

CAPACIDAD DE CONCENTRACION DE UNA PLACA ELASTICA REFLECTORA +

Medina, F.M.*, Pracchia J.A.**, Simón J.M.*** y Fabris A.R.****

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

Ciudad Universitaria - Nuñez - Buenos Aires

Depto. de Energía No-Convencional

Div. Energía Solar

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

Av. Mitre 3100 - 1663 - San Miguel

Buenos Aires - Argentina

RESUMEN

En este trabajo se describe el estudio realizado sobre el comportamiento óptico de una superficie reflectora deformable que actúa como un concentrador solar de simetría cilíndrica. La superficie considerada es una chapa de aluminio pulida, de 0,8 mm de espesor, una apertura de aproximadamente 1 metro y una distancia focal de 1.5 m.

Se ha obtenido la expresión matemática de la curva que adopta esta chapa bajo la acción de determinadas fuerzas y momentos aplicados, permitiendo efectuar una evaluación teórica de su comportamiento mediante la técnica de trazado de rayos.

Se describe el prototipo construido.

Se muestran resultados experimentales y se los compara con los obtenidos del modelo teórico.

INTRODUCCION

La propiedad de poder modificar la forma de una superficie reflectora nos llevó a considerar la posibilidad de desarrollar un concentrador solar cuyo foco permaneciese fijo independientemente del movimiento relativo del sol, lo cual presenta la ventaja de no tener que mover el dispositivo receptor.

Lo que se quiere lograr es que la superficie considerada pueda variarse de manera tal de adoptar la forma de porciones de parábolas, cuyos ejes son paralelos a la dirección de inciden-

cia, y que van cambiando con el movimiento del sol. Con éste fin se ha considerado la utilización de una placa plana reflectora como superficie, lo que ha llevado a realizar un estudio sobre las deformaciones producidas bajo la acción combinada de fuerzas y momentos aplicados en sus bordes. Esto permitió encontrar la expresión analítica de la curva resultante, lo que a su vez permite realizar un trazado de rayos con el fin de analizar su comportamiento óptico. Aquí se ha considerado el tamaño finito del sol y la dispersión en la superficie reflectora.

Las condiciones de contorno impuestas a la ecuación analítica de la curva corresponden a las calculadas teóricamente para las distintas parábolas (distintas distancias focales e inclinaciones), que focalizan la radiación en un mismo punto del espacio, teniendo en común un extremo mientras que el otro puede ser desplazado. En éste estudio se ha considerado un concentrador que posee una distancia focal de 1.5 m para incidencia normal. El extremo en común a todas las parábolas está ubicado 1.5 m debajo del foco, mientras que el otro se desplaza sobre una circunferencia centrado en un punto muy cercano al primero. Esta propiedad y la simple dependencia que presentan los valores de los ángulos en los bordes de la placa con la posición angular del radio vector de dicha circunferencia, determina una notable sim-

CAPACIDAD DE CONCENTRACION DE UNA PLACA ELASTICA REFLECTORA +

Medina, F.M.*, Pracchia J.A.**, Simón J.M.*** y Fabris A.R.****

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

Ciudad Universitaria - Nuñez - Buenos Aires

Depto. de Energía No-Convencional

Div. Energía Solar

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

Av. Mitre 3100 - 1663 - San Miguel

Buenos Aires - Argentina

RESUMEN

En este trabajo se describe el estudio realizado sobre el comportamiento óptico de una superficie reflectora deformable que actúa como un concentrador solar de simetría cilíndrica. La superficie considerada es una chapa de aluminio pulida, de 0,8 mm de espesor, una apertura de aproximadamente 1 metro y una distancia focal de 1.5 m.

Se ha obtenido la expresión matemática de la curva que adopta esta chapa bajo la acción de determinadas fuerzas y momentos aplicados, permitiendo efectuar una evaluación teórica de su comportamiento mediante la técnica de trazado de rayos.

Se describe el prototipo construido.

Se muestran resultados experimentales y se los compara con los obtenidos del modelo teórico.

INTRODUCCION

La propiedad de poder modificar la forma de una superficie reflectora nos llevó a considerar la posibilidad de desarrollar un concentrador solar cuyo foco permaneciese fijo independientemente del movimiento relativo del sol, lo cual presenta la ventaja de no tener que mover el dispositivo receptor.

Lo que se quiere lograr es que la superficie considerada pueda variarse de manera tal de adoptar la forma de porciones de parábolas, cuyos ejes son paralelos a la dirección de inciden-

cia, y que van cambiando con el movimiento del sol. Con éste fin se ha considerado la utilización de una placa plana reflectora como superficie, lo que ha llevado a realizar un estudio sobre las deformaciones producidas bajo la acción combinada de fuerzas y momentos aplicados en sus bordes. Esto permitió encontrar la expresión analítica de la curva resultante, lo que a su vez permite realizar un trazado de rayos con el fin de analizar su comportamiento óptico. Aquí se ha considerado el tamaño finito del sol y la dispersión en la superficie reflectora.

Las condiciones de contorno impuestas a la ecuación analítica de la curva corresponden a las calculadas teóricamente para las distintas parábolas (distintas distancias focales e inclinaciones), que focalizan la radiación en un mismo punto del espacio, teniendo en común un extremo mientras que el otro puede ser desplazado. En éste estudio se ha considerado un concentrador que posee una distancia focal de 1.5 m para incidencia normal. El extremo en común a todas las parábolas está ubicado 1.5 m debajo del foco, mientras que el otro se desplaza sobre una circunferencia centrado en un punto muy cercano al primero. Esta propiedad y la simple dependencia que presentan los valores de los ángulos en los bordes de la placa con la posición angular del radio vector de dicha circunferencia, determina una notable sim-

plificación en el diseño y posterior construcción de un dispositivo de éstas características.

Un modelo prototipo ha sido construido en el taller mecánico del Centro Espacial San Miguel (CNIE), utilizando como superficie reflectora una chapa de aluminio con una de sus superficies pulida. El espesor de la misma es de 0.8 mm y su ancho 1002 m. La dirección del laminado de fabricación es perpendicular al eje axial del concentrador, lo que permite pensar en gran medida la dispersión producida por las irregularidades que deja este proceso en la placa.

Mediante un programa computacional se calcularon las eficiencias teóricas y experimentales en función del ancho del receptor, los mismos fueron graficados y el análisis de éstos resultados determina las bondades del dispositivo.

Forma de la Placa

La magnitud de la fuerza y momentos aplicados en los bordes de la placa y las características del material hacen que pueda trabajarse en la aproximación lineal (Ley de Hooke).

La ecuación de la ecuación diferencial que describe la situación planteada es: (Ref. 1)

$$\frac{d^4 z}{dx^4} - \frac{F}{D} \frac{d^2 z}{dx^2} - \frac{P}{D} = 0 \quad (1)$$

siendo:

$z = z(x)$ ecuación de la curva

F: fuerza por unidad de longitud aplicada en los extremos, $(F) = \text{Nm}^{-1}$

D: rigidez a la flexión $\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, $(D) = \text{Nm}$

E: módulo de Young, $(E) = \text{Nm}^{-2}$

ν : coeficiente de Poisson, (sin unidades)

h: espesor de la placa $(h) = \text{m}$

P: densidad superficial de peso $(P) = \text{Nm}^{-2}$

En éste caso la fuerza F es de tracción, resultando la solución:

$$z(x) = \frac{1}{k^2} \left[A \cosh(kx) + \sinh(kx) \right] + \frac{Px^2}{2F} + Cx + E \quad (2)$$

$$k = \sqrt{\frac{F}{D}}$$

A, B, C, E y F ctes. a determinar

De las cuatro condiciones de contorno a establecer dos se refieren a las posiciones de los bordes:

$$z(x_1) = z_1 \quad z(x_2) = z_2$$

los dos restantes provienen de la condición mecánica a la que están sometidos dichos bordes:

$$\left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=x_1} = \alpha \quad \left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=x_2} = \beta$$

En la expresión de $z(x)$ aparece F , cuyo valor se desconoce previamente. Para hallarlo se fija el ancho de la placa en un valor L_0 y se varía el valor de F hasta que satisfaga la siguiente igualdad

$$\int_{(x_1, z_1)}^{(x_2, z_2)} ds = L_0, \text{ ds: diferencial de arco}$$

Cálculo de las condiciones de contorno

Se quiere lograr determinar las expresiones matemáticas de las distintas parábolas, que teniendo un mismo punto común, permitan focalizar la radiación paralela a sus ejes en un mismo punto fijo del espacio. Para ello se considera el sistema de referencia mostrado en la Figura 1.

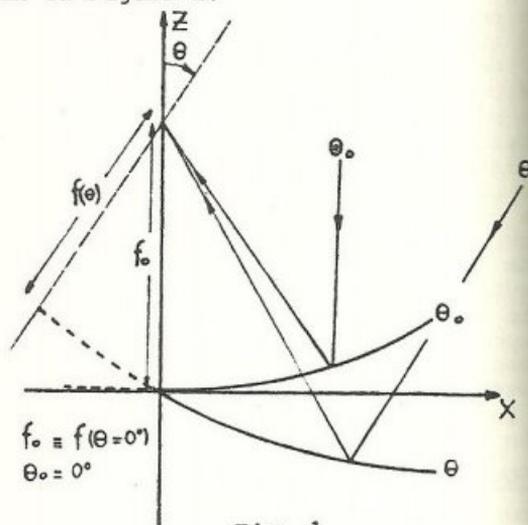


Fig. 1

En la figura se observa que el punto común a las diferentes curvas es el origen de coordenadas. A medida que aumenta en ángulo de incidencia, la curva se va desplazando hacia abajo, a la vez que se forma se va modificando y por consiguiente cambia su distancia focal. Esta está dada por:

$$f(\theta) = \frac{f_0}{2}(1 + \cos \theta) \quad (3)$$

Considerando que la longitud de la curva que representa la superficie reflectora es constante e igual a L_0 es posible determinar la posición del otro borde. Por conveniencia se efectúa la transformación de coordenadas mostrada en la Figura 2

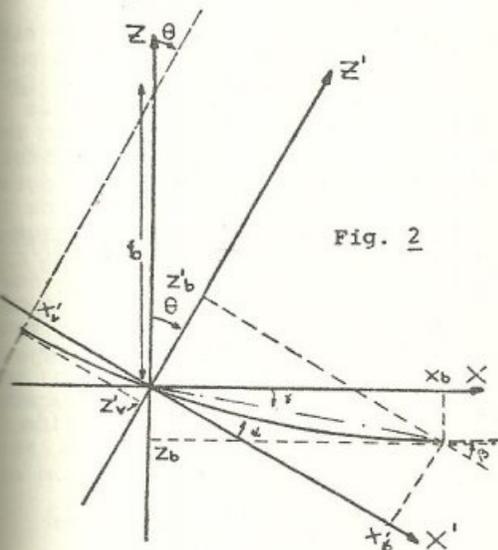


Fig. 2

En el sistema rotado (x', z') la expresión de la nueva parábola es la siguiente:

$$z' = \frac{(x' + f_0 \sin \theta)^2}{2 f_0 (1 + \cos \theta)} + \frac{f_0 (\cos \theta - 1)}{2} \quad (4)$$

El punto x'_b se determina calculando el cero de la función

$$\psi(x'_b) = L_0 - \int_0^{x'_b} \sqrt{1 + \left[\frac{x' + f_0 \sin \theta}{f_0 (1 + \cos \theta)} \right]^2} dx' \quad (5)$$

La coordenada z'_b resulta de reemplazar x por x'_b en la ecuación (4). Las inclinaciones en los bordes resultan:

$$\alpha' = \arctg \left[\frac{dz'}{dx'} \Big|_{x' = 0} \right]$$

$$\beta' = \arctg \left[\frac{dz'}{dx'} \Big|_{x' = x'_b} \right]$$

Haciendo nuevamente una transformación de coordenadas resulta:

$$x_b = x'_b \cos \theta + z'_b \sin \theta$$

$$z_b = -x'_b \sin \theta + z'_b \cos \theta$$

$$\alpha = \alpha' - \theta \quad (6)$$

$$\beta = \beta' - \theta$$

Se han hecho los cálculos para:

$$f_0 = 1.5 \text{ m}$$

$$L_0 = 1.002 \text{ m}$$

obteniéndose para $\theta = 0^\circ, 30^\circ$, y 60° los valores mostrados en la Tabla 1

θ	γ	X_b	Z_b	α	β
0°	9.4°	.9846	.1616	0°	18.17°
30°	-6.226°	.9921	-.1156	-15°	$.776^\circ$
60°	-22.703°	.9207	-.39	-30°	-17.014°

Tabla 1

Haciendo el correspondiente cálculo es posible observar que el punto (x_b, z_b) se desplaza sobre una circunferencia con centro en $(0, -.004 \text{ m})$ y cuyo radio es de aproximadamente .9983 m. Se aclara que para estos resultados fueron considerados mas ángulos de incidencia. El ángulo γ es el que forma el radio-vector con la horizontal y que cambia con el ángulo de incidencia de la radiación.

En la Figura 5 se muestra γ, α y β en función de θ

La dependencia de estos 3 ángulos con θ es aproximadamente lineal, lo cual pre-

senta enormes ventajas desde el punto de vista constructivo.

La correspondencia entre lo calculado precedentemente y lo necesario para obtener la expresión de la curva es:

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= 1.002 \text{ m} \\ x_1 &= 0 \\ z_1 &= 0 \\ x_2 &= x_b \\ z_2 &= z_b \\ \alpha &= \alpha \\ \beta &= \beta \end{aligned} \right\} \text{Independiente de } \theta$$

Experimentos realizados

Un dispositivo con las características descritas anteriormente fué construido en San Miguel.

La estructura del soporte de la chapa fué realizada en caño hueco rectangular de hierro de 6 x 4 mm de lado por 2 mm de espesor. Lo mismo para el soporte del plano focal.

El esquema del aparato es el mostrado en la Figura 3

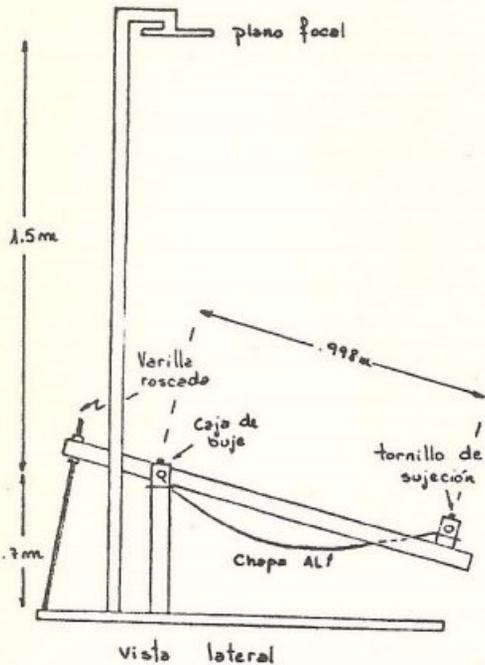
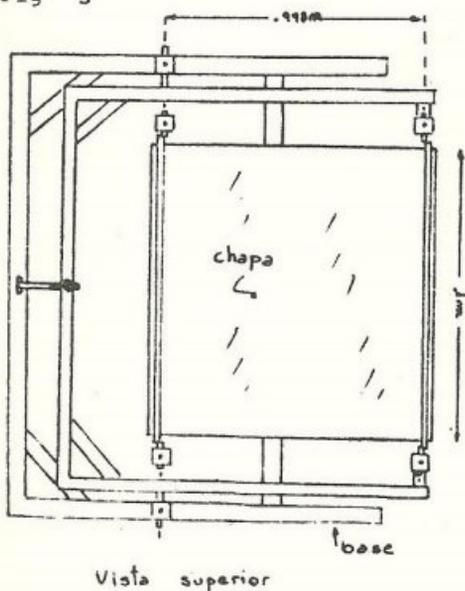


Fig 5



La chapa utilizada fué de aluminio pulido de 8 mm de espesor y su longitud entre los ejes de giro es de 1.002 m. Como se observa en la vista lateral del esquema la posición del borde móvil se ajusta mediante una varilla roscada, mientras que las inclinaciones en ambos bordes se ajustan mediante tornillos de sujeción ubicados en cada una de las cajas de bujes.

Dado las relaciones relativamente simples que existen entre estas tres posiciones angulares y en ángulo de incidencia de la radiación es posible considerar la utilización de algún elemento mecánico (sistema de cadenas, etc.) para interrelacionarlas y lograr un seguimiento con un solo grado de libertad. En la experiencia estos ajustes fueron realizados manualmente. Uno de los mayores inconvenientes que se presentó en la construcción fué la forma en como iba a ser soportada la chapa en sus extremos, yá que el eje

de giro tiene que coincidir con el empotramiento de la misma. La solución adoptada se muestra en la Figura 4

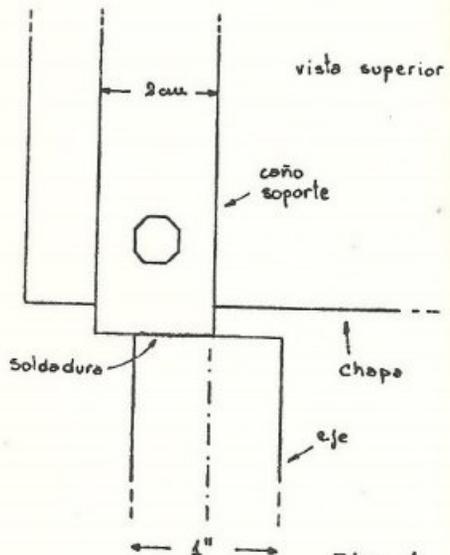
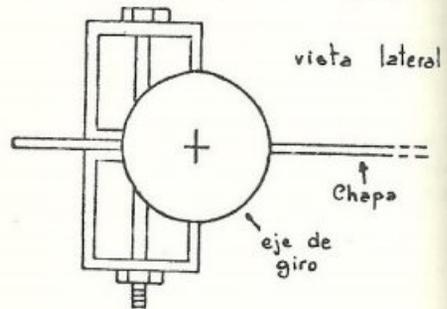


Fig. 4

La chapa de Al está prensada entre 2 caños cuadrados de 2 cm de largo y 2 mm de espesor. En cada extremo se ha soldado un caño de 1 pulgada de diámetro, haciendo coincidir el centro de giro con el lugar donde la chapa deja de tener contacto con los 2 caños de sujeción. Cada eje gira dentro de una caja de hierro que contiene un buje de bronce anti-fricción y su fijación se logra mediante un tornillo pasante. Se considera que esta forma de permitir el giro en los bordes de la chapa no es la más adecuada pues la alineación de los ejes es difícil de lograr.

Una alternativa a considerar sería hacer girar sobre apoyos adecuados, ejes cuyos extremos fuesen en punta, permitiendo de esta manera una gran libertad de movimiento.

La intensidad relativa en el plano focal fué medida mediante un fotómetro digital J16 TEKTRONIX con cabezal J 6502, este presenta una sensibilidad bastante uniforme en el rango visible. El cabezal fué encapsulado dentro de un tubo de telgopor forrado exteriormente. Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 8.

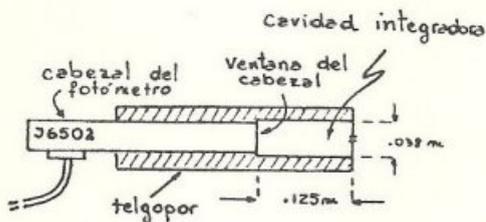


Fig. 8

Entre el orificio de entrada y la ventana del cabezal se dejó formada una cavidad, cuyas paredes fueron forradas con cartulina negra en la parte exterior y papel blanco mate en el interior tratándose de lograr que esta cavidad se comportase como un integrador. Esto se logró bastante bien lográndose que la detección fuese bastante insensible a la dirección de incidencia del haz, salvo la relación coseno. El orificio de entrada tenía un diámetro de aproximadamente 1 mm, lo cual permitía hacer mediciones cada 3 mm en el plano focal. El cabezal era desplazado utilizando un carro por herramientas de un torno y el barrido en cada serie de mediciones era sobre aproximadamente 10 cm.

En cada serie el concentrador era ubi-

cado perpendicularmente a la dirección de la radiación, ajustándose a la vez las condiciones de los bordes a los calculados teóricamente. Debido a la época durante la cual se efectuaron las mediciones los ángulos de incidencia están comprendidos entre 45° y 66° . El ajuste de los bordes fué hecho en forma manual tratando de lograr la menor dispersión alrededor de la línea focal focalizando primero la radiación que incidía cercana a un borde y luego la que incidía cercana al otro. Con el fin de evitar diferencias producidas por la variación en la dirección de incidencia las mediciones se trataban de efectuar lo más rápido posible y mientras las condiciones atmosféricas no variasen de una manera perceptible.

Con el fin de evaluar la variación de la reflectividad en la superficie reflectora se midió mediante el fotómetro la intensidad reflejada por la chapa, haciendo incidir luz de laser de 1 mW de potencia. La disposición realizada se muestra en la Figura 9.

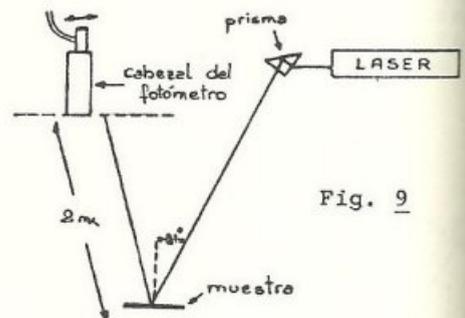


Fig. 9

El haz incidía sobre la muestra con un ángulo de 21° y el detector podía desplazarse sobre una línea en la cual se medía la intensidad relativa.

Las muestras sobre las cuales se midió la dispersión fueron:

- * Aluminio depositado sobre vidrio
- * Mylar aluminizado
- * Chapa de aluminio

RESULTADOS:

Los datos experimentales fueron procesados obteniéndose la figura de la mancha focal. También se calcularon la eficiencia y concentración en función del ancho de intervalo sobre el foco centrado en la línea focal ideal. Las ecuaciones utilizadas son las ecuaciones (8) teniendo en cuenta la discretización de los datos. Con el fin de comparar los resultados experimentales con los teóricos se efectuó un trazado de rayos utilizando

En la expresión analítica de "la elástica", calculándose a partir de éste la concentración y eficiencia en función del intervalo en el plano focal. Los cálculos teóricos fueron efectuados para los mismos ángulos de incidencia de 45°, 53°, y 66° encontrándose poca diferencia con los valores de estos 3 pares de resultados experimentales.

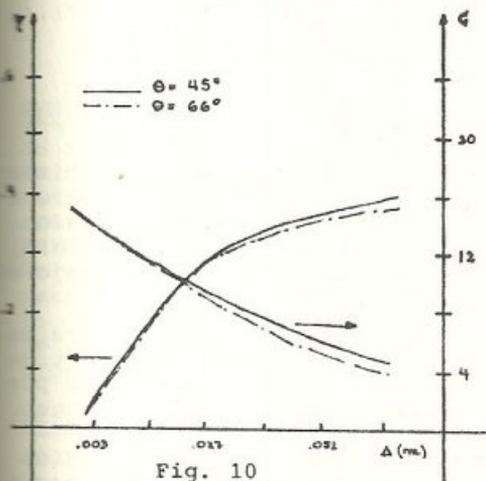


Fig. 10

En la Figura 11 se muestran los resultados experimentales y se grafican además los teóricos para un ángulo de incidencia de 45°.

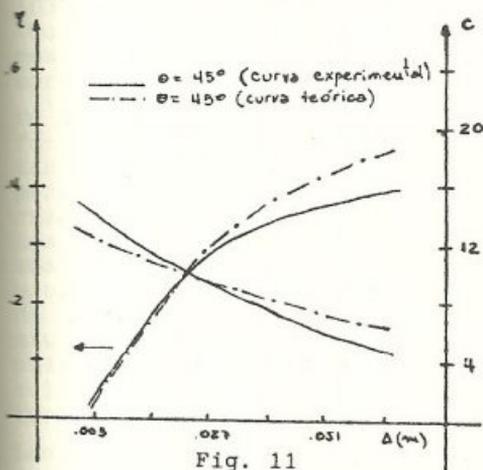


Fig. 11

Con el objeto de poder comparar se adoptó el criterio de redondear los valores teóricos de las coordenadas al Δ y los ángulos a 5°, considerando que los errores constructivos y/o de seguimiento son aproximadamente de estas magnitudes.

En la Figura 11 se observa una correspondencia bastante aceptable, lo cual induce a considerar al modelo teórico como adecuado para describir al sistema real.

En la Figura 12 se muestran las dispersiones para las tres superficies consideradas.

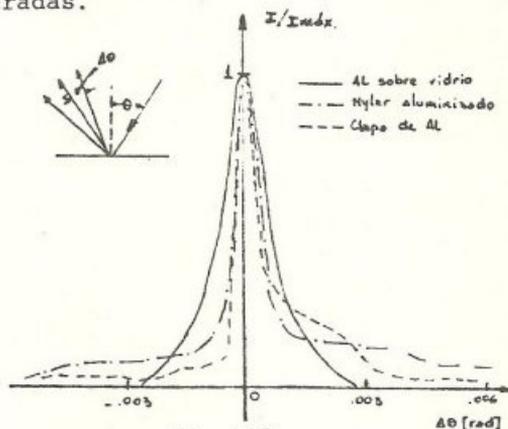


Fig. 12

Aquí las intensidades relativas fueron normalizadas al valor máximo en cada uno de los casos, encontrándose que el vidrio aluminizado presenta cierta ventaja respecto de los otros dos en concordancia con los resultados mostrados en la referencia 2.

CONCLUSIONES

Los gráficos que resumen los resultados teóricos y experimentales muestran una notable aproximación entre ambos, lo que nos permite inferir que el modelo desarrollado para el concentrador responde con bastante aproximación a la situación experimental planteada.

Los valores obtenidos y la eficiencia han demostrado ser poco sensibles al ángulo de incidencia de la radiación. En caso de utilizar una superficie reflectora ideal (coef. de reflexión 100% y reflexión especular), el total de la energía se concentraría en una faja de 100 cm. de ancho, con los que se obtendría una concentración geométrica de 10. Al incluir en el modelo las propiedades ópticas de la superficie reflectante y en el caso de un espejo metálico con propiedades ópticas iguales a las de uno de vidrio (limpio), se obtendría con una mancha focal de 8 cm. de ancho una eficiencia del 46% a una concentración media de 10. Con las propiedades del aluminio utilizado en esta experiencia y para una mancha de 8 cm la eficiencia sería del 38% con una concentración de 6.

Se puede observar entonces que las pro

propiedades de concentración son fuertemente dependientes de la calidad óptica de la superficie empleada.

El concentrador con chapa de Al, si bien no muy apropiado desde el punto de vista de sus propiedades ópticas nos permitió evaluar experimentalmente las posibilidades de este tipo de concentradores.

Los resultados obtenidos nos indican la gran importancia que tienen las propiedades ópticas del material utilizado en la chapa reflectora como también la preservación de las mismas en el tiempo (adecuada protección o limpieza del espejo).

Los materiales que visualizamos como más adecuados para estos concentradores podrían ser espejos de vidrio de muy pequeño espesor y flexibles (Ref. 3) o materiales metálicos que resistan la abrasión del polvo ambiente y/o los dispositivos de limpieza. La chapa de Al utilizada fue acomodada con la dirección de laminación perpendicular al eje del concentrador, permitiendo que la dispersión de mayor magnitud, la cual es producida por la superficie en esta dirección, no ensanchara la mancha focal. En las experiencias realizadas la incidencia fue siempre normal a este eje. El efecto que produce la incidencia oblicua de la radiación no ha sido todavía estimado.

El tipo de concentrador ensayado tiene a nuestro entender una ventaja muy importante frente a otros y consiste en que su foco es fijo, simplificando enormemente el diseño mecánico y reduciendo paralelamente los costos. La cinemática del seguimiento es relativamente simple y para lograr las concentraciones hasta las que el equipo es útil las precisiones requeridas no parecen ser un factor limitante.

Con respecto a este último punto, existen dos criterios para fijar los valores de las posiciones y pendientes del borde de la lámina elástica con el fin de lograr una mejor focalización. En uno los valores mencionados se ajustan de acuerdo al criterio utilizado en este trabajo, que consiste en tomar los que tiene la parábola teórica (rotada). El segundo consiste en realinear el ajuste de los mismos de tal forma de lograr la menor desviación cuadrática media respecto a la curva teórica. Este último produciría resultados levemente distintos a los obtenidos a través del primero. Este punto particular queda abierto para futuras discusiones del problema.

REFERENCIAS

- (1): Medina J.M., "Análisis óptico de una placa elástica y su evaluación como concentrador solar". Tesis de Licenciatura, F.C.E. y N (UBA) 1981.
- (2): Pettit R.B. "Characterization of the Reflected Beam Profile of Solar Mirror Materials". Solar Energy, Vol 19, pp.733, (1977).
- (3): Comunicación personal.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Sr. Vogel y por su intermedio a todo el personal del Taller mecánico del Centro Espacial San Miguel (CNIE) por el aporte de ideas y su trabajo en la construcción del prototipo.

Agradecemos especialmente a la Sra. de Alurralde por el tipeado de este trabajo y la Sra. M. Susana Chiabrera por su gran ayuda durante las mediciones.

+ Trabajo financiado por la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (Fuerza Aérea Argentina)

- * Personal contratado por CNIE
- ** Investigador de CNIE
- *** Investigador de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)
- **** Investigador de CNIE - CONICET.