallados para analizar los procesos térmicos que se dan en el sistema del colector solar de placa plana.

HOTTEL Y WOERTZ (1942), HOTTEL Y WHILLIER (1958) Y BLISS (1959), realizaron los primeros estudios específicos acerca del comportamiento de los colectores solares. Ellos establecieron el primer modelo para predecir el comportamiento térmico de éstos y el fundamento teórico sobre el cual se han basado posteriores investigaciones que han realizado mejoras sobre es-





caliente para campamentos en obras situadas en regiones aisladas, donde la consecución de la energía es difícil y costosa.

En la Fig. 1, se observa la composición básica del colector solar de placa plana. Como se ve el colector consta de dos láminas separadas una de la otra y fabricadas de material transparente al espectro solar, las cuales permiten el paso de la radiación solar de onda corta y a su vez impiden la pérdida de calor por transmisión, al medio ambiente, del infrarrojo emitido por la placa absorbente, creando así una trampa de calor (efecto de invernadero). Se compone también de una placa absorbente recubierta de una superficie selectiva que le permite la mejor absorción de la radiación solar incidente; adheridos a la placa absorbente van los ductos por los cuales circula el fluido a calentar y donde se lleva a cabo la conversión de la energía solar en energía térmica. También el colector está rodeado de material aislante para impedir las pérdidas térmicas por conducción en las paredes y en la parte inferior del colector.

En la siguiente sección se estudiarán las características de los diversos componentes del colector y el funcionamiento mismo de éste.

### DESCRIPCION GENERAL

La radiación solar es el tipo de energía que se propaga a través del espacio, a la velocidad de la luz en forma de ondas electromagnéticas. La radiación se distribuye sobre un rango de longitudes de onda al que llamamos Espectro de Radiación Electromagnética. Dentro del espectro la energía solar que llega a la superficie de la tierra está ubicada en el rango de longitudes de onda comprendido entre  $0.29$  y  $3.0\mu\text{m}$ .

La radiación solar que logra atravesar las cubiertas transparentes del colector es absorbida en la placa, a la cual se le han soldado los ductos por los cuales circulará el fluido. Existen tres configuraciones principales para la colocación de estos

◀ te primer modelo teórico original, por autores tales como Tabor (1958) y Klein (1973).

Los colectores solares de placa plana se diseñan preferentemente para aplicaciones térmicas que requieran la obtención de temperaturas hasta del orden de  $100^{\circ}\text{C}$ , por encima de la temperatura ambiente. La aplicación directa de los colectores solares de placa plana esta en el calenta-

miento de agua para uso doméstico, sin excluir el uso potencial de éstos en el precalentamiento de agua para procesos industriales como también, en el calentamiento de aire en edificaciones donde se requiera el control de la temperatura ambiental. En nuestro país se han utilizado los calentadores solares de agua para aplicación en conjuntos residenciales, así como en la dotación de agua

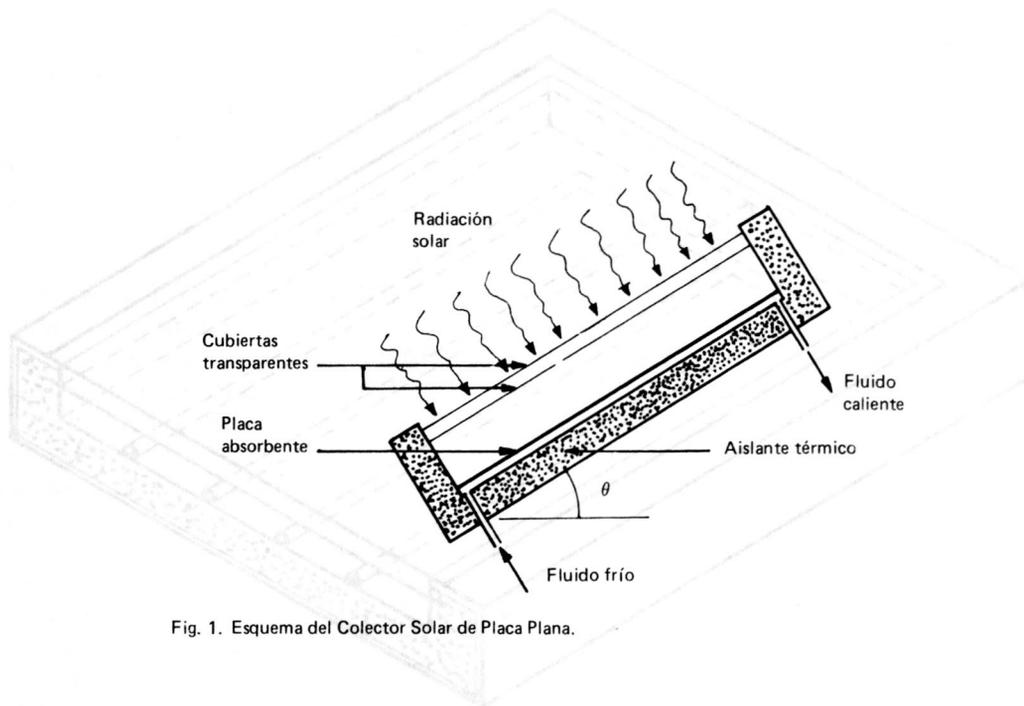


Fig. 1. Esquema del Colector Solar de Placa Plana.

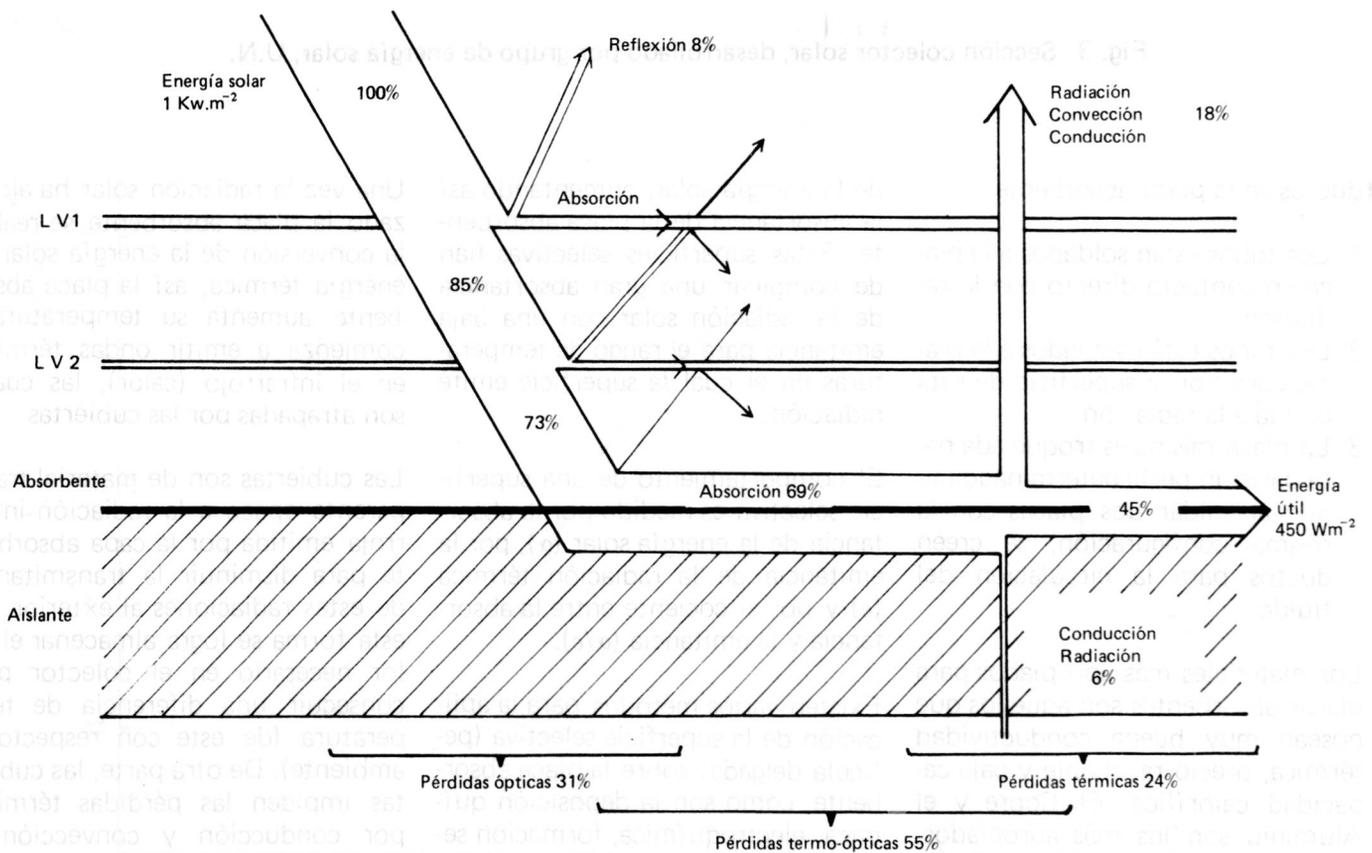


Fig. 2. Flujo de energía (valores típicos) en un colector solar (Tomado de 7).

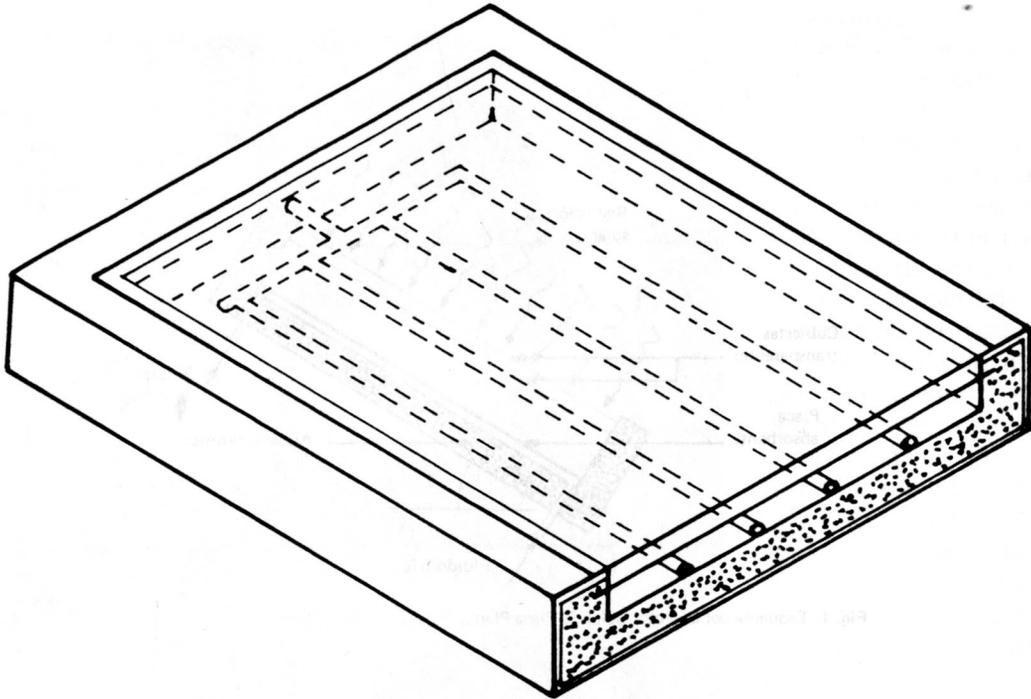


Fig. 3. Sección colector solar, desarrollado por grupo de energía solar, U.N.

◀ ductos en la placa absorbente.

1. Los tubos están soldados a la placa en contacto directo con la radiación.
2. Los tubos están soldados a la placa, pero por la superficie de esta oculta a la radiación.
3. La placa misma es troquelada para darle un perfil determinado tal, que al soldar dos placas con la misma configuración, se creen ductos para la circulación del fluido.

Los materiales más apropiados para placas absorbentes son aquellos que posean muy buena conductividad térmica, precio razonable y baja capacidad calorífica. El Cobre y el Aluminio son los más apropiados, pero el Aluminio por su bajo precio en comparación al Cobre es el que actualmente se prefiere. A su vez la placa absorbente se reviste con una sustancia que sirva de superficie selectiva a las emisiones radiativas

de la energía solar, aumentando así la absorción de la placa absorbente. Estas superficies selectivas han de combinar una gran absorción de la radiación solar con una baja emitancia para el rango de temperaturas en el cual la superficie emite radiación.

El comportamiento de una superficie selectiva es medido por la absorción de la energía solar ( $\alpha$ ), por la emitancia de la radiación térmica ( $\epsilon$ ) y por el cociente entre la absorción y la emitancia ( $\alpha/\epsilon$ ).

Existen varios métodos para la aplicación de la superficie selectiva (película delgada) sobre la placa absorbente, como son la deposición química, electroquímica, formación selectiva de estructuras, pinturas y deposición química o física de vapores.

A continuación se presenta una tabla con referencia a algunos recubrimientos selectivos.

Una vez la radiación solar ha alcanzado la placa absorbente se realiza la conversión de la energía solar en energía térmica; así la placa absorbente aumenta su temperatura y comienza a emitir ondas térmicas en el infrarrojo (calor), las cuales son atrapadas por las cubiertas.

Las cubiertas son de material transparente opaco a la radiación infrarroja emitida por la capa absorbente para disminuir la transmitancia de estas radiaciones al exterior. De esta forma se logra almacenar el calor necesario en el colector para conseguir una diferencia de temperatura (de este con respecto al ambiente). De otra parte, las cubiertas impiden las pérdidas térmicas por conducción y convección al exterior.

El vidrio es el material más usado actualmente como cubierta del colector por su disponibilidad, su relativa opacidad al infrarrojo, su alta

transmitancia de la radiación solar (85-92%), su estabilidad térmica y sus favorables propiedades mecánicas.

En el análisis del comportamiento de un colector solar se debe tratar de cuantificar las pérdidas energéticas que disminuyen la eficiencia del mismo. Se presentan dos tipos: pérdidas ópticas y pérdidas térmicas.

Las pérdidas ópticas se presentan por los fenómenos de transmitancia del infrarrojo, reflexión y absorción de la radiación solar. Las pérdidas térmicas se producen por la transmisión del calor (al ambiente) por los mecanismos de conducción y convección principalmente.

Según H. Rodríguez y J. González (4), Fig. 2, si asumimos 1 KW/m (100%) antes de la primera lámina de vidrio (LV1), a la segunda (LV2) tan sólo llega un 85% debido a la reflexión (8%), la absorción (7%) en LV1. De esta fracción, el 73% incide sobre el absorbente debido a la

reflexión (7%) y a la absorción (5%) en LV2. Finalmente, tan sólo un 69% de la radiación incidente es efectivamente absorbida. Esto quiere decir que como consecuencia de los fenómenos de reflexión y absorción se han producido pérdidas ópticas del 31%. Además, las pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción alcanzan el 24%. En total tenemos que el 55% son pérdidas y que la energía útil es el 45% o sea 450 Wm<sup>2</sup>.

### CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DEL COLECTOR SOLAR

Las fotografías y la figura 3 muestran el colector solar de placa plana desarrollado por el GRUPO DE ENERGIA SOLAR del Departamento de Física de la Universidad Nacional. En esta sección se expondrán algunas de las características más importantes del colector, así como su comportamiento y también se mostrará la forma cómo se llegó a los resultados.

Como ya se explicó, la radiación solar al atravesar las cubiertas transparentes del colector, sufre una serie de fenómenos físicos que disminuyen la intensidad de la energía que finalmente es convertida en energía térmica utilizable. Los índices o factores físicos que explican esta cantidad de energía solar perdida son la reflectancia ( $\rho$ ) y la transmitancia ( $\tau$ ) de las cubiertas, así como la emitancia ( $\epsilon$ ) en el infrarrojo de la placa absorbente.

Para averiguar el valor de la reflectancia se puede utilizar la relación de Fresnel (2)

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{Tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{Tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right) \quad (1)$$

Donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente. Dado  $\theta_1$ , se puede hallar  $\theta_2$ , conocidos los índices de refracción de los medios en los cuales ocurre el fenómeno (en nuestro caso aire y vidrio) utilizando la ley de Snell: ▶

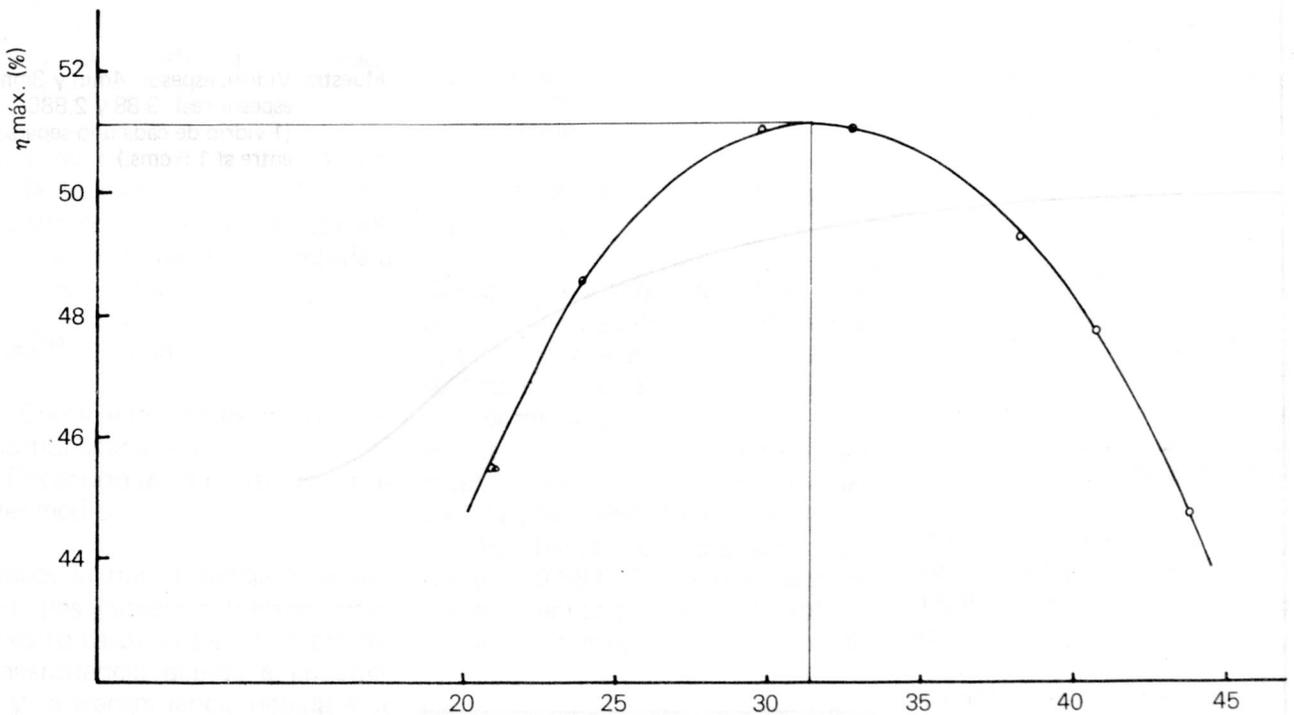


Fig. 4. Obtención del ángulo óptimo.

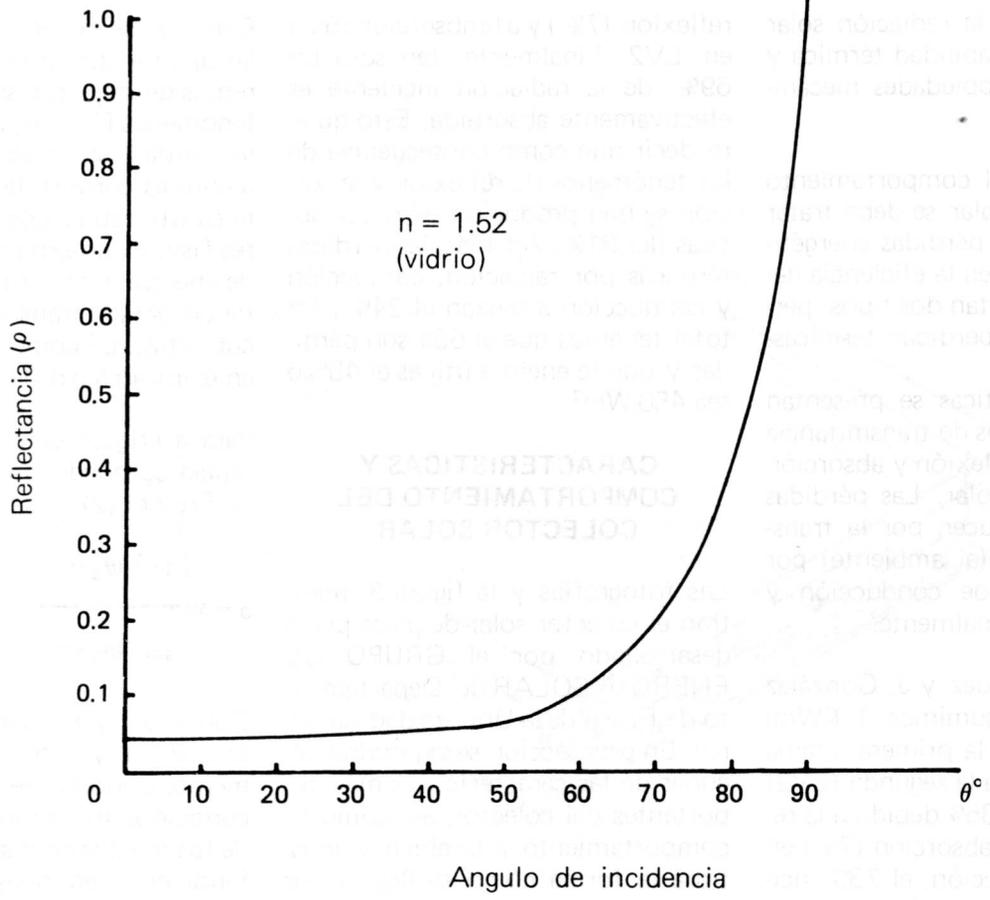


Fig. 5. Variación de la reflectancia según el ángulo de incidencia.

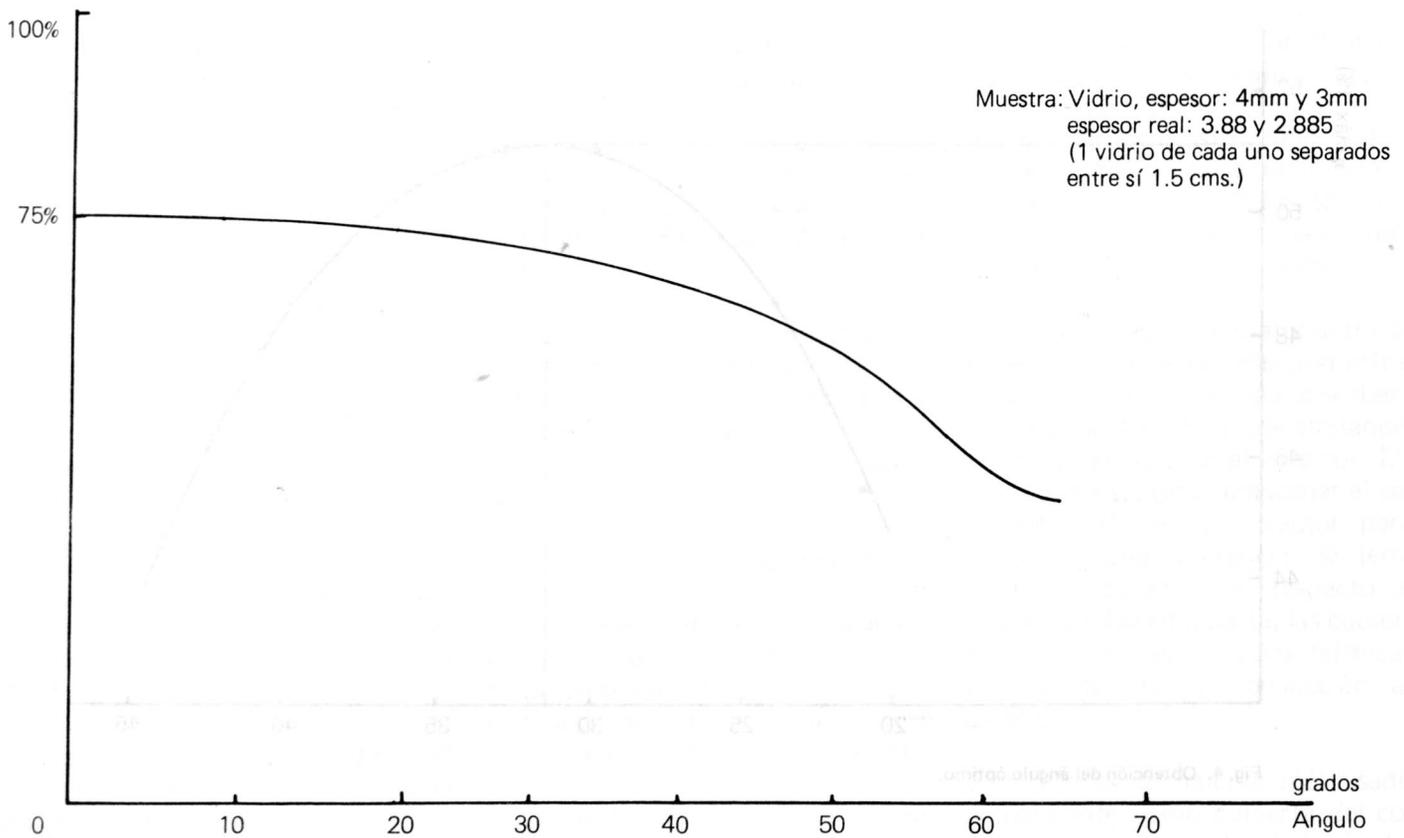


Fig. 6. Transmitancia Experimental Angular.

$$\frac{\eta_1 \sin \theta_2}{\eta_2 \sin \theta_1} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (2)$$

siendo  $\eta_1$  y  $\eta_2$  los índices de refracción del medio de incidencia y del medio de refracción respectivamente.

Aplicando las relaciones anteriores al caso del colector, en el cual se ha empleado vidrio de fabricación nacional con un índice de refracción igual a 1.52 (dato tomado del estudio realizado por el físico J. C. González (7)). Para ángulos de incidencia entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  se obtuvo la gráfica de la reflectancia que se muestra en la Fig. 5.

El otro parámetro a considerar es la transmitancia. Se ha hallado que la transmitancia de las cubiertas se define en términos de la reflectancia y se encuentra también intrínsecamente relacionada con la absorptancia de la cubierta.

Según Duffie & Beckman (2), la transmitancia definida en términos de la reflectancia, para un sistema de dos cubiertas, se obtiene como:

$$\tau_r = \frac{(1-\rho)}{(1+3\rho)} \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la reflectancia hallada según la relación (1).

La Ley de Bouger define la absorción de la radiación en un medio transparente y con base a esta ley definimos la transmitancia debida a la absorción como:

$$\tau_a = e^{-kL}, \quad \text{con}$$

$k$  = Coeficiente de extinción del medio transparente y

$L$  = Recorrido de la radiación a través del medio.

Entonces la transmitancia total del medio (las cubiertas transparentes en nuestro caso) será el producto de la transmitancia debida a la reflexión y la transmitancia debida a la absorción, así:

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a = \left[ \frac{1-\rho}{1+3\rho} \right] \cdot e^{-kL}$$

En la construcción del colector se emplearon dos cubiertas de vidrio: la exterior con espesor nominal de 4mm y la interior con espesor nominal de 3mm., el coeficiente de extinción fue  $k = 0.3722/\text{cm}$ . En la Fig. 6 se observa la gráfica de la transmitancia como función del ángulo de incidencia.

El producto de la transmitancia angular de las cubiertas por la absorptancia de la placa absorbente ( $\tau \cdot \alpha$ ) es el primer indicativo de la cantidad de energía solar que llega y es efectivamente absorbida por la placa. En la Fig. 7, se aprecia la situación para un colector solar típico, donde inicialmente se transmite una cantidad  $\tau$  de energía solar, se absorbe  $\tau \cdot \alpha$  y se refleja de nuevo hacia las cubiertas una cantidad  $(1-\alpha)\tau$ .

Este proceso se repite indefinidamente dentro del colector, por lo tanto se puede definir el producto  $\tau \alpha$  como sigue:

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

$\rho_a$  = Reflectancia de la radiación solar difusa.

Como se verá más adelante el producto  $\tau \alpha$  caracterizará la eficiencia óptica del colector. Para el colector se empleó una superficie semiselectiva compuesta de una mezcla de grafito y pintura negro mate en aerosol. El valor de la absorptancia ( $\alpha$ ) para la placa absorbidora de aluminio recubierta con esta superficie fue  $\alpha = 0.588$ . Como este valor de  $\alpha$  fue obtenido por radiación solar a incidencia normal, utilizamos el valor de  $\hat{\tau}$  a incidencia normal, esto es  $\tau = 0.75$ . Por lo tanto, el valor del producto  $\tau \alpha$  así obtenido es  $\tau \alpha = 0.441$ .

Para la descripción del comportamiento térmico del colector nos guiaremos por los modelos teóricos establecidos por Hottel & Woertz, pero aplicándolos a condiciones locales.

Realizando un sencillo balance energético, diremos que la cantidad de energía aprovechable ( $E_G$ ) por el colector, está dada por:

$$E_G = E_a - E_p \quad (5)$$

Con,

$E_p$  = Energía pérdida y  
 $E_a$  = Energía absorbida.

$$\text{y donde } E_a = A_c I_i (\tau \alpha) \quad (6)$$

con,

$A_c$  = Área del colector ( $\text{m}^2$ ),  
 $I_i$  = Cantidad de energía solar incidente sobre el colector ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

La cantidad de energía perdida del colector, puede definirse en términos de la temperatura de trabajo del colector y de un coeficiente total de pérdidas  $U_T$ , como sigue:

$$E_p = U_T A_c (T_p - T_a) \quad (7)$$

$T_p$  = Temperatura promedio de la placa absorbente.

$T_a$  = Temperatura ambiente.

La diferencia  $(T_p - T_a)$  es la temperatura de trabajo del colector. El coeficiente total de pérdidas  $U_T$  se puede hallar sumando las pérdidas térmicas a través de la parte superior (cubiertas), de la parte inferior (aislante térmico) y los lados del colector, ver Fig. 8.

El coeficiente de pérdidas térmicas por el costado inferior  $U_i$  está definido por  $U_i = K_a/e$ , donde  $K_a$  es el coeficiente de conductividad térmica del material aislante y  $e$  es el espesor del mismo. El coeficiente de

\*NOTA:

—para medios opacos  $\alpha \sum \rho = 1$   $\delta \tau = 0$

—para medios transparentes

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

◀ pérdidas laterales  $U_L$  es del mismo orden de  $U_i$ , pero para colectores de más de  $10m^2$  se considera despreciable. El coeficiente de pérdidas térmicas por la superficie superior del colector  $U_s$ , está dado por la relación propuesta por Klein (6):

$$U_s = \left[ \frac{N}{(344/T_p) [(T_p - T_a)/(n+f)]^{0.31}} + \frac{1}{hw} \right] + \frac{\sigma (T_p + T_a) (T_p^2 + T_a^2)}{[\epsilon_p + 0.0425N(1 - \epsilon_p)]^{-1} + [(2N+f-1)/\epsilon_a] - N} \quad (8)$$

donde,

$N =$  Número de cubiertas de vidrio.

$\sigma = 5.68 \times 10^{-8} [wm^{-2} \circ K^{-4}]$  Constante de Stephan Boltzman.

$\epsilon_p =$  Emitancia de la placa absorbente.

$\epsilon_a =$  Emitancia del vidrio.

$f = (1.0 + 0.04 hw + 5.0 \times 10^{-4} h^2 w)$

$(1.0 + 0.058N)$

$hw$ , Coeficiente de transferencia de calor debido al viento, con velocidad  $V$ .

$T_a =$  Temperatura ambiente.

$T_p =$  Temperatura promedio de la placa.

Aunque el valor de  $U_s$  obtenido en

(8) es válido exclusivamente para colectores con inclinación  $\theta = 45^\circ$  Klein (6) formuló, también una relación que corrige este valor de  $U_s$  para cualquier ángulo de inclinación  $\theta$  del colector:

$$\frac{U_s(\theta^\circ)}{U_s(45^\circ)} = 1 - (\theta^\circ - 45^\circ) (0.00259 - 0.00144 \epsilon_p) \quad (9)$$

En la Fig. 9 se observa la variación del coeficiente de pérdidas superiores como función de la temperatura promedio de la placa.

En este orden de ideas y con los conceptos antes mencionados defi-

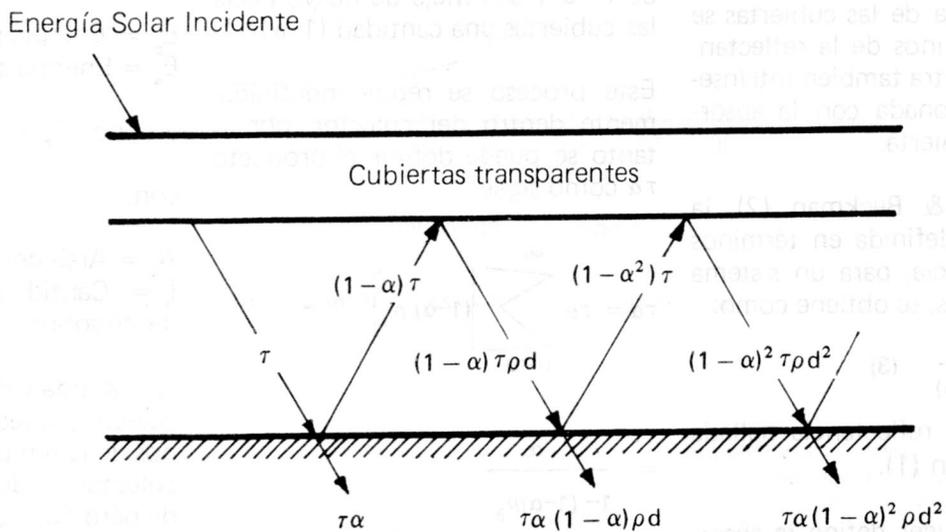


Fig. 7. Absorción de la radiación solar en la placa (Tomado de 2).

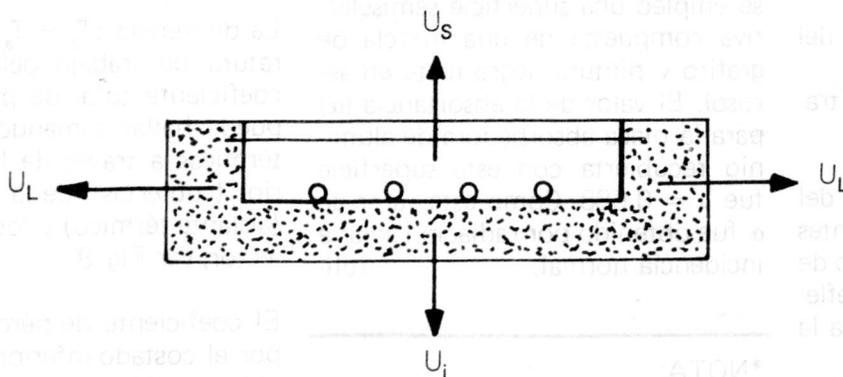


Fig. 8. Coeficientes de pérdidas térmicas en el colector solar.

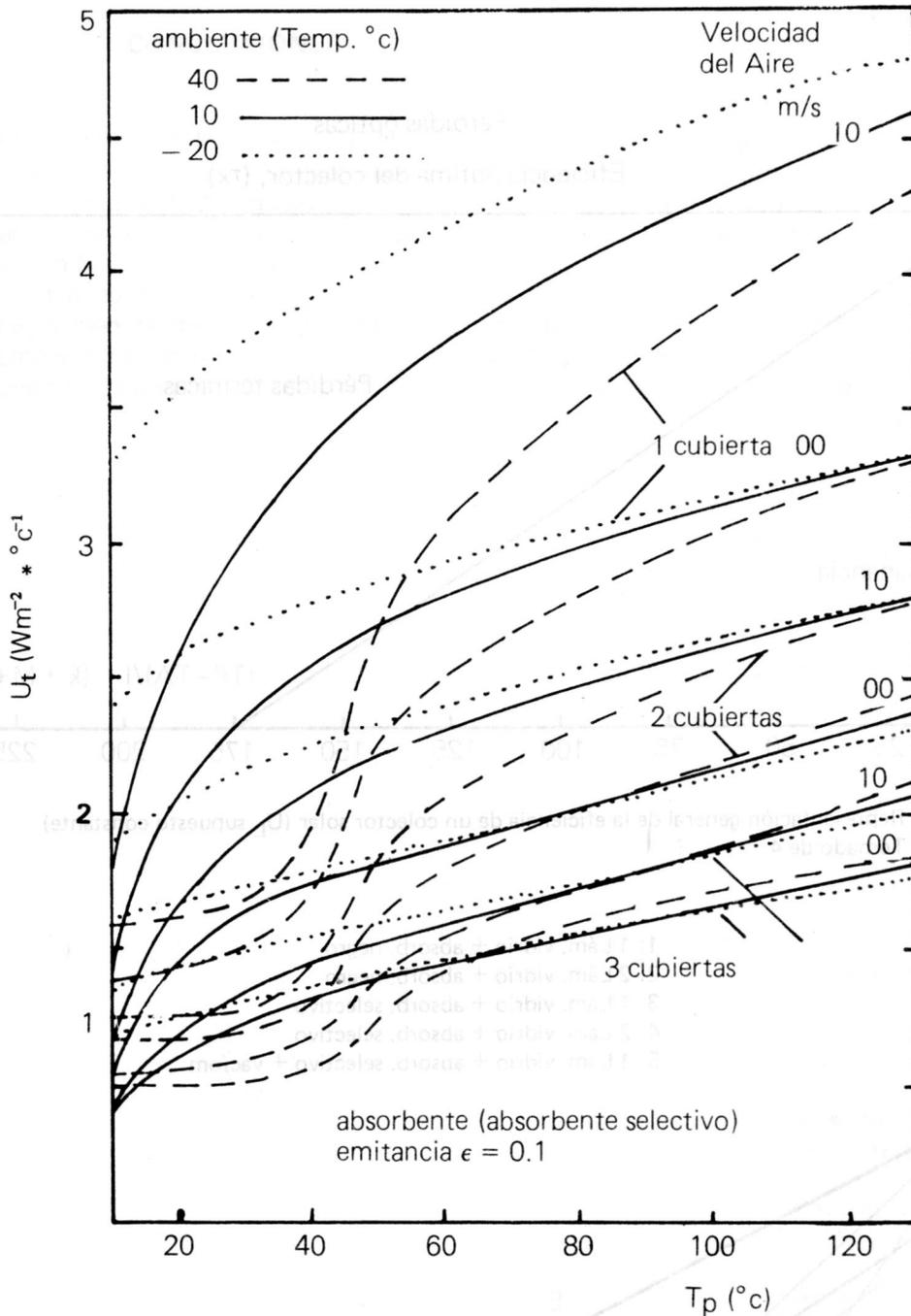


Fig. 9. Coeficiente de pérdidas superiores como función de la temperatura del absorbente (Tomado de 4).

nimos la eficiencia instantánea del colector  $\eta$  como:

$$\eta = \frac{E_G}{E_i} = (\tau\alpha) - \frac{U_t}{I} (T_p - T_a) \quad (10)$$

Donde  $E_i$  es la energía solar incidente dada como:  $E_i = A_c I_i$

La Fig. 10 muestra la gráfica de  $\eta$  en función de  $(T_p - T_a)/I$ , supuesto  $U_t$  constante. Analizando la Eq (10), vemos que cuando  $T_p = T_a$ , la efi-

ciencia  $\eta$  del colector depende del valor  $(\tau\alpha)$ , siendo este constante; bajo estas condiciones la gráfica de  $\eta$  define la eficiencia óptica del colector. De otra parte, se nota que la Eq (10) es la gráfica de una recta de pendiente negativa  $U_t$  cuyo punto de corte con el eje de las abcisas representa la  $T_p$  máxima que pueda lograr la placa del colector, para unas condiciones instantáneas dadas ( $T_a$  e  $I$ ) y para un colector específico  $(\tau\alpha)$  y  $U_t$ . Por lo tanto, se

observa que el comportamiento del colector se caracteriza por su eficiencia óptica y su coeficiente total de pérdidas  $U_t$ . La Fig. 11 muestra la eficiencia para varios tipos de colectores; se puede ver que a la vez que disminuimos el coeficiente de pérdidas  $U_t$  con el número de láminas de vidrio también decrece la eficiencia óptica del colector. Además se nota que el uso de absorbentes selectivos mejora la eficiencia del colector.

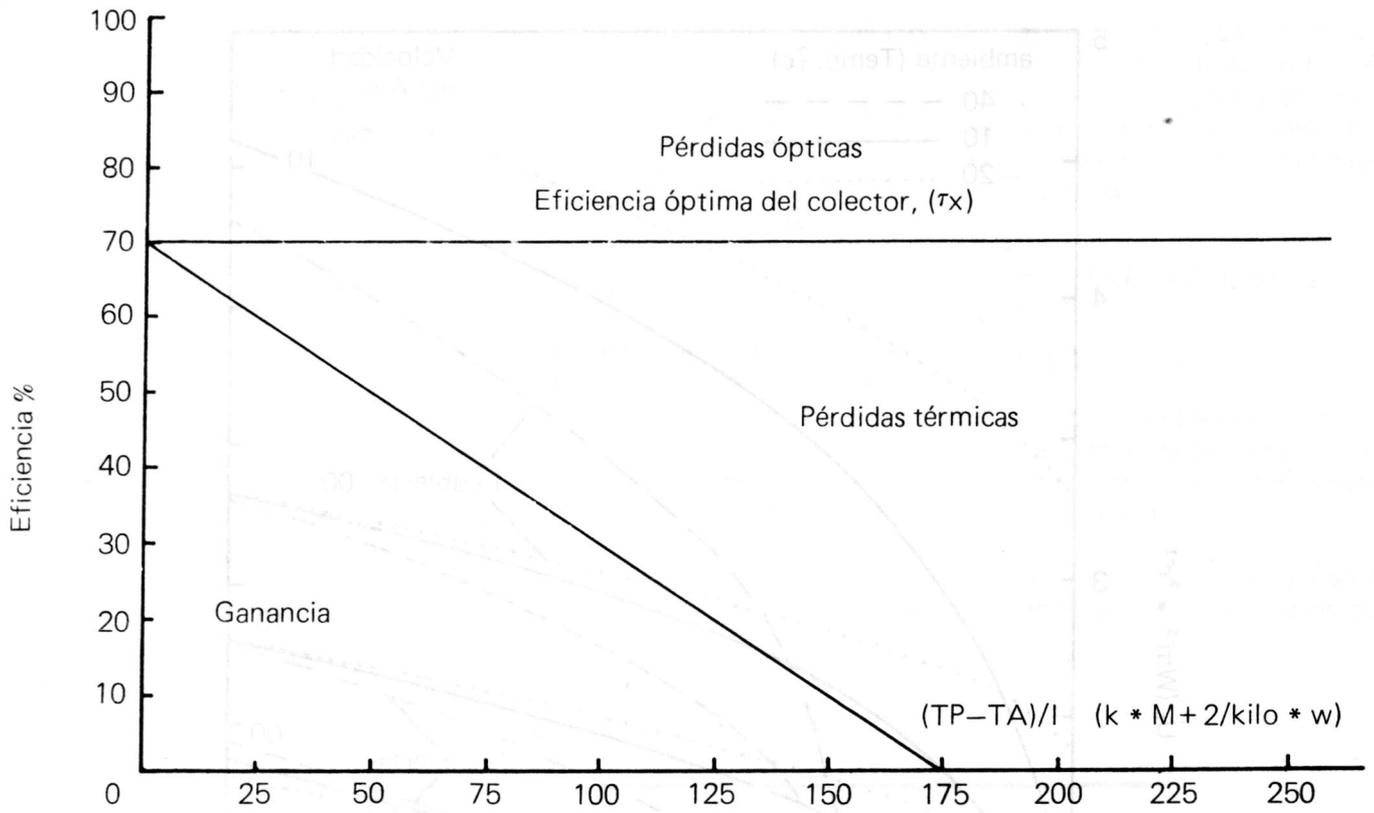


Fig. 10. Representación general de la eficiencia de un colector solar ( $U_L$  supuesto constante). Tomado de 4.

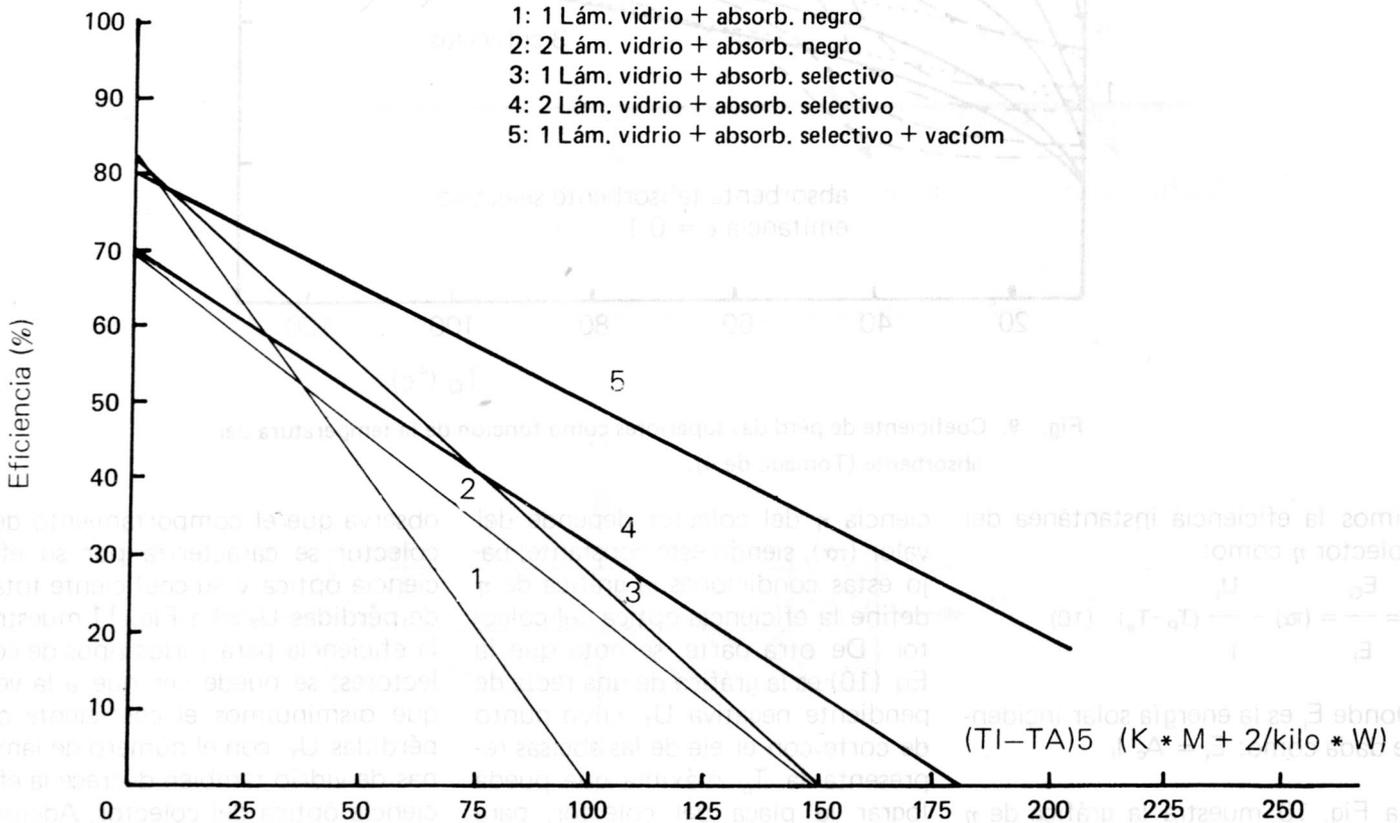


Fig. 11. Eficiencia de diferentes tipos de colectores. (Tomado de 4).

## CONCLUSIONES

Es pertinente recalcar que el uso de los colectores solares de placa plana está limitado por la temperatura que pueda alcanzar la placa absorbente, bajo unas condiciones dadas para una necesidad específica pues, como se sabe, a medida que la diferencia de temperaturas entre la placa y el ambiente disminuye,

crece la eficiencia del colector. También puede concluirse que se necesita más investigación en el ramo de las superficies selectivas para mejorar la absorción de la placa absorbente aumentando así la eficiencia. Basta decir que los colectores, como el aquí estudiado, son de tipo modular; o sea que permiten

hacer combinaciones en serie o en paralelo de varios módulos para un sistema determinado.

Para concluir el presente artículo, deseo rendir mis más sinceros agradecimientos a los compañeros del Grupo de Energía Solar; al director del Grupo, Dr. Humberto Rodríguez quien gentilmente revisó el escrito y a los físicos, Julio C. González y Fabio González quienes me brindaron los datos que consideré necesarios ■

---

## BIBLIOGRAFIA

1. Bruce. L. Anderson. "Solar Energy. fundamentals in Building Design".
2. Duffie & Beckman. "Solar Energy. Thermal processes".
3. Frank Kreith & Jan. F. Kreider. "Principles of Solar Engineering".
4. H. Rodríguez & J.C. González. "Seminaro Sobre Energía Solar".
5. Tabor H. "Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors". Bull. Res. Coun. Israel, 1958.
6. Klein, S., M.S. Thesis, University of Wisconsin. 1973.  
*"The effect of thermal capacitance upon the performance of flat plate solar collectors"*.
7. J.C. González. Tesis de postgrado, Dpto. de Física. U. Nal.  
*"Análisis de cubiertas transparentes y de superficies selectivas para colectores solares"*. 1981.