

## UN CONCENTRADOR TIPO WINSTON.

Mario Díaz, Amílcar Fasulo, Pedro Velazco y Luis Odicino.

Universidad Nacional de San Luis, San Luis.

### Resumen:

La propuesta de Winston es analizada determinandose las ecuaciones de las parábolas del concentrador, luego se generan las gráficas correspondientes de los perfiles, que se emplearon para producir matrices con las cuales se obtienen superficies parabólicas de vidrio, resina, chapas de hierro y acero inoxidable, se espejan las dos primeras por deposición de aluminio al vacío y las otras por cromado y pulido respectivamente. Se construyen así cuatro concentradores de pequeñas dimensiones, los cuales son sometidos a estudio de rendimiento variandose las temperaturas de entrada del fluido y su caudal. Un colector plano de similares dimensiones es también experimentado. Con estos resultados se genera una fórmula que posibilitará el diseño de colectores de tamaños mayores de acuerdo a requisitos pre-establecidos. Se da como ejemplo un prototipo a construir en el futuro.

### Abstract:

Winston's proposal is analysed, determining the concentrator's parabolic equations. The drawings of the profiles employed to produce the molds used in the manufacture of the resin, glass, iron and stainless steel parabolic surfaces are then generated. The resin and glass surfaces are mirror like by aluminium deposition in a vacuum, the iron surfaces by chromium plating and the stainless steel surfaces generated by polishing. Thus, four small concentrators were built and they were tested over a range of input temperatures and flow-rates of the cooling fluid. A flat collector of similar dimensions was also analysed.

A formula that will allow the custom design of bigger collectors according to pre-established demands generates as a result of these experiences.

A prototype for future construction is given as an example.

### Introducción:

Uno de los objetivos prioritarios fijados por nuestro grupo de investigación es la obtención de un dispositivo que poseyendo las características de simplicidad y economía en su operación y mantenimiento tal como ocurre con los colectores planos, sea capaz de operar a un rango de temperaturas superior a la de estos. Este último requisito es satisfecho mediante la concentración de la radiación solar, pero los concentradores solares tradicionales poseen el inconveniente de requerir mecanismos de seguimiento, encareciéndose así el dispositivo en su costo y mantenimiento.

## UN CONCENTRADOR TIPO WINSTON.

Mario Díaz, Amílcar Fasulo, Pedro Velazco y Luis Odicino.

Universidad Nacional de San Luis, San Luis.

### Resumen:

La propuesta de Winston es analizada determinandose las ecuaciones de las parábolas del concentrador, luego se generan las gráficas correspondientes de los perfiles, que se emplearon para producir matrices con las cuales se obtienen superficies parabólicas de vidrio, resina, chapas de hierro y acero inoxidable, se espejan las dos primeras por deposición de aluminio al vacío y las otras por cromado y pulido respectivamente. Se construyen así cuatro concentradores de pequeñas dimensiones, los cuales son sometidos a estudio de rendimiento variandose las temperaturas de entrada del fluido y su caudal. Un colector plano de similares dimensiones es también experimentado. Con estos resultados se genera una fórmula que posibilitará el diseño de colectores de tamaños mayores de acuerdo a requisitos pre-establecidos. Se da como ejemplo un prototipo a construir en el futuro.

### Abstract:

Winston's proposal is analysed, determining the concentrator's parabolic equations. The drawings of the profiles employed to produce the molds used in the manufacture of the resin, glass, iron and stainless steel parabolic surfaces are then generated. The resin and glass surfaces are mirror like by aluminium deposition in a vacuum, the iron surfaces by chromium plating and the stainless steel surfaces generated by polishing. Thus, four small concentrators were built and they were tested over a range of input temperatures and flow-rates of the cooling fluid. A flat collector of similar dimensions was also analysed.

A formula that will allow the custom design of bigger collectors according to pre-established demands generates as a result of these experiences.

A prototype for future construction is given as an example.

### Introducción:

Uno de los objetivos prioritarios fijados por nuestro grupo de investigación es la obtención de un dispositivo que poseyendo las características de simplicidad y economía en su operación y mantenimiento tal como ocurre con los colectores planos, sea capaz de operar a un rango de temperaturas superior a la de estos. Este último requisito es satisfecho mediante la concentración de la radiación solar, pero los concentradores solares tradicionales poseen el inconveniente de requerir mecanismos de seguimiento, encareciéndose así el dispositivo en su costo y mantenimiento.

Un concentrador de radiación parabólico fue propuesto en 1966 (1) idea que fue aplicada por Winston para generar un colector concentrador estacionario de energía solar, con un factor de concentración del orden de 10, (2), requiriendo solo ajustes estacionales para mantener la concentración en el orden citado.

Este dispositivo es en un primer paso estudiado geoméricamente obteniéndose de manera simple la ecuación de las curvas de una superficie parabólica que cumple los requisitos del concentrador citado, con esta ecuación se obtienen las figuras de la parábola por medio del grafivador de una computadora a la cual es llevada la fórmula. Luego en trabajo de taller son producidos perfiles de chapa y matrices de ladrillos cerámicos que permiten la construcción de superficies parabólicas de diversos materiales.

Se procede entonces con el mismo criterio empleado para seleccionar materiales en colectores planos (3), de determinar experimentalmente los rendimientos de pequeños colectores que son operados simultáneamente, es decir bajo idénticas condiciones atmosféricas y de radiación, para luego efectuar la elección de uno de ellos para generar un prototipo que es propuesto.

### Ecuación de las superficies:

En el concentrador diseñado por Winston, a los fines de disminuir pérdidas, impone la condición que el rayo incida solo una vez en la superficie reflectora antes de concentrarse. Esto restringe la aceptación a rayos, que formen, con el eje óptico ángulos menores que un  $\theta_{m\acute{a}x}$ .

El ángulo  $\theta_{m\acute{a}x}$  es el formado por el eje de la parábola y el eje óptico del concentrador.

La concentración según Winston es definida como:

$$\frac{A}{d} = \frac{1}{\text{sen } \theta_{m\acute{a}x}} \quad (1)$$

Nuestro problema es desarrollar un prototipo que contenga estos elementos. Para estos fines nuestra primera preocupación es conocer la forma analítica de la curva que nos dará el perfil de la superficie reflectora. Esta será una parte de una rama de parábola que converja en el foco de la imagen respecto del eje óptico.

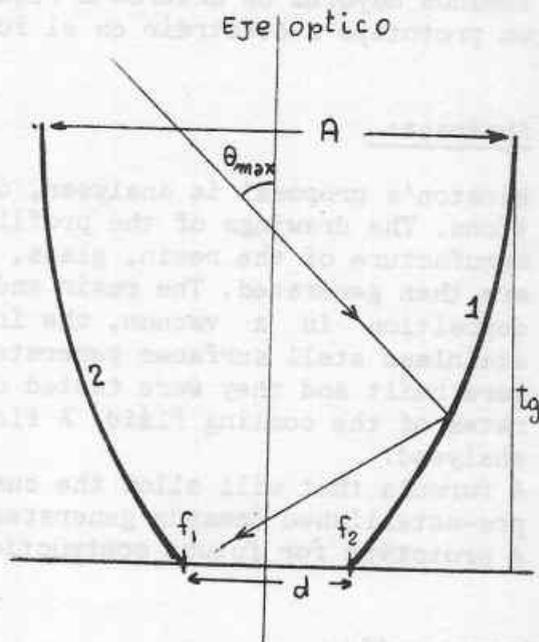


FIGURA I

### Resolución analítica:

Tomamos un sistema (x,y) y en el una parábola con su eje formado un ángulo  $\theta$  con la vertical y su foco en el origen de coordenadas:

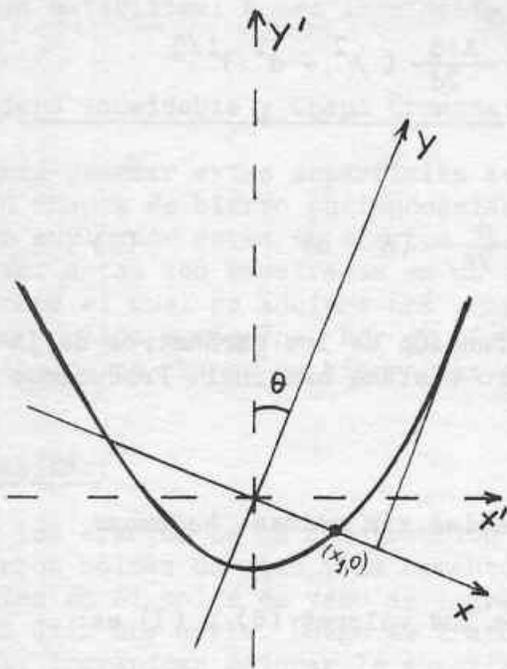


FIGURA II

El punto  $(x_1, 0)$  es el corte de la parábola con el eje. El punto  $(x_2, y_2)$  es el corte de la curva con la recta tangente y perpendicular al eje  $x$ . Rotamos el sistema de ejes  $(x, y)$  en un ángulo  $\theta$ . La matriz de transformación es:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Y en este sistema rotado  $(x', y')$  la ecuación de la parábola es de la forma:

$$y' = ax'^2 + b \quad (3)$$

Encontramos los valores de  $a$  y  $b$  al transformar los puntos pertenecientes a la parábola  $(x_1, 0)$  y  $(x_2, y_2)$  al sistema prima:

$$a = \frac{(x_1 - x_2) \text{tg } \theta + y_2}{\cos \theta (x_2 + y_2 \text{tg } \theta)^2 - x_1^2} \quad (4)$$

$$b = -x_1 \cos \theta \left\{ \text{tg } \theta + \frac{(x_1 - x_2) \text{tg } \theta + y_2}{(x_2 + y_2 \text{tg } \theta)^2 - x_1^2} x_1 \right\} \quad (5)$$

Haciendo un análisis puramente geométrico podemos poner  $a$  y  $b$  en función de las aberturas  $A$  y  $d$  del elemento concentrador:

Así tenemos:

$$x_1 = d ; \quad x_2 = \frac{A + d}{2}$$

$$\text{sen } \theta = \frac{d}{A}$$

$$\cos \theta = \frac{(A^2 - d^2)^{1/2}}{A}$$

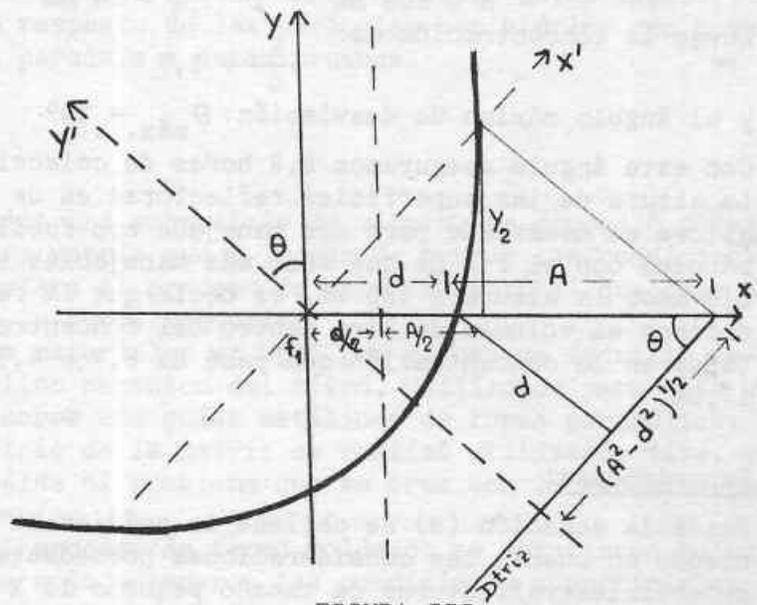


FIGURA III

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d}{-(A^2 - d^2)^{1/2}} \quad ; \quad y_2 = \frac{A+d}{2d} (A^2 - d^2)^{1/2}$$

Reemplazando estos valores en (4) y (5):

$$a = \frac{A}{2d(A+d)} \quad (6) \quad ; \quad b = -\frac{d}{2A}(A+d) \quad (7)$$

Habiendo obtenido los valores de a y b en función de los parámetros de interés, pasaremos del sistema prima a nuestro sistema original. Producimos a los ejes de coordenadas una rotación  $-\theta$ .

$$r = A^{-1} r' = A r'$$

Pero necesitaremos las primas en función de las sin primas, hacemos:

$$A r = A \tilde{A} r' = r'$$

y llevando esto a la (3) teniendo en cuenta los valores (6) y (7) es:

$$y = \frac{A+d}{d} (A^2 - d^2)^{1/2} \left(1 - \frac{x}{A+d}\right) \pm \left(1 - 2 \frac{x}{A+d}\right)^{1/2} \frac{A}{d} (A+d) \quad (8)$$

Siendo la rama de interés la correspondiente al signo menos.

#### Diseño:

Para efectuar las pruebas, diseñamos superficies reflectoras con los siguientes parámetros:

$$A = 103 \text{ mm} \quad ; \quad d = 18 \text{ mm}$$

Luego la concentración es:

$$\frac{A}{d} = 5,7$$

y el ángulo máximo de desviación:  $\theta_{\text{máx.}} = 10^\circ$

Con este ángulo aseguramos 8,8 horas de colección diarias (2).

La altura de las superficies reflectoras es de 341 mm. Consideramos que esta altura es demasiada para ser manejada con facilidad. Decidimos cortar las parábolas con el fin de que sean más manejables y económicas.

Llevamos la altura a 130 mm, es decir que la reducimos en un 62%. También reducimos el volumen de aire dentro del concentrador en un 73%. Nos vimos afectados en la concentración que pasó de 5,7 a 4,7, es decir se redujo en un 17,5%.

#### Experiencias:

Desde la ecuación (8) se obtiene la gráfica de la parábola, de la cual, teniendo en cuenta las consideraciones precedentes se decide la construcción de superficies reflectoras de tamaño pequeño 13 X 50 cm. Se emplearon los siguientes

tes materiales: acero inoxidable, chapas cromadas, resinas y vidrio espejado.

#### Acero Inoxidable y Chapa Cromada:

Para generar estas superficies se procedió a cortar cuidadosamente perfiles en chapas de hierro puliendoselas hasta alcanzar la forma de la gráfica, luego empleando estas se efectúa la reproducción de perfiles en placas de aluminio, estas son empotradas en un travesaño de madera para construir un soporte sobre el cual se adhiere una chapa de acero inoxidable la cual es espejada por pulido a máquina. Por el mismo procedimiento se construye un juego de parábolas en chapas de hierro las cuales fueron espejadas por cromado.

#### Resinas:

A los efectos de la construcción de estas parábolas primeramente se construyeron moldes de yeso y de cemento que se ajustaban a la curva requerida. Si bien en el molde de yeso se lograba una superficie mas adecuada este tenía vida útil muy corta. Luego se trató el molde de cemento con terminación de resina, lograndose mejorar la superficie de contacto, no obstante fue necesario poner sobre dicha superficie MYLAR para lograr que esta sea lo suficientemente pulida y sin asperezas.

Se hicieron parábolas con resina y velo de vidrio a los efectos de lograr suficiente rigidez. Las cuales se espejaron con MYLAR aluminizado no lograndose una buena superficie por cuanto el producto usado para pegar introducía irregularidades en ella. Se probó por consiguiente aluminizar al vacío, este se efectuó primeramente a 70°C. lo cual es inferior a la temperatura de trabajo del colector perdiendo sus propiedades reflectantes. Se efectuó el aluminizado a 140°C. ( 20° más que la temperatura de trabajo del colector) pero al realizarlo se deformaban las parábolas.

Si se deseaba seguir con esta técnica debían construirse en mayor espesor, lo cual resultaba antieconómico respecto de las parábolas con vidrio y con buen resultado se hacían en forma paralela a estas pruebas.

#### Superficies de Vidrio:

Para doblar en forma parabólica una superficie de vidrio, se procedió previamente a la construcción de una matriz que a la vez de reunir las condiciones geométricas necesarias, soportara el proceso de calentamiento al que debe someterse el vidrio para darle la forma requerida.

Luego de distintos ensayos de materiales se optó por el uso de ladrillo refractario. Se procedió al pulido mecánico del mismo, utilizando para ello una herramienta que se desplaza sobre dos guías metálicas de forma parabólica. El mejoramiento de la superficie de la matriz se realizó utilizando tiza, con lo cual se superó en gran medida el problema que se crea con la excesiva porosidad del ladrillo refractario.

Con esta matriz y mediante el proceso de termo moldeado se obtuvieron hojas parabólicas de vidrio, que no solo superaron las condiciones superficiales mínimas sino que además cumplieron en forma bastante satisfactorias los

requerimientos geometricos preestablecidos. Estas superficies fueron luego aluminizadas para obtener las condiciones re\_flectivas deseadas.

### Montaje:

Cada una de las parábolas fue montada dentro de una caja metálica mediante sólidos soportes móviles de manera de permitir ajustes finos de enfoque des\_de el exterior de la caja. Para disminuir la masa de aire en el interior se rellena el espacio comprendido entre las ojas de las parábolas y la caja con lana de vidrio. La zona de concentración de la radiación es ocupada por un caño metálico, que se pinta de negro mate, por el cual circula el fluido. La caja es cerrada en su frente y sus extremos laterales, perpendiculares a las parábolas, con placas de vidrio; sellandose estas entre si con la caja. Las tres cajas que contienen los colectores parabólicos y una de similares dimensiones frontales con un colector plano, son hubicadas en un soporte de inclinación regulable y puestas en posición perpendicular a la radiación al medio día solar.

Los colectores son alimentados con agua desde un tanque elevado que mantiene su nivel constante y pasa luego a otro que está termostatzado, permitiendose así el ingreso de fluido a la temperatura deseada. La regulación del caudal y medición del mismo se efectúa en forma similar a experiencias anteriores (3).

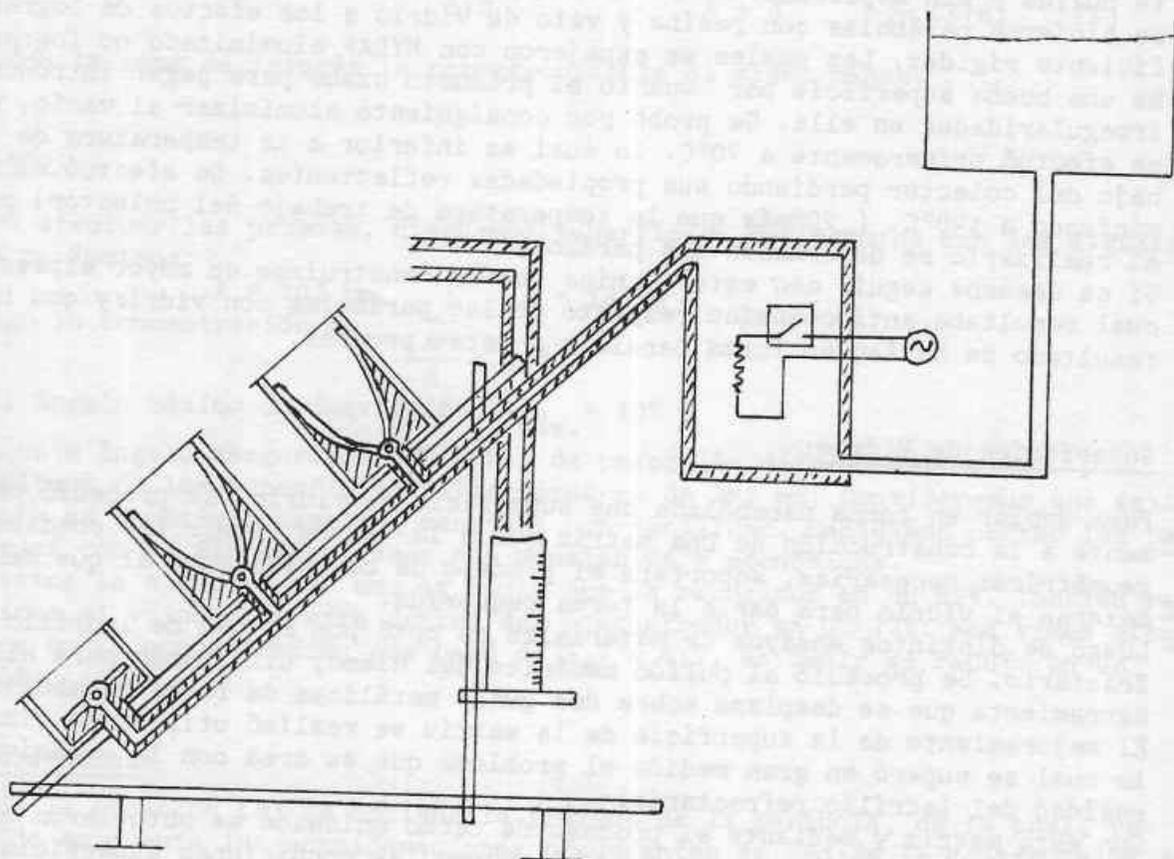


FIGURA IV

El control de las temperaturas se efectúa mediante termocuplas hubicadas a la entrada y salida de cada colector y a distintos sectores de la línea de alimentación, estas son conectadas a un termómetro digital.

Mediciones:

Los datos de rendimiento de cada colector es determinado extrayendo muestras de los caudales, temperaturas de entrada y salida y radiación durante lapsos de tiempos pequeños (cinco minutos) y a travez de cada jornada de medición de cuatro horas de duración con centro en medio día solar, es decir de acuerdo a (3).

A los efectos de disponer de valores de rendimiento de cada colector con relación a distintas temperaturas de ingreso del fluido, se efectuan experiencias tales como la mostrada a travez de sus resultados numéricos en la tabla 1. Estos datos son procesados por el método de cuadrados mínimos observandose que ajustan rectas con un índice de correlación, en valor absoluto, superior a 0,9 y cuyas características son las mostradas en la tabla 2.

La figura V muestra las rectas citadas, en la cual solo como referencia se ha graficado puntos que corresponden a los valores promedios del rendimiento. En las distintas zonas de temperaturas en las cuales se trabajó.

COLECTOR.....	PLANO	VIDRIO	ACERO	CHAPA
PENDIENTE.....	-0,012	-0,0035	-0,0047	-0,0043
ORDENADA AL ORIGEN...	0,86	0,69	0,61	0,55
COEFICIENTE DE CORRELACION.....	-0,979	-0,92	-0,987	-0,93
EXTRAPOLACION AL PUNTO DE CORTE EJE T.:	72°	197°	130°	128°

TABLA 2

Datos de las curvas de rendimiento para un caudal del orden de  $30 \text{ cm}^3$  por minuto, con la radiación del orden de  $1,2 \text{ cal/cm}^2$  minuto, una temperatura ambiente del orden de  $15^\circ\text{C}$ .

Prototipo:

El objetivo de construir colectores que se adecuen a requerimientos pre-establecidos puede ser efectuado a partir de las experiencias ejecutadas, datos tabla 1, datos de variación de rendimientos con el caudal y en terminos de las consideraciones siguientes (4):

$$\eta = \beta - \alpha T \quad (9)$$

Por otra parte este puede ser expresado por la radiación:

$$\eta = \frac{C m}{R b \Delta t} \frac{T_s - T_e}{L} \quad (10)$$

COLECTOR PLANO

T°C	$\eta$
11,90	0,64
12,35	0,70
28,30	0,50
28,35	0,52
28,20	0,56
28,10	0,56
27,20	0,58
27,75	0,54
50,20	0,24
48,95	0,30
48,95	0,23
48,75	0,22

COLECTOR PARABOLICO DE VIDRIO

T°C	$\eta$
12,00	0,67
12,50	0,67
28,25	0,57
28,15	0,58
28,00	0,59
28,05	0,58
27,15	0,59
27,65	0,61
49,30	0,53
48,30	0,57
47,90	0,54
48,05	0,49

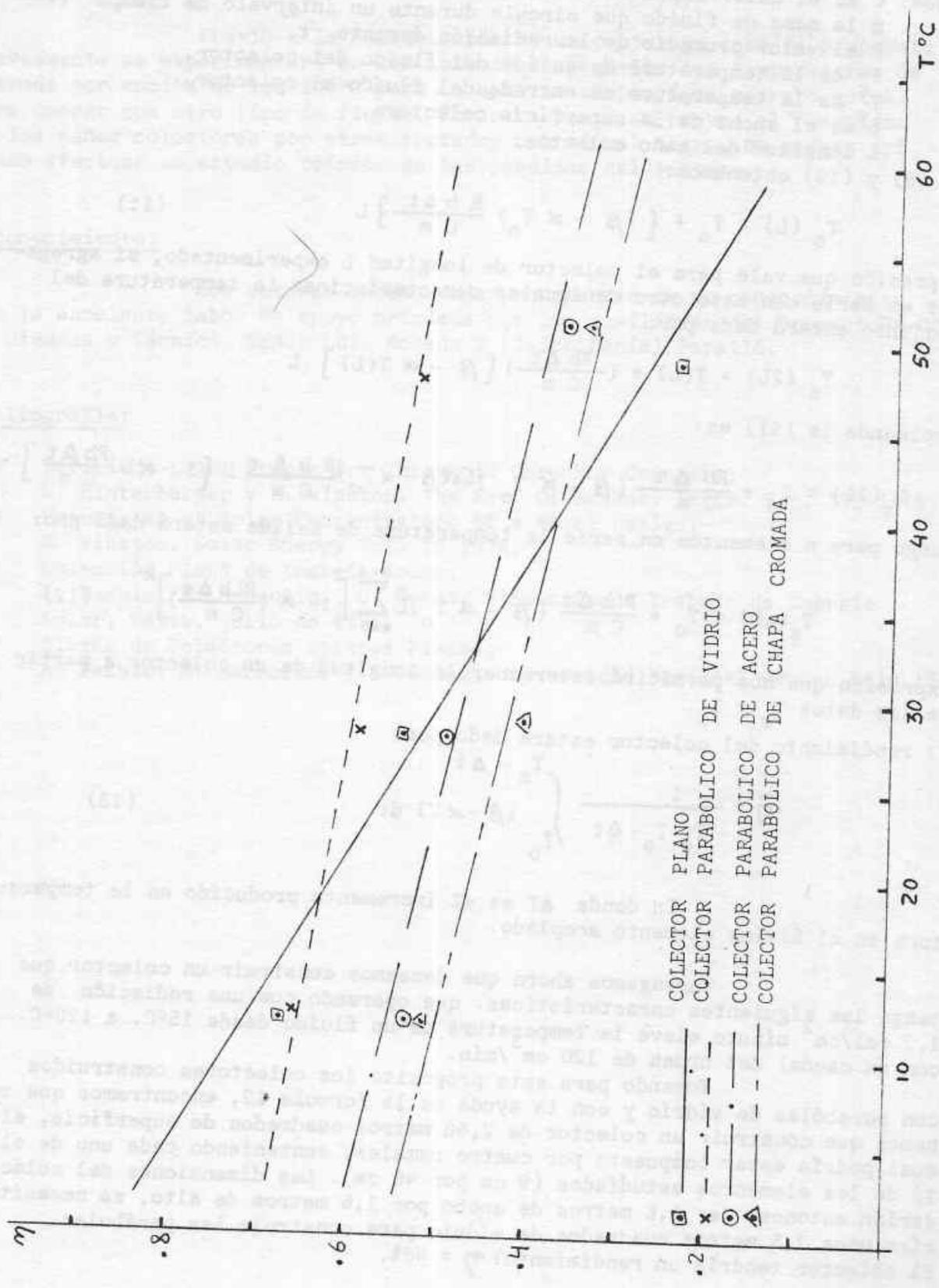
COLECTOR PARABOLICO DE ACERO

T°C	$\eta$
11,85	0,54
12,30	0,53
28,45	0,50
28,60	0,49
28,10	0,51
28,35	0,49
27,90	0,47
28,05	0,51
51,95	0,37
50,65	0,39
50,45	0,37
50,45	0,35

COLECTOR PARABOLICO DE CHAPA CROMADA

T°C	$\eta$
11,90	0,52
12,30	0,53
28,95	0,43
29,05	0,45
28,60	0,42
28,80	0,41
28,35	0,38
28,45	0,38
51,65	0,34
50,60	0,36
50,20	0,35
50,15	0,32

TABLA I



donde: C es el calor específico del fluido circulante.

m la masa de fluido que circula durante un intervalo de tiempo t.

R el valor promedio de la radiación durante t.

T es la temperatura de salida del fluido del colector.

T<sup>s</sup> es la temperatura de entrada del fluido al colector.

b<sup>e</sup> es el ancho de la superficie colectora.

L longitud del caño colector.

De (9) y (10) obtenemos:

$$T_s(L) = T_o + \left\{ (\beta - \alpha T_o) \frac{R b \Delta t}{C m} \right\} L \quad (11)$$

Expresión que vale para el colector de longitud L experimentado, si agregamos en serie con este otro de iguales características la temperatura del conjunto estará dada por:

$$T_s(2L) = T(L) + \left( \frac{R b \Delta t}{C m} \right) \left\{ \beta - \alpha T(L) \right\} L$$

Empleando la (11) es:

$$T_s(2L) = T_o + \frac{R b \Delta t}{C m} (\beta - \alpha T_o) L + (\beta - \alpha T_o) \frac{R b \Delta t}{C m} L \left\{ 1 - \alpha L \frac{R b \Delta t}{C m} \right\}$$

Luego para n elementos en serie la temperatura de salida estará dada pro:

$$T_s(nL) = T_o + \frac{R b \Delta t}{C m} (\beta - \alpha T_o) L \sum_{k=0}^{n-1} \left[ 1 - \alpha \left( \frac{R b \Delta t}{C m} \right) \right]^k \quad (12)$$

Expresión que nos permitirá determinar la longitud de un colector a partir de los datos T<sub>o</sub> y T<sub>s</sub>.

El rendimiento del colector estará dado por:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{T_s - T_o - \Delta t} \int_{T_o}^{T_s - \Delta t} (\beta - \alpha T) dt \quad (13)$$

En donde ΔT es el incremento producido en la temperatura en el último elemento acoplado.

Supongamos ahora que deseamos construir un colector que tenga las siguientes características: que operando con una radiación de 1,2 cal/cm<sup>2</sup> minuto eleve la temperatura de un fluido desde 15°C. a 120°C. con un caudal del orden de 120 cm<sup>3</sup>/min.

Tomando para este proposito los colectores construidos con parábolas de vidrio y con la ayuda de la formula 12, encontramos que tenemos que construir un colector de 2,60 metros cuadrados de superficie, el cual podría estar compuesto por cuatro ramales, conteniendo cada uno de ellos 18 de los elementos estudiados (9 cm por 40 cm). Las dimensiones del colector serían entonces de: 1,6 metros de ancho por 1,6 metros de alto, se necesitarían unos 7,5 metros cuadrados de vidrio para construir las parábolas.

El colector tendría un rendimiento: η = 46%.

## Tareas Futuras:

Previo a la construcción de un prototipo como el propuesto previamente se experimentará en los colectores pequeños con temperaturas de entrada por encima de los 100°C para lo cual se adaptará el aparato actual para operar con otro tipo de fluido. Por otra parte se prevee el reemplazo de los caños colectores por otros tratados con níquel negro, se espera así mismo efectuar un estudio teórico de las pérdidas del sistema.

## Reconocimiento:

Los autores desean dejar constancia de su reconocimiento por la excelente labor de apoyo brindada por los auxiliares del Proyecto 74-02 de Ciencia y Técnica. Señor Luis Moleda y Físico Daniel Perelló.

## Bibliografía:

- (1) Efficient Light Couple for Threshold Cerenkov Counters;  
H. Hinterberger y R. Winston. The Rev. Of Scient. Instr. Vol. 37, 1966.
- (2) Principles of Solar Concentrators of a Novel Design;  
R. Winston. Solar Energy Vol. 16 1974.
- (3) Colección Plana de Energía Solar;  
A. Fasulo, M. Marcolini, O. Gomez. 2º Reunión de Trabajo de Energía Solar, Salta, julio de 1976.
- (4) Diseño de Colectores Solares Planos;  
A. Fasulo, M. Marcolini y O. Gomez, Universidad Nacional de San Luis 1977.