

RECEPTORES PARA EL CONCENTRADOR TIPO WINSTON

Amílcar Fasulo, Mario Díaz, Luis Odicino y Daniel Perelló.
Universidad Nacional de San Luis - 5700 San Luis.

Resumen

Se considera la posibilidad de aumentar el rendimiento del concentrador tipo Winston (1), mediante la reducción de pérdidas en el receptor.

En primer término se intenta eliminar las pérdidas del flujo de radiación solar a través de los espacios entre el receptor y las superficies parabólicas reflectoras. Para ello se introduce un receptor de sección transversal tipo triangular, que además permite alejar su superficie caliente de las parabólicas. La reducción de las pérdidas convectivas son intentadas empleando una cubierta de vidrio para el receptor. Se estudia la localización óptima de este conjunto a través del análisis de la marcha de los rayos en el sistema.

Finalmente se busca una disminución de las pérdidas por radiación desde el receptor, tratando a este con recubrimientos selectivos.

Las diferentes propuestas son experimentadas en colectores de pequeñas dimensiones. Se presentan sus resultados.

Introducción:

En un trabajo anterior presentamos un concentrador tipo Winston (1), al cual le impusimos la condición de ser simple y económico en su operación y mantenimiento, que además trabaje con un rendimiento satisfactorio en un rango de temperaturas mayor que el de los colectores planos. Es ahora, con el fin de cumplir más cabalmente esos requerimientos, que nos hemos dedicado a mejorar el receptor del concentrador. Para ello estudiamos la zona de mayor densidad de rayos (corte de los mismos), para distintas situaciones: concentrador teórico, concentrador truncado mínimo y concentrador real (este último es el que empleamos en nuestras experiencias).

Geometría del concentrador

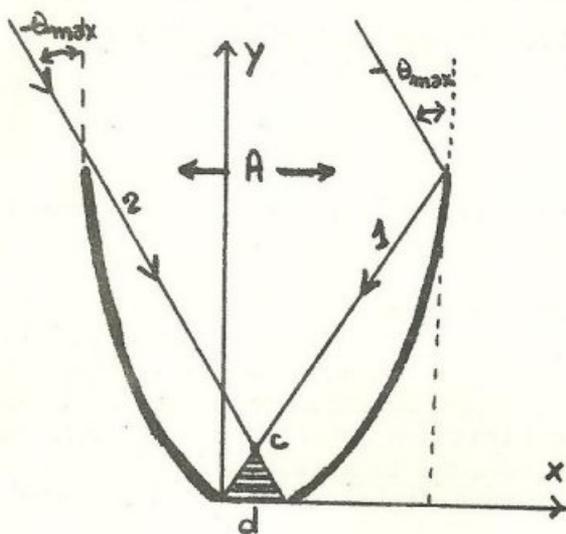
Recordando que el concentrador tipo Winston está formado por dos ramas de parábolas espejadas que cumplen la condición que rayos incidentes dentro de un determinado intervalo angular de longitud $2\theta_{\max}$, se reflejan a lo sumo solo una vez.

La concentración de dicho sistema está determinada por el cociente de las aberturas A y d . Como vimos en (1) la altura está dada por una función de A y d . La ecuación de las ramas parabólicas es:

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

Si consideramos los rayos que inciden con el ángulo θ_{\max} en el extremo supe-

rior de las ramas parabólicas, podemos observar una zona de corte de todos los rayos comprendidos en el intervalo $(-\theta_{\max}, \theta_{\max})$.



Deseamos conocer cuanto vale la altura de este triángulo sombreado y_c .

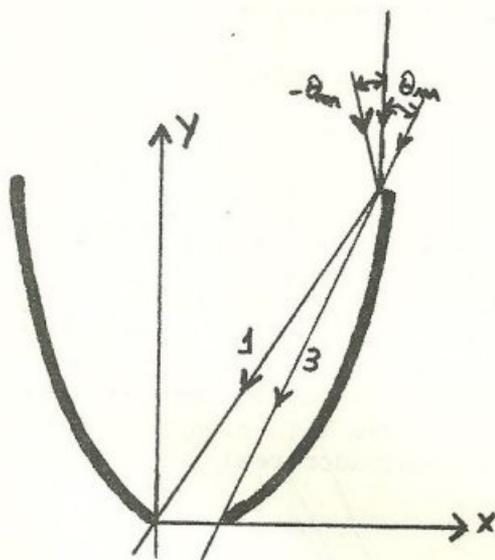
Por simetría conocemos que $x_c = d/2$ y como el rayo 1 es una recta de ecuación:

$$y_1 = \frac{(A^2 - d^2)^{1/2}}{d} x_1$$

es inmediato que:

$$y_c^o = \frac{(A^2 - d^2)^{1/2}}{2}$$

Estos resultados corresponden al concentrador teórico (y_c^o) completo. Pero como ya hemos hecho referencia es conveniente trabajar con un concentrador truncado.



El criterio que vamos a utilizar para cortar el concentrador será el siguiente:

Los rayos de inclinación $-\theta_{\max}$ respecto del eje óptico, que toquen el extremo superior de una rama parabólica lleguen al extremo inferior de la misma sin reflejarse.

Para calcular el y_c para este caso, encontramos la ecuación del rayo 1 haciendo uso de la condición que la recta 3 corta a la parábola en el mismo punto que 1. La abscisa de corte es una de las dos soluciones de la ecuación.

$$\frac{4}{d^2} (A^2 - d^2) x^2 + x \frac{2A^2}{d^2} (A+d) - \frac{4}{d^2} (A^2 - d^2)(A+2d) +$$

$$+ (A^2 - d^2) \frac{(A+2d)^2}{d^2} - \frac{A^2}{d^2} (A+d)^2 = 0$$

Llamando x_2 a esta solución, se obtiene el valor de la ordenada y_2 , luego el

corde está dado por:

$$y_c^1 = \frac{y_2}{x_2} \frac{d}{2}$$

En el caso real, estamos trabajando con un concentrador cuya altura de parábola es menor que y_2 . Luego, si llamamos (x_3, y_3) el punto extremo superior, encontramos como altura del triángulo:

$$y_c^2 = \frac{y_3}{x_3} \frac{d}{2}$$

Todos estos valores se muestran en el siguiente cuadro:

Concentrador Parámetro	Teórico	Truncado mínimo	Real	% del real res- pecto del teórico
Altura (y) (mm)	340,8	226,1	183	53,96
Abertura supe- rior (A) (mm)	103	99	94,72	91,96
Abertura infe- rior (d) (mm)	18	18	18	100
Concentración (C)	5,72	5,5	5,26	91,96
Altura del triángulo (y_c) (mm)	50,7	34,78	29,2	57,59

Tabla I

Tipos de receptores

Por lo visto anteriormente, el receptor debe poseer una superficie que se desarrolle dentro del triángulo definido con altura y_c y base d. La forma del receptor debería poseer las siguientes características:

- Reducir las reflexiones.
- Presentar mínima superficie para evitar pérdidas
- Facilitar el ensamble del conjunto concentrador - receptor.
- Reducir las pérdidas por conducción, convección y radiación.

Existen varias formas de receptor más o menos aceptables. Nosotros presentaremos algunas que hemos comenzado a analizar y probar experimentalmente.

El punto de partida es la base del triángulo, todo receptor debe comprenderla. Así es como probamos:

- Receptor de sección circular.
- Receptor con sección tipo triangular.
- Receptor tipo placa con envoltura de vidrio.

Receptor cilíndrico de sección circular.

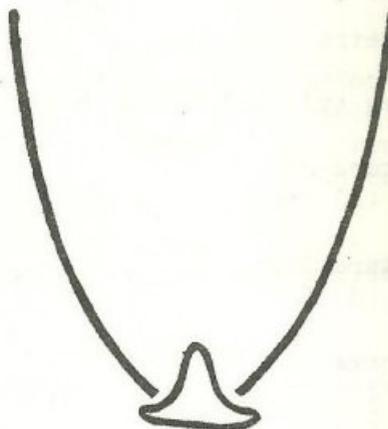
Este receptor es por su naturaleza el que aparece como inmediato por su amplia variedad, en lo que respecta a sección y tipo de material que ofrece el mercado.

Fué probado en un trabajo anterior (1) y observamos problemas para el ensamble en el conjunto concentrador - receptor. En efecto, si se ajusta el vidrio al receptor este pierde calor por conducción hacia las parábolas. Por otra parte, si dejamos un espacio pequeño entre el receptor y la parábola, entonces se pierde parte de la radiación a travez de dicho espacio.

Receptor con sección tipo triangular.

A fin de salvar el problema planteado anteriormente es que intentamos este tipo de receptor, el cual tiene la forma sugerida por el triángulo de convergencia y se utiliza su base para mejorar el montaje del sistema.

En un primer intento este receptor fué construido en chapa de bronce de 0,5 mm de espesor soldando sus bordes con estaño. Este dispositivo mostró un comportamiento satisfactorio operando por debajo de 60°C por encima de estas temperaturas se destruye a traves de alguna región de soldadura. Por lo cual fue sustituido por uno construido sobre un caño de cobre de 23 mm de diámetro deformado con una matriz construida al efecto bajo la acción de una prensa hidráulica.



Receptor tipo placa con envoltura de vidrio

Debido a las formas y características del concentrador es inmediato que las pérdidas por conducción y convección son importantes. Si queremos disminuir las deberíamos realizar vacío dentro del concentrador, lo cual sería prácticamente imposible.

Es así como hemos pensado en construir un receptor con una envoltura de vidrio, dentro de la cual es más razonable hablar de vacío. Esto trae aparejado la disminución de la radiación incidente por la reflexión y absorción de dicha cubierta.

La proposición es la siguiente:

Un receptor tipo placa ubicado en el centro de una envoltura cilíndrica de vidrio la cual tiene el máximo radio permitido por el sistema para que sus paredes estén lo más alejadas del receptor.

RECEPTORES PARA EL CONCENTRADOR TIPO WINSTON

Amílcar Fasulo, Mario Díaz, Luis Odicino y Daniel Perelló.
Universidad Nacional de San Luis - 5700 San Luis.

Resumen

Se considera la posibilidad de aumentar el rendimiento del concentrador tipo Winston (1), mediante la reducción de pérdidas en el receptor.

En primer término se intenta eliminar las pérdidas del flujo de radiación solar a través de los espacios entre el receptor y las superficies parabólicas reflectoras. Para ello se introduce un receptor de sección transversal tipo triangular, que además permite alejar su superficie caliente de las parabólicas. La reducción de las pérdidas convectivas son intentadas empleando una cubierta de vidrio para el receptor. Se estudia la localización óptima de este conjunto a través del análisis de la marcha de los rayos en el sistema.

Finalmente se busca una disminución de las pérdidas por radiación desde el receptor, tratando a este con recubrimientos selectivos.

Las diferentes propuestas son experimentadas en colectores de pequeñas dimensiones. Se presentan sus resultados.

Introducción:

En un trabajo anterior presentamos un concentrador tipo Winston (1), al cual le impusimos la condición de ser simple y económico en su operación y mantenimiento, que además trabaje con un rendimiento satisfactorio en un rango de temperaturas mayor que el de los colectores planos. Es ahora, con el fin de cumplir más cabalmente esos requerimientos, que nos hemos dedicado a mejorar el receptor del concentrador. Para ello estudiamos la zona de mayor densidad de rayos (corte de los mismos), para distintas situaciones: concentrador teórico, concentrador truncado mínimo y concentrador real (este último es el que empleamos en nuestras experiencias).

Geometría del concentrador

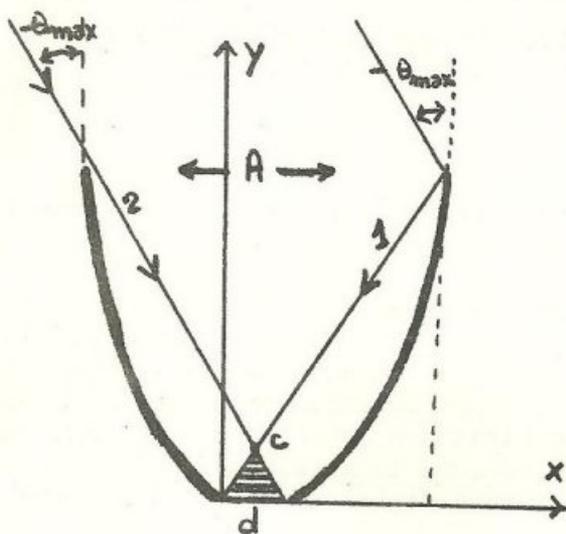
Recordando que el concentrador tipo Winston está formado por dos ramas de parábolas espejadas que cumplen la condición que rayos incidentes dentro de un determinado intervalo angular de longitud $2\theta_{max}$, se reflejan a lo sumo solo una vez.

La concentración de dicho sistema está determinada por el cociente de las aberturas A y d . Como vimos en (1) la altura está dada por una función de A y d . La ecuación de las ramas parabólicas es:

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

Si consideramos los rayos que inciden con el ángulo θ_{max} en el extremo supe-

rior de las ramas parabólicas, podemos observar una zona de corte de todos los rayos comprendidos en el intervalo $(-\theta_{\max}, \theta_{\max})$.



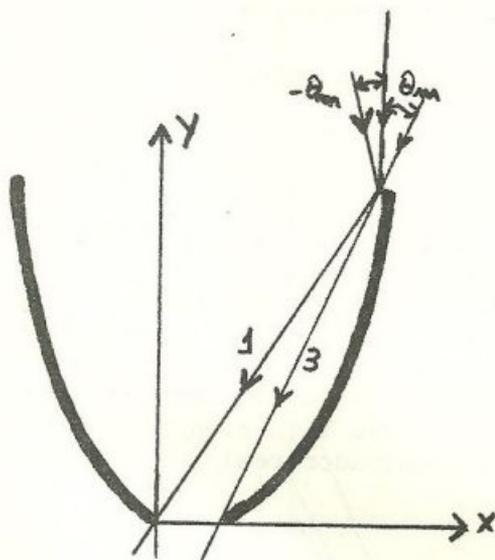
Deseamos conocer cuanto vale la altura de este triángulo sombreado y_c . Por simetría conocemos que $x_c = d/2$ y como el rayo 1 es una recta de ecuación:

$$y_1 = \frac{(A^2 - d^2)^{1/2}}{d} x_1$$

es inmediato que:

$$y_c^o = \frac{(A^2 - d^2)^{1/2}}{2}$$

Estos resultados corresponden al concentrador teórico (y_c^o) completo. Pero como ya hemos hecho referencia es conveniente trabajar con un concentrador truncado.



El criterio que vamos a utilizar para cortar el concentrador será el siguiente:

Los rayos de inclinación $-\theta_{\max}$ respecto del eje óptico, que toquen el extremo superior de una rama parabólica lleguen al extremo inferior de la misma sin reflejarse.

Para calcular el y_c para este caso, encontramos la ecuación del rayo 1 haciendo uso de la condición que la recta 3 corta a la parábola en el mismo punto que 1. La abscisa de corte es una de las dos soluciones de la ecuación.

$$\frac{4}{d^2} (A^2 - d^2) x^2 + x \frac{2A^2}{d^2} (A+d) - \frac{4}{d^2} (A^2 - d^2)(A+2d) +$$

$$+ (A^2 - d^2) \frac{(A+2d)^2}{d^2} - \frac{A^2}{d^2} (A+d)^2 = 0$$

Llamando x_2 a esta solución, se obtiene el valor de la ordenada y_2 , luego el

corde está dado por:

$$y_c^1 = \frac{y_2}{x_2} \frac{d}{2}$$

En el caso real, estamos trabajando con un concentrador cuya altura de parábola es menor que y_2 . Luego, si llamamos (x_3, y_3) el punto extremo superior, encontramos como altura del triángulo:

$$y_c^2 = \frac{y_3}{x_3} \frac{d}{2}$$

Todos estos valores se muestran en el siguiente cuadro:

Concentrador Parámetro	Teórico	Truncado mínimo	Real	% del real res- pecto del teórico
Altura (y) (mm)	340,8	226,1	183	53,96
Abertura supe- rior (A) (mm)	103	99	94,72	91,96
Abertura infe- rior (d) (mm)	18	18	18	100
Concentración (C)	5,72	5,5	5,26	91,96
Altura del triángulo (y_c) (mm)	50,7	34,78	29,2	57,59

Tabla I

Tipos de receptores

Por lo visto anteriormente, el receptor debe poseer una superficie que se desarrolle dentro del triángulo definido con altura y_c y base d. La forma del receptor debería poseer las siguientes características:

- Reducir las reflexiones.
- Presentar mínima superficie para evitar pérdidas
- Facilitar el ensamble del conjunto concentrador - receptor.
- Reducir las pérdidas por conducción, convección y radiación.

Existen varias formas de receptor más o menos aceptables. Nosotros presentaremos algunas que hemos comenzado a analizar y probar experimentalmente.

El punto de partida es la base del triángulo, todo receptor debe comprenderla. Así es como probamos:

- Receptor de sección circular.
- Receptor con sección tipo triangular.
- Receptor tipo placa con envoltura de vidrio.

Receptor cilíndrico de sección circular.

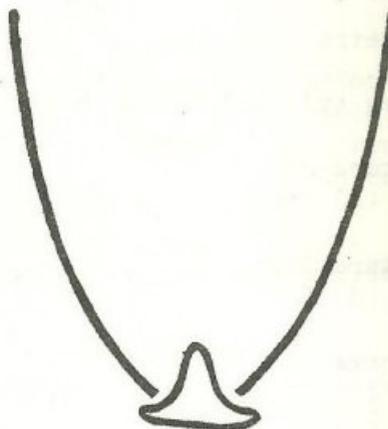
Este receptor es por su naturaleza el que aparece como inmediato por su amplia variedad, en lo que respecta a sección y tipo de material que ofrece el mercado.

Fué probado en un trabajo anterior (1) y observamos problemas para el ensamble en el conjunto concentrador - receptor. En efecto, si se ajusta el vidrio al receptor este pierde calor por conducción hacia las parábolas. Por otra parte, si dejamos un espacio pequeño entre el receptor y la parábola, entonces se pierde parte de la radiación a travez de dicho espacio.

Receptor con sección tipo triangular.

A fin de salvar el problema planteado anteriormente es que intentamos este tipo de receptor, el cual tiene la forma sugerida por el triángulo de convergencia y se utiliza su base para mejorar el montaje del sistema.

En un primer intento este receptor fué construido en chapa de bronce de 0,5 mm de espesor soldando sus bordes con estaño. Este dispositivo mostró un comportamiento satisfactorio operando por debajo de 60°C por encima de estas temperaturas se destruye a través de alguna región de soldadura. Por lo cual fue sustituido por uno construido sobre un caño de cobre de 23 mm de diámetro deformado con una matriz construida al efecto bajo la acción de una prensa hidráulica.



Receptor tipo placa con envoltura de vidrio

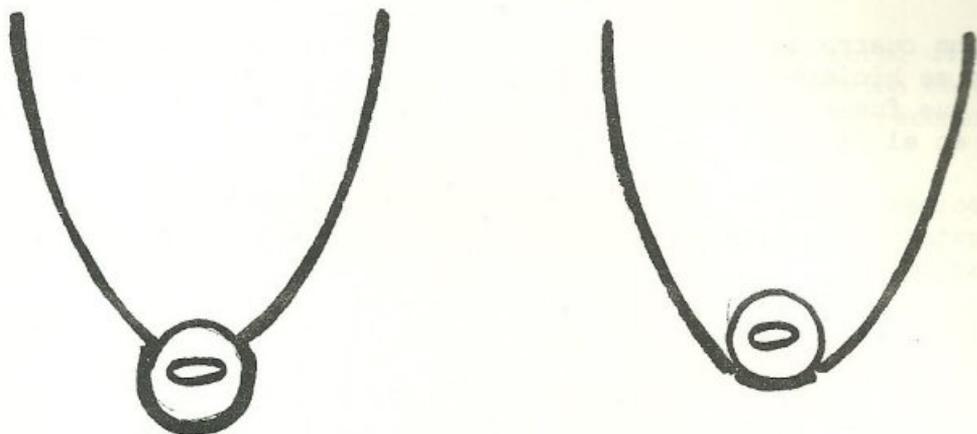
Debido a las formas y características del concentrador es inmediato que las pérdidas por conducción y convección son importantes. Si queremos disminuir las deberíamos realizar vacío dentro del concentrador, lo cual sería prácticamente imposible.

Es así como hemos pensado en construir un receptor con una envoltura de vidrio, dentro de la cual es más razonable hablar de vacío. Esto trae aparejado la disminución de la radiación incidente por la reflexión y absorción de dicha cubierta.

La proposición es la siguiente:

Un receptor tipo placa ubicado en el centro de una envoltura cilíndrica de vidrio la cual tiene el máximo radio permitido por el sistema para que sus paredes estén lo más alejadas del receptor.

Hay dos posiciones para este receptor que llamaremos: tubo arriba o tubo abajo según sea a) o b) respectivamente.



La superficie de la envoltura que queda por debajo de la línea de unión de los extremos inferiores de las parábolas son espejados.

Radio máximo de la envoltura.

La sección del cilindro es una circunferencia, la cual debe ser tangente a las ramas de las parábolas en los puntos $(0,0)$ y $(d,0)$.

Calculamos la pendiente de la parábola en el punto d y escribimos la ecuación de la recta normal, la cual se corta con la recta $x = d/2$ en el centro del círculo máximo buscado. Encontramos que las coordenadas de dicho punto son:

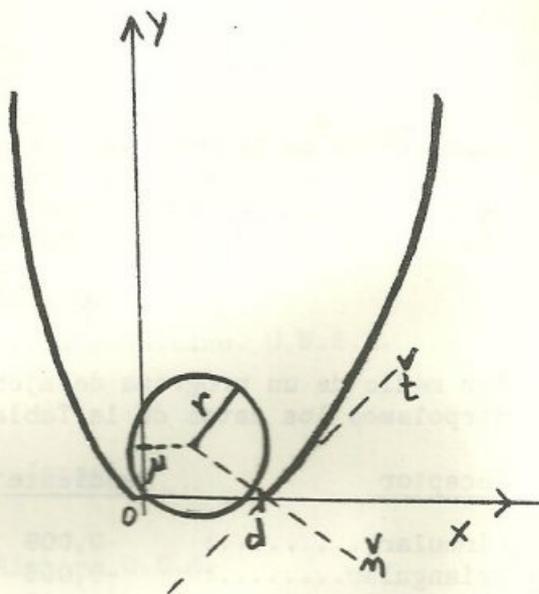
$$\left(\frac{d}{2}, \mu\right)$$

donde:

$$\mu = \frac{d}{2} \left(\frac{A+d}{A-d} \right)^{1/2}$$

y el radio:

$$r = \frac{d}{2} \left(\frac{2A}{A-d} \right)^{1/2}$$



Para el caso de nuestro concentrador resulta: $r = 14 \text{ mm}$

El receptor es construido con un caño de cobre de 12,5 mm de diámetro, el cual es prensado hasta que adquiere un ancho de 16 mm y un espesor de 7 mm.

Experiencias

Se construyeron superficies parabólicas de vidrio por termo-formado con una matriz sobre la que aplicamos placas de vidrio de 1 mm de espesor por 190 mm de ancho y 500 mm de largo y es llevado hasta una temperatura de 660°C. Luego se espejaron por el sistema de depósito de aluminio al vacío.

Se armaron cuatro cajas conteniendo dos pares de parábolas cada una. Las aislaciones se hicieron por medio de láminas de poliestireno expandido, cuidando solo que fuesen exactamente iguales para todas las cajas. Este conjunto se instaló en el dispositivo de mediciones descripto en (1).

En el proceso de armado se puso especial cuidado en la elección de material y en el montaje de los receptores circulares a los efectos de obtener su óptimo funcionamiento.

Se efectúan tres tandas de mediciones diarias, entre las 11,45 horas y las 15,30 horas, conteniendo cada una de ellas no menos de diez determinaciones en intervalos de 5 minutos cada una, de todos los valores de interés. Entre cada tanda se procede a subir la temperatura del fluido de entrada en aproximadamente 15°C cada vez. En la jornada de medidas siguiente se inician las determinaciones con el valor de temperatura de entrada similar al de la segunda tanda de la jornada anterior.

Los valores promedios de la radiación R , la temperatura ambiente \bar{t}_a , la temperatura media del fluido en el colector:

$$T = \frac{(\bar{t}_s + \bar{t}_e)}{2}$$

donde \bar{t}_s es la temperatura promedio en diez medidas de la temperatura de salida del colector y \bar{t}_e la correspondiente a la entrada, el rendimiento medio η y el valor ψ correspondiente a cuatro jornadas de experiencias para cada uno de los receptores se presentan en la Tabla II. Donde:

$$\psi = \frac{(\bar{T} - \bar{t}_a)}{\bar{R}}$$

Por medio de un programa de ajuste por el método de los cuadrados mínimos interpolamos los datos de la Tabla II a una recta, obteniéndose los valores:

<u>Receptor</u>	<u>Pendiente</u>	<u>Ord. al Origen</u>	<u>Coef. de Correlación</u>
Circular.....:	-0,009	0,7	-0,92
Triangular.....:	-0,008	0,66	-0,94
Tubo abajo.....:	-0,005	0,51	-0,92
Tubo arriba.....:	-0,003	0,47	-0,9
Circular selectivo:	-0,008	0,69	-0,98
T. arr. selectivo.:	-0,003	0,48	0,98

Los trazos correspondientes se muestran en la gráfica I.

En la tabla de valores se advertirá que las tandas intermedias muestran valores altos, esto es natural pues en ese período la radiación es coincidente con

el eje óptico del sistema, mientras que la primera y tercera está formando un cierto ángulo y una pequeña parte de la radiación es reflejada por las ramas del concentrador y no llega al receptor. Este efecto es más pronunciado en los receptores entubados.

Níquel Negro

Con el objetivo de disminuir las pérdidas por radiación se efectuó un estudio sobre depósitos electrolíticos selectivos (2) poniendo la atención en el llamado níquel negro. Este se produjo siguiendo los procedimientos recomendados por Tabor (3) y la fórmula sugerida por O'Neill (4).

Los depósitos se efectuaron sobre sustratos de cobre pulido sobre el cual se depositó una delgada capa de níquel brillante tipo Watt y sobre esta una de un espesor de orden de $0,45\mu\text{m}$ de níquel negro. Estos depósitos nos resultaron con una absorción del orden de 0,8 y una emisividad inferior a 0,2; la primera fué calculada a travez de los valores de reflectancia total entre 0,3 y 2 micras y la segunda a travez de los valores obtenidos en un termómetro de infrarrojo.

Conclusiones

El análisis de los resultados nos muestra: que no se aprecia diferencias significativas entre el rendimiento del receptor circular y el triangular, resultando en consecuencia este último más adecuado por su fácil montaje. Se comprobó que el empleo de recubrimiento selectivo aporta una mejoría en el rendimiento.

Los receptores con envoltura de vidrio se muestran ventajosos en la región de mayores temperaturas. No observamos ventajas significativas con el empleo de níquel negro en estos receptores.

Bibliografía

- (1) Un concentrador tipo Winston.
Mario Díaz, Amílcar Fasulo, Pedro Velazco y Luis Odicino. U.N.S.L.
- (2) Superficies Selectivas de Níquel Negro
Amílcar Fasulo, Rubén Becerra. U.N.S.L.
- (3) Research on Optics of Selective Surfaces
H. Tabor, Hebrew University of Jerusalem - Israel
- (4) Solar Selective Coating on Aluminium
Mark O'Neill, A Mc Donal and W. Sims
Lockheed Missiles and Space Company Inc. Alabama U.S.A.

Rec. Triangular					Rec. Circular		
R	\bar{t}_a	T	η	ψ	T	η	ψ
1,29	9,8	24,4	0,55	11,3	24,3	0,55	11,2
1,37	11,5	40,3	0,51	21	40,2	0,55	20,9
1,2	13,4	57,6	0,38	36,8	57,6	0,43	36,8
1,32	16,5	41,8	0,51	19,1	41,5	0,5	18,9
1,4	18,6	59,1	0,41	28,9	59,4	0,41	29,1
1,06	18	----	----	----	75,4	0,19	54,2
1,27	17,8	54,5	0,42	28,9	54,4	0,43	28,8
1,29	19,8	71,5	0,31	40,1	71,5	0,33	40,1
1	19,6	----	----	----	85,2	0,11	65,6

R. C. Níquel Negro							
1,25	9,1	53,6	0,4	35,6	53,6	0,4	35,6
1,38	11,2	74,6	0,31	45,9	74,1	0,27	45,5
1,23	12,3	85,9	0,2	59,8	85,5	0,07	59,5

Rec. Tubo Abajo					Rec. Tubo Arriba		
R	\bar{t}_a	T	η	ψ	T	η	ψ
1,29	9,8	23,9	0,46	10,9	23,9	0,42	10,9
1,37	11,5	39,9	0,47	20,7	39,8	0,47	20,6
1,2	13,4	57,4	0,33	36,7	57,3	0,38	36,6
1,32	16,5	41,3	0,4	18,8	41	0,37	18,6
1,4	18,6	58,6	0,33	28,6	58,4	0,31	28,4
1,06	18	75,2	0,24	54	75,4	0,34	54,2
1,27	17,8	54,1	0,35	28,6	54,2	0,4	28,6
1,29	19,8	71,5	0,33	40,1	71,5	0,3	40,1
1	19,6	85,3	0,19	65,7	85,7	0,22	66,1

R. T. Arr. Niq. Negro							
1,25	9,1	53,8	0,32	35,8	53,3	0,34	35,4
1,38	11,2	75,1	0,3	46,3	74,55	0,31	45,9
1,23	12,3	86,4	0,23	60,2	85,8	0,27	59,8

TABLA II

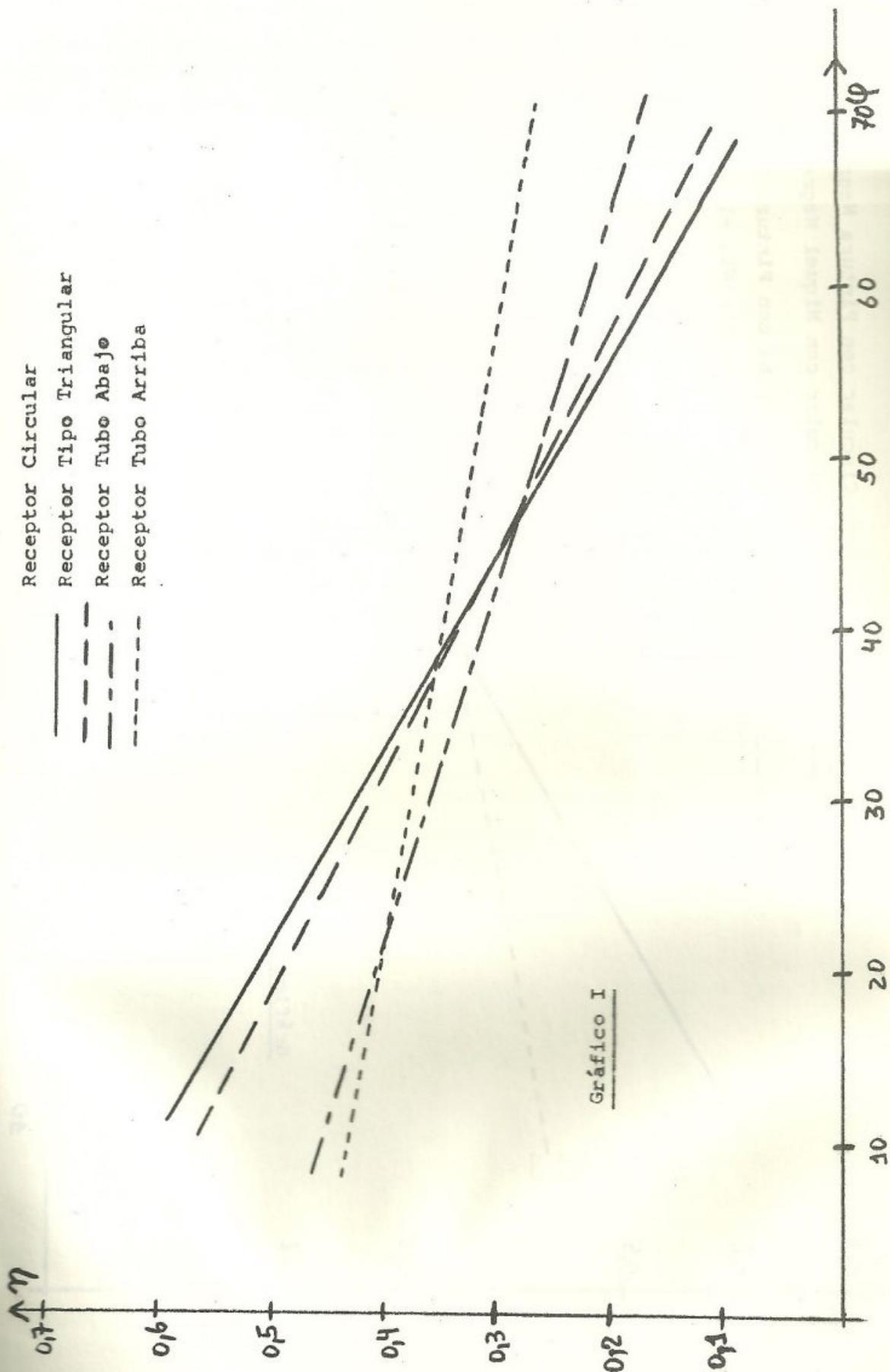


Gráfico I

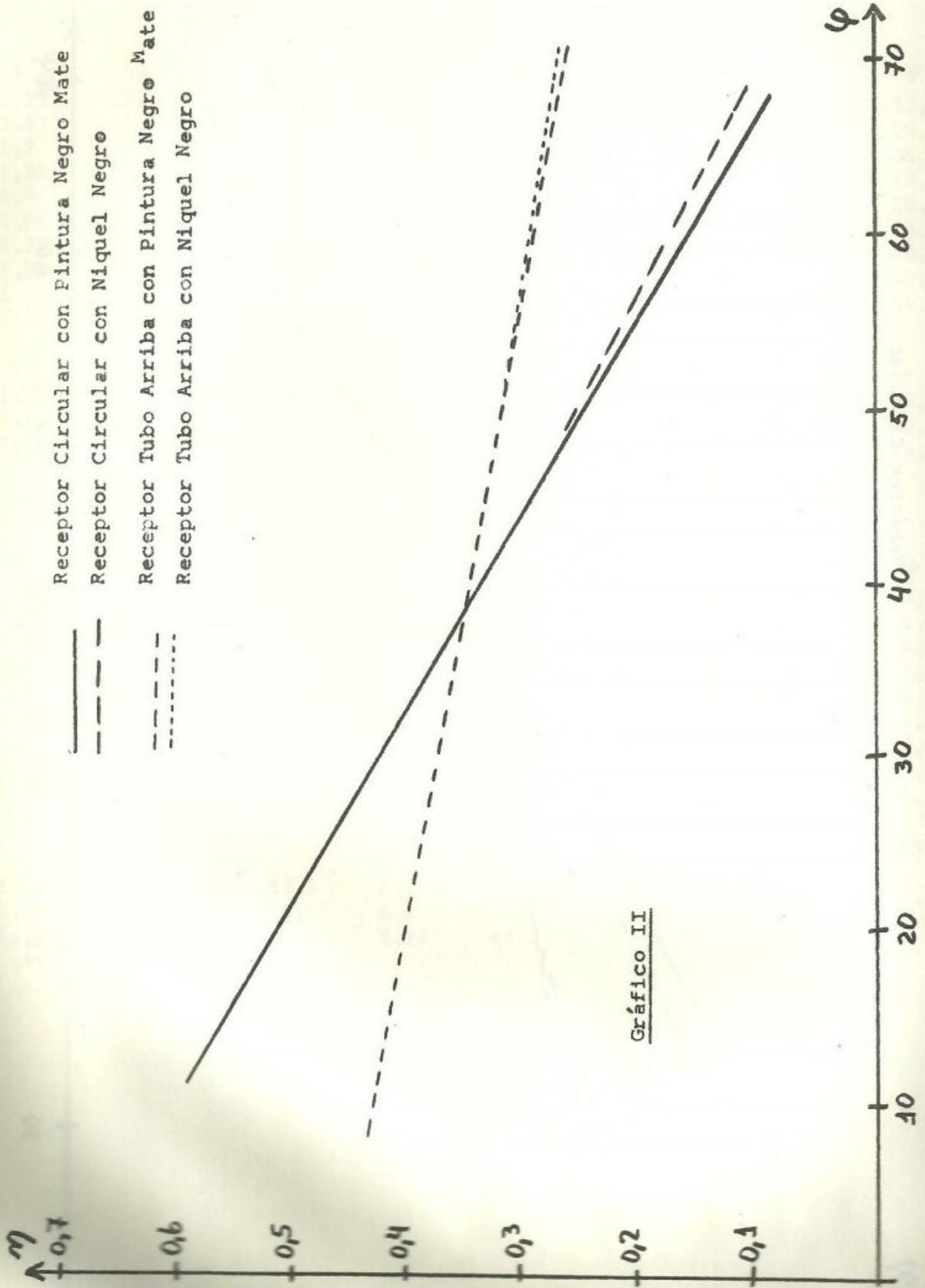


Gráfico II