

CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO DE LA CNEA

PROGRESOS EN EL PERIODO 1/7/1978 - 30/6/1979[†]

J.C. Durán, J.A. Moragues^{††}, J.J. Nicolás,
R.O. Nicolás, R.P. Platzek*, W. Scheuer y J. Di Santo

Comisión Nacional de Energía Atómica
Avda. del Libertador 8250 - (1429) Buenos Aires

y

A. Rapallini**

Resumen

Se continuó con el montaje de uno de los módulos del Concentrador Fijo a Espejo Facetado ajustando la posición angular de los elementos especulares mediante el uso de un laser de He-Ne; asimismo, se construyó el segundo módulo. Se realizaron mediciones de la distribución del flujo de energía en el plano receptor comparando los resultados con valores calculados teóricamente.

Se estudió la evolución temporal de espejos de diferentes espesores pegados sobre soportes de Al con diversos adhesivos a fin de seleccionar el conjunto que presenta menor deformación final.

Se realizaron la construcción y el montaje del sistema de movimiento del receptor, del receptor de la radiación concentrada y del circuito primario de extracción de la energía térmica que incluye un intercambiador de calor. Como fluido primario se emplea Therminol 66.

CNEA FACETED FIXED MIRROR SOLAR CONCENTRATOR

PROGRESSES IN PERIOD 1/7/1978 - 30/6/1979

Abstract

The assembly of one of the Faceted Fixed Mirror Solar Concentrator prototypes was continued adjusting the angular position of the slats using a He-Ne laser, and a second prototype was built. The energy flux distribution in the receiver plane was measured and the results were compared with theoretical curves.

The temporal behaviour of mirrors of different thicknesses glued onto Al pipes with several adhesives was studied in order to select the set presenting the smallest final deformation.

The tracking system, the concentrated radiation receiver and the thermal energy extraction circuit, which includes a heat exchanger, were built and assembled. Therminol 66 is used as heat transfer fluid.

†) Trabajo parcialmente financiado con subsidio del Programa Nacional de Energía no Convencional de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

††) Miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

*) Comisión Nacional de Energía Atómica e INVAP Sociedad del Estado.

***) Asesor en problemas termomecánicos.

1. Introducción

El concentrador fijo a espejo facetado (CFEF) desarrollado en la CNEA fue presentado y descrito durante la 3ra. Reunión de Trabajo de la ASADES [1]. En la 4ta. Reunión de Trabajo de la ASADES se comunicaron los avances efectuados en el análisis teórico del concentrador y en su construcción, hasta el 30/6/1978, los que fueron publicados en detalle en la Ref. [2].

En esencia, el CFEF está constituido por un conjunto de espejos planos, angostos y largos, dispuestos de manera que sus ejes longitudinales de simetría estén sobre un cilindro directriz imaginario (Fig. 1). Sólo el plano de uno de ellos es tangente a dicho cilindro, mientras que el resto forman ángulos prefijados respecto de aquél. El conjunto tiene la propiedad de que, cualquiera sea la dirección de un haz paralelo incidente, la radiación se concentra en una zona lineal nítida ubicada en todo momento sobre el mismo cilindro directriz. Por lo tanto, el concentrador puede permanecer fijo si el receptor de la radiación concentrada efectúa un movimiento de rotación alrededor del eje de simetría del cilindro imaginario, en concordancia con el desplazamiento aparente del Sol.

Se construyeron dos módulos con radio de 1 m y longitud de 2,4 m cada uno (formados por dos secciones de 1,2 m cada una). Cada módulo tendrá un total de 220 espejos de 2 cm de ancho, siendo el espesor de los vidrios distinto para cada módulo. El ángulo de abertura máximo es de 145° y el plano de abertura puede ser inclinado hasta un ángulo máximo de 60° respecto de la horizontal. En la Fig. 2 se muestra a uno de los módulos en proceso de montaje, orientado en la dirección N-S e inclinado a 55° .

2. Alabeo del conjunto espejo-soporte

A fin de que el ancho de la distribución del flujo de energía en el plano receptor del CFEF no sea afectado significativamente por el alabeo de las superficies especulares que constituyen el concentrador, su magnitud debe ser mantenida en valores promedios tan bajos como ~5 miliradianes. Definimos aquí como alabeo del conjunto espejo-soporte al ángulo máximo formado por dos secciones transversales cualesquiera de la superficie especular correspondiente. Se lo midió utilizando un equipo laser de He-Ne montado sobre un banco óptico apropiado. El haz emitido se hacía reflejar en el espejo en estudio mientras se lo desplazaba paralelamente deslizando al equipo sobre el banco y se observaban las deflexiones máximas del rayo reflejado sobre una pantalla milimetrada adosada a la cara frontal del equipo laser.

A lo largo de seis meses, se estudió la evolución temporal del alabeo de espejos construidos con vidrio de 2 y 3 mm de espesor, formado por estiramiento, y de 1 y 4 mm de espesor, formado por flotamiento. En todos los casos, los espejos eran pegados sobre tubos de Al de sección cuadrada de 15 mm de lado y 1,25 mm de espesor. Como adhesivos se utilizaron la misma pintura (importada) que emplea el fabricante † de los espejos para proteger su cara posterior, y

† Electroespejos Emsa S.A.; Ruta 8, km 45,2; Del Viso, Prov. de Buenos Aires.

las cintas adhesivas de doble faz marca 3M, modelos 4032 y 4262. Los resultados se muestran en la Fig. 3, correspondiendo cada curva a un conjunto de seis espejos. Para los espejos de 1 mm de espesor sólo se muestra el caso de los pegados con pintura, ya que en los demás los valores resultantes superan la escala del dibujo. Se observa que:

- (a) el conjunto de los espejos pegados con cinta 4262 presenta alabeos que en todo momento se mantienen notablemente por debajo de los correspondientes a espejos adheridos con cinta 4032 (y generalmente por debajo de la mitad de estos últimos valores);
- (b) el conjunto de los espejos de 3,0 y 4,2 mm de espesor pegados con cinta 4262 presenta alabeos que en prácticamente todo momento se mantienen por debajo de los correspondientes a espejos adheridos con pintura. Los valores de equilibrio de los espejos pegados con pintura superan a los correspondientes de los espejos pegados con cinta 4262 en, respectivamente, 8 % (2,2 mm), 84 % (3,0 mm) y 400 % (4,2 mm).

Por lo tanto, se descartaron los espejos con vidrio de 1 mm de espesor cuyo uso se había previsto en la Ref. [1] y se decidió utilizar en uno de los módulos espejos de 2,2 mm (por su menor absorción y menor contribución a las pérdidas ópticas en el concentrador) y en el otro módulo de 4,2 mm (por su menor alabeo). Los del primer módulo fueron adheridos por mitades con pintura y con cinta 4262, mientras que los del segundo lo fueron en su totalidad con esta última. En la Fig. 4 se muestra la distribución del alabeo del conjunto de 206 espejos de 2,2 mm efectivamente instalados en el primer módulo, medidos al mes de haber sido pegados. Los valores medios coinciden bien con los valores de equilibrio obtenidos en la Fig. 3 y con nuestros requerimientos, no obstante lo cual se están preparando unidades adicionales para reemplazar los 22 conjuntos espejo-soporte con alabeos superiores a 10,5 milirradiantes.

En cuanto al pegado con pintura, se lo efectuó apoyando los tubos de Al sobre una superficie horizontal y cubriendo con ella sus caras superiores y las posteriores de los espejos, uniéndolas luego con una leve presión, tras lo cual se dejaron secar entre 24 y 48 horas. Algunas de las unidades construidas fueron expuestas de canto a radiación solar intensa durante un lapso suficiente para que la temperatura del conjunto aumentara notablemente y, en ese estado, se verificó que el valor de su alabeo no se alteraba. Testigos de los diversos conjuntos construidos se están instalando a la intemperie para controlar su evolución bajo condiciones reales. Por otra parte se constató que los solventes contenidos en adhesivos tipo "contacto" o de caucho sintético siliconado atacan al espejado, por lo cual se descartaron.

3. Montaje de los espejos

Se completó el montaje de los espejos de uno de los módulos, ajustando la inclinación de cada uno de ellos con el equipo laser de He-Ne en un proceso de varios pasos.

Primero se colocó la estructura del concentrador en posición horizontal utilizando como referencia los centros de giro de los soportes de los espejos. Luego se ubicaron los brazos de sostén del receptor en posición vertical y se los unió con una barra rígida, asegurando que su eje de simetría longitudinal se encontrase sobre el eje de simetría longitudinal del espejo tangente de cada una de las secciones. Para asegurar la efectiva tangencialidad

de cada uno de éstos, se adosó un espejo a la barra y se hizo incidir sobre él un rayo laser con un ángulo tal que al reflejarse en el eje de simetría de la barra incidiese sobre el eje de simetría de uno de los espejos tangentes; luego se giró éste hasta que, al reflejarse, el mencionado rayo volviese a incidir sobre el eje de simetría de la barra. A continuación se montó el equipo laser sobre un banco óptico de forma tal que un rayo reflejado en el eje de simetría de dicho espejo tangente incidiera sobre el eje de simetría de la barra (Fig. 5). Luego se desplazó el rayo paralelamente deslizando el equipo sobre el banco, hasta que aquél incidiese sucesivamente en los ejes de simetría longitudinal de cada uno de los espejos de esa sección y se los giró hasta que los rayos reflejados incidieran sobre el eje de simetría de la barra. El procedimiento se repitió para la otra sección. En todos los casos se utilizó la zona central de los espejos y, para algunos, se realizaron comprobaciones del ajuste haciendo incidir el rayo cerca de sus extremos.

4. Distribución del flujo de energía en el plano receptor

Para medir la distribución de intensidad en el plano receptor se sujetaron tres fotorresistores a la barra rígida mencionada en el apartado precedente y sus señales de salida se canalizaron hacia un osciloscopio con memoria. Al desplazarse la barra a través de la zona focal, las señales de los detectores laterales sirvieron para disparar el instrumento, mientras la proveniente del central se usó para obtener la curva de distribución. A fin de que este fotorresistor estuviese uniformemente iluminado, se colocó un diafragma circular de 1 mm de diámetro frente a él, a distancia adecuada (Fig.6). Para calibrar la escala de intensidad en forma relativa, se obtuvo la distribución de ésta en seis barridos sucesivos de la zona focal, en cada uno de los cuales se interpuso entre el diafragma y el detector un escalón distinto de una cuña fotográfica calibrada. Los factores de concentración puntual y medio se deducen entonces comparando la distribución medida con la señal provista por el detector central cuando sobre él incide directamente la radiación proveniente del Sol.

En la Fig. 7 se muestra la distribución experimental para incidencia normal de la radiación solar, de la cual resulta un factor de concentración puntual máximo de ~60. La base de la distribución tiene un ancho de 10 cm. Dentro de los 4 cm centrales cae ~80% de la intensidad, siendo el factor de concentración medio en este ancho aproximadamente el doble del correspondiente a toda la distribución. Estos resultados deben considerarse como preliminares, ya que la calibración debe ser mejorada. En la misma figura se incluyen dos curvas teóricas normalizadas a la experimental, calculadas suponiendo que los espejos estuviesen apartados al azar de su posición angular correcta según una distribución normal con valor medio cero y desviaciones standard de, respectivamente, 3 y 4 milirradiantes; estos valores son del orden de la mitad de los alabeos medios indicados en la Fig. 4.

5. Receptor, circuito de extracción del fluido e intercambiador de calor

En la Fig. 8 se muestra el receptor montado en prueba de laboratorio.

En la Fig. 9.a se muestra un corte del receptor, en el cual se observan los cuatro tubos por los cuales circula el fluido a calentar, el vidrio térmico frontal que provoca efecto invernadero y disminuye los efectos del viento, además de otros detalles constructivos. En la Fig. 9.b se da un corte por los tubos que alojan las guías de luz de los fotorresistores utilizados para comandar el desplazamiento del receptor en concordancia con el movimiento aparente del Sol. Estos detectores se encuentran ubicados sobre los flancos de la distribución mostrada en la Fig. 6 y sus salidas van a un sistema electrónico-mecánico descrito en detalle en la Ref. [3].

En la Fig. 10 se da un corte de uno de los extremos del receptor, mostrando que la salida al exterior está libre para posibilitar su desplazamiento por dilatación al calentarse los tubos. En cuanto a la pintura negra de elevada absorbancia utilizada para cubrir éstos, se ensayaron cinco de distintas procedencias, tanto nacionales cuanto importadas, sobre bases de $\sim 30 \text{ cm}^2$ del mismo acero usado para los tubos del receptor. La única de comportamiento satisfactorio a la temperatura requerida fue la pintura Pyromark Serie 2500[†], que mantuvimos a 340 C durante 15 horas y ciclamos hasta 600°C, sin observar deterioro (según los fabricantes resiste hasta 1400 C); en todos los casos se le aplicaron los procesos de curado y vitrificado recomendado por los proveedores.

Una de las bases de acero cubierta con la pintura mencionada fue colocada en un recipiente cuya cara frontal estaba formada por un vidrio igual al usado en el receptor, estando las demás aisladas interiormente con amianto. Sobre la cara posterior de la base se aplicó una termocupla y luego se la ubicó en la zona focal del concentrador. Al mediodía solar de un día de Julio de 1979, con una intensidad de radiación directa de 700 W/cm^2 , la termocupla indicó temperaturas de 450 C.

El receptor -ya construido totalmente- se conectará a un circuito cerrado que incluye un tanque de expansión, una bomba de circulación y un intercambiador de calor destinado a calentar o evaporar un fluido secundario para variados usos (por ejemplo, agua para aplicaciones industriales o vapor para accionar turbinas) (Fig. 11). Como fluido primario se empleará aceite Therminol 66^{††}, estable hasta 370 C, a presión atmosférica. La estanqueidad del sistema esquematizado en la Fig. 11 fue comprobada en circuito cerrado sin el receptor, con aceite a temperatura de 150 C.

†) Tempil Division, Big Three Industries Inc., South Plainfield, New Jersey 07080. EE.UU. de N.A..

††) Monsanto Argentina S.A.I.C., Av. Madero 1020, 1106 Buenos Aires.

Referencias

- 1) R.Nicolás, J.A.Moragues, R.Platzeck y W.Scheuer, Simulación del comportamiento y etapa inicial de la construcción de un concentrador fijo a espejo facetado. Actas de la 3ª Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES), Mendoza, pág. 191 (1977).
- 2) R.O.Nicolás, R.Platzeck, J.C.Durán, J.A.Moragues y W.Scheuer, Concentrador cilíndrico fijo a espejo facetado para aprovechamiento de la energía solar. Publicación CNEA-NT 35/78 (1978).
- 3) J.J.Nicolás, Sistema de localización y seguimiento del foco de un concentrador solar. Actas de la 5ª Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, Córdoba, pág. 113 (1979).

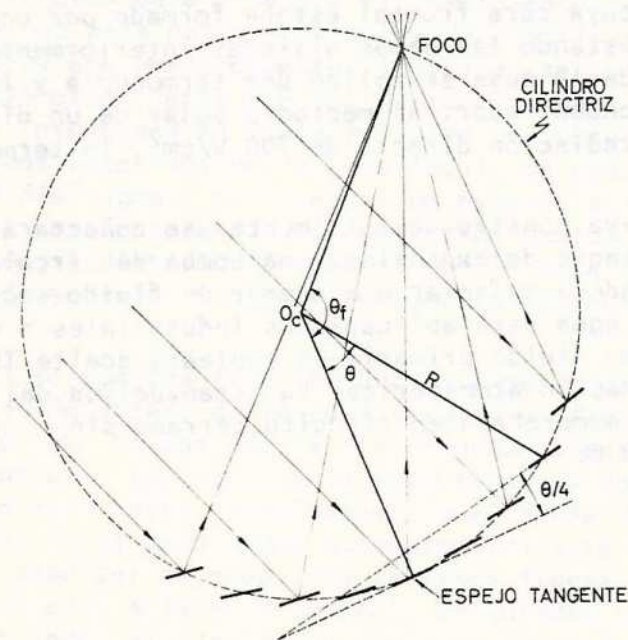


Fig. 1: Sección de un concentrador fijo a espejo facetado de radio R . Los rayos incidentes han sido proyectados sobre el plano perpendicular al eje de simetría O_C del cilindro de referencia imaginario. El ángulo θ determina la posición de cada espejo respecto del espejo tangente. El plano que contiene a cada uno de los espejos forma un ángulo $\theta/4$ con el que contiene al espejo tangente. El ángulo θ_f determina la posición angular del foco lineal respecto del espejo tangente.

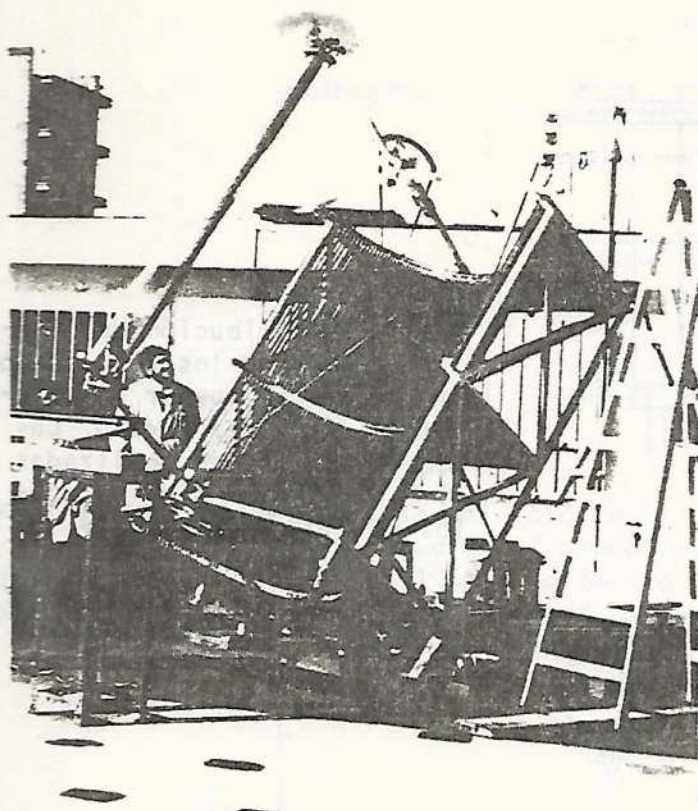


Fig. 2: Módulo del CFEF en proceso de montaje, orientado en la dirección N-S e inclinado a 55° . Se observa la barra colocada en el lugar del receptor.

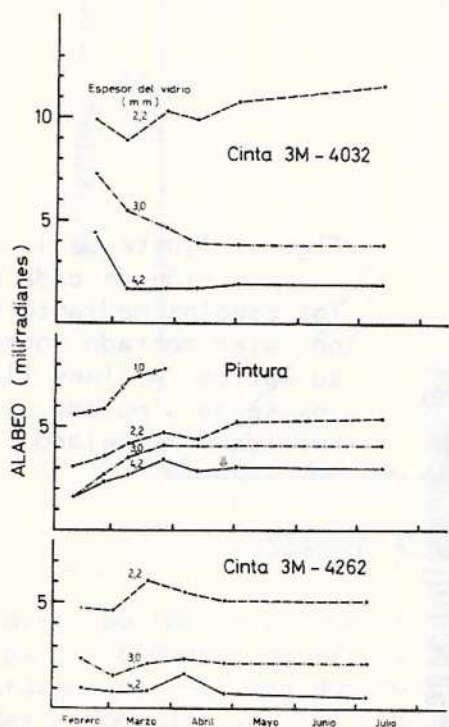


Fig. 3: Evolución temporal del alabeo de espejos pegados sobre tubos de Al de sección cuadrada de 15 mm de lado y 1,25 mm de espesor. Los adhesivos utilizados fueron: cintas adhesivas de doble faz marca 3M, modelos 4032 y 4262, y pintura empleada por el fabricante de espejos para proteger su cara posterior. Los conjuntos espejo-soporte no estuvieron expuestos a la intemperie.

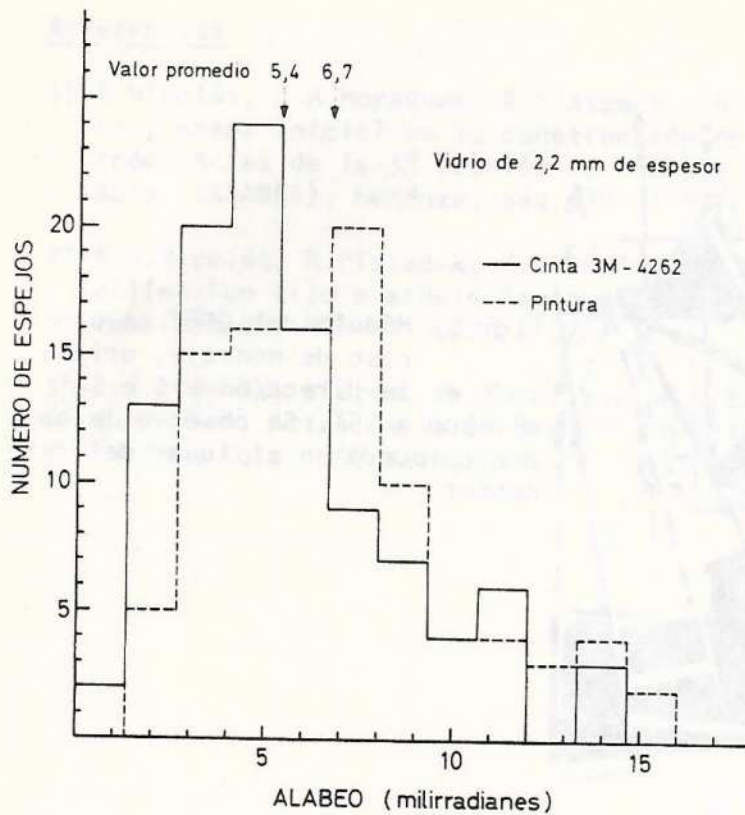


Fig. 4: Distribución del alabeo de los 206 espejos de 2,2 mm de espesor instalados en el primer módulo. Las mediciones fueron realizadas al mes de haber sido pegados los espejos.

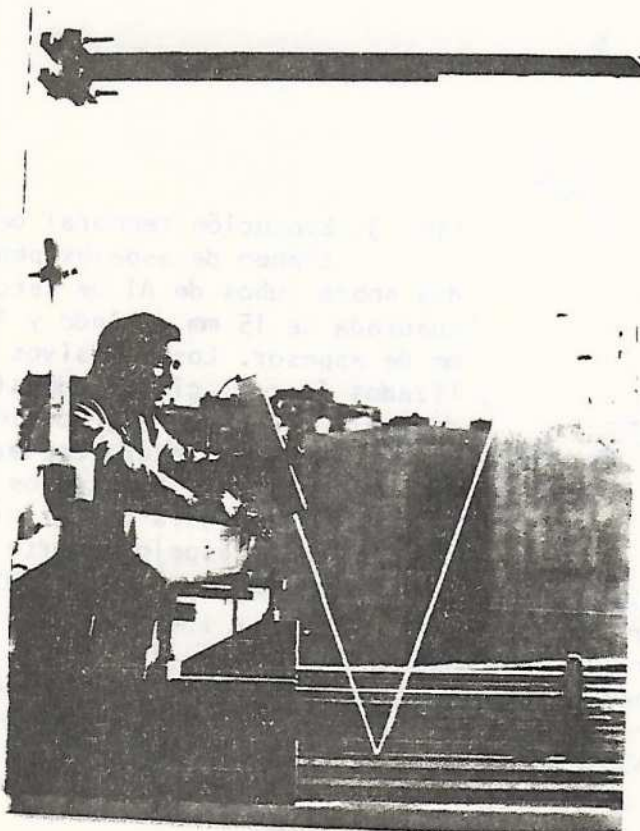


Fig. 5: Ajuste de la inclinación de cada uno de los espejos mediante un equipo laser montado sobre un banco óptico. A fines ilustrativos se ha simulado el rayo emitido y reflejado.

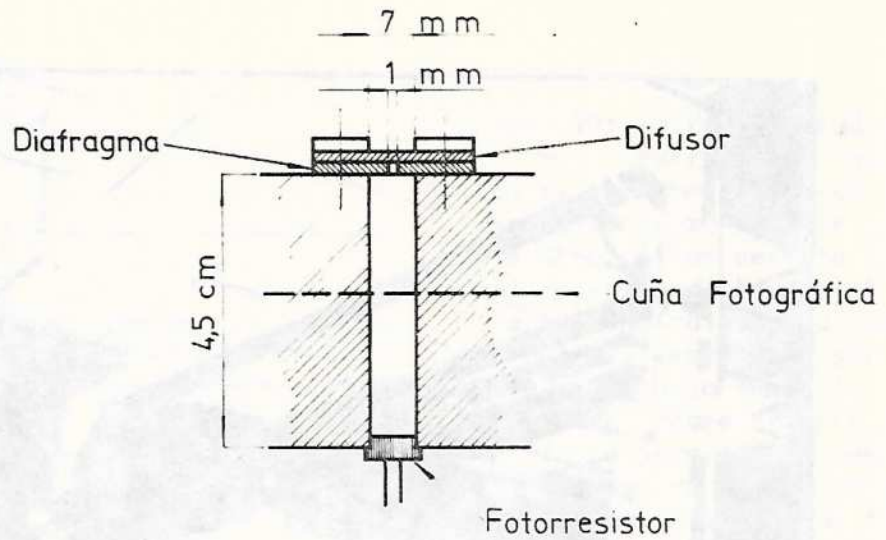


Fig. 6: Sección del montaje del fotorresistor utilizado para medir la distribución de intensidad en el plano receptor. Se observa la ubicación del diafragma circular de 1 mm de diámetro y de la cuña fotográfica utilizada para calibrar la escala de intensidad en forma relativa.

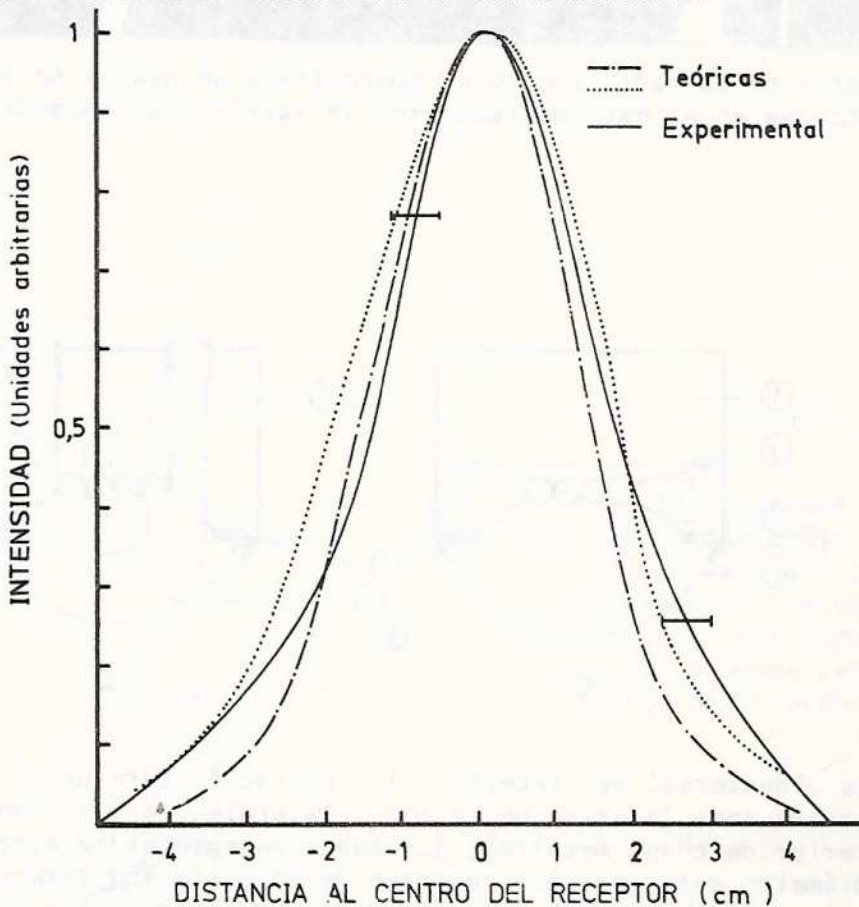


Fig. 7: Distribución experimental del flujo de energía en el plano receptor para incidencia normal al plano de abertura del concentrador. A fines de comparación se incluyen dos curvas teóricas normalizadas a la experimental, calculadas suponiendo que los espejos estuvieran apartados al azar de su posición angular correcta según distribuciones normales con desviaciones estándar de 3 (---) y de 4 (.....) milirradiantes.

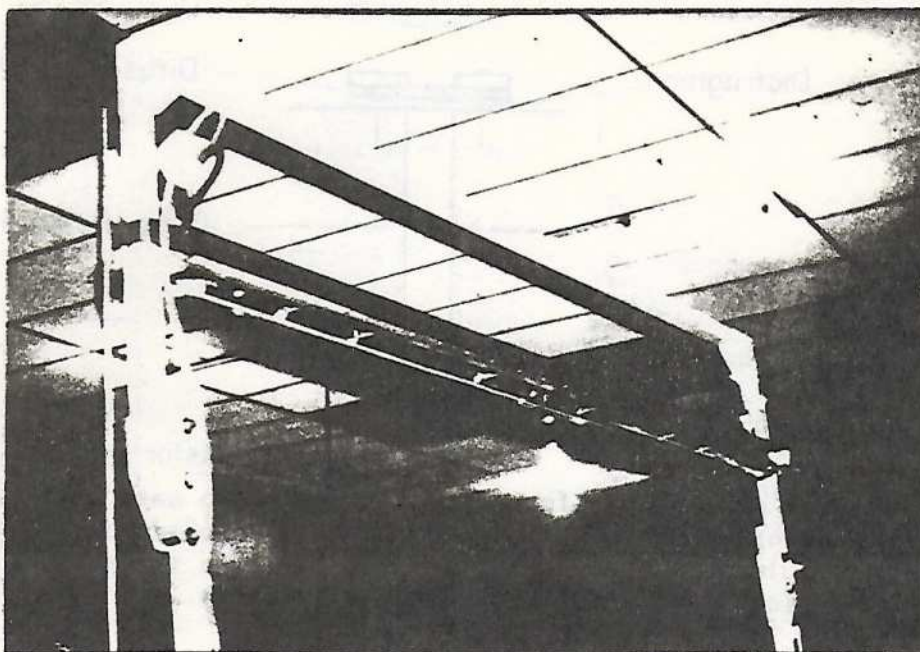


Fig. 8: Receptor de la radiación solar concentrada en prueba de laboratorio. Se observa en el extremo izquierdo la varilla que comanda la rotación del receptor.

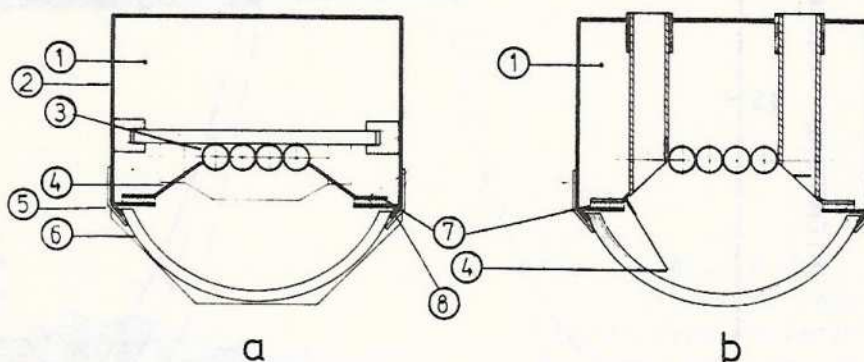


Fig. 9: Corte transversal del receptor. 1.- aislación térmica de lana mineral que cubre toda la parte posterior y laterales de los tubos receptores; 2.- caja exterior de chapa metálica; 3.- tubos receptores de acero inoxidable de 1 cm de diámetro exterior; 4.- soportes de la aislación térmica que sirve como superficie reflectante; 5.- soporte del vidrio curvo; 6.- vidrio térmico curvo; 7.- aislación de amianto; 8.- burlete de teflón. En la figura b se indica el corte de los tubos de cerámica dentro de los cuales van las guías de luz para los fotorresistores utilizados para comandar el desplazamiento del receptor.

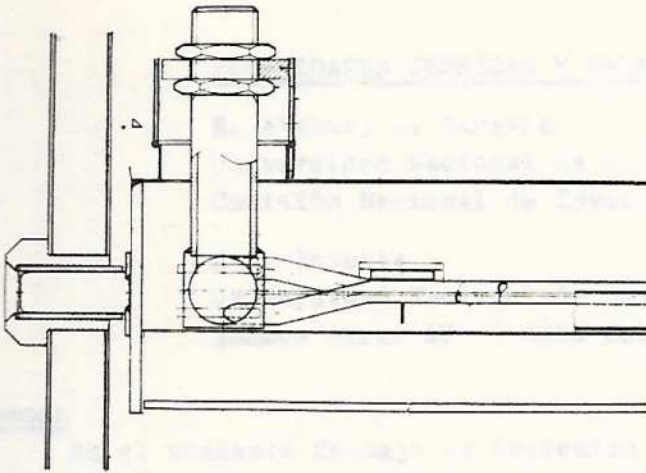


Fig. 10: Corte longitudinal del extremo del receptor. En el extremo izquierdo se observa el brazo soporte y el buje de giro que permite rotar al receptor de forma tal que la perpendicular a su cara frontal siempre pase por el eje del espejo tangente. El extremo del receptor está libre a fin de permitir el desplazamiento debido a dilataciones. La entrada y salida de fluido se realizan por la parte superior.

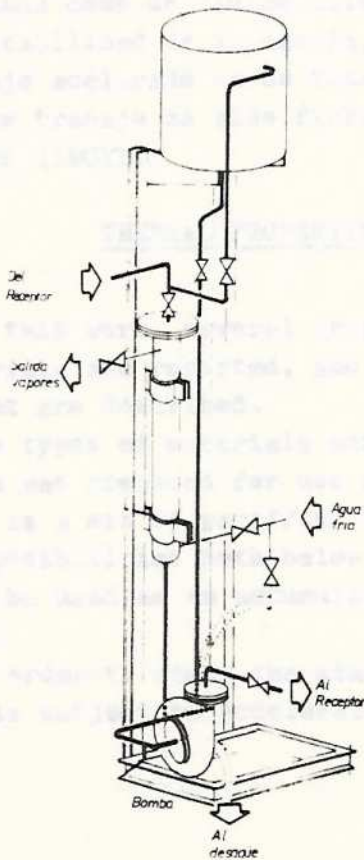


Fig. 11: Diagrama del circuito primario de extracción de la energía térmica. Se observan el tanque de expansión, el intercambiador de calor y la bomba para la circulación del fluido.