

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO Y ETAPA INICIAL DE LA CONSTRUCCION DE UN CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO

R.Nicolás*, J.A.Moragues#, R.Platzeck y W.Scheuer
Comisión Nacional de Energía Atómica
Avda. del Libertador 8250 - (1429) Buenos Aires

Resumen

Se analizó el funcionamiento del concentrador fijo a espejo facetado propuesto por J.L.Russell¹⁾, simulando su comportamiento mediante computadora, utilizando una metodología propia. Se discuten los resultados para concentradores orientados en las direcciones E-O y N-S, ubicados a latitud $34,5^{\circ}$ S.

Sobre la base de este estudio se diseñó un concentrador de 2,5 m de largo, 1 m de radio y con ángulo de abertura variable entre 60 y 150 grados. Los elementos especulares que lo forman tienen un ancho de 2 cm, dispuestos en dos secciones de 1,2 m de largo cada una, pudiéndose ajustar su ángulo de inclinación a fin de analizar experimentalmente la precisión con que éste debe ser definido.

Se ha encarado la construcción de dos prototipos, uno con espejos de vidrio plano nacional de 2,2 mm de espesor y otro con espejos de vidrio importado de ~1 mm de espesor.

Abstract

The Faceted Fixed Mirror Solar Concentrator proposed by J.L. Russell¹⁾ was studied by a computer simulation of its behaviour, using a specially developed method. The results are discussed for concentrators oriented E-W or N-S, at latitude $34,5^{\circ}$ S.

According to these results, a 2,5 m long, 1 m radius concentrator was designed. Its aperture angle may be modified between 60 and 150 degrees. The mirrors have 2 cm width and are mounted as two modules of 1,2 m length. Their inclination angles may be adjusted in order to determine the precision within which they have to be defined.

The construction of two prototypes has been started, one using mirrors made from local 2,2 mm thick sheet glass, and a second one using imported ~ 1 mm thick float glass.

*) Realizando trabajo de Seminario para Licenciatura en Física de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

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

1. Introducción

Sobre la base del estudio evaluativo ²⁾ realizado referente al estado de desarrollo de los métodos de generación masiva de electricidad por conversión fototérmica y fotovoltaica de la energía solar, se decidió iniciar en la Comisión Nacional de Energía Atómica un programa de desarrollo de un sistema concentrador que permita obtener temperaturas de 400 a 500 C.

De los diferentes sistemas analizados -concentrador cilíndrico-parabólico, concentrador fijo a espejo facetado, paraboloide de revolución y receptor central- usualmente se presenta al último como poseyendo la mayor posibilidad en cuanto a alcanzar costos del kW_e que sean competitivos con los de sistemas convencionales de generación de electricidad. Sin embargo, si bien mucho menos estudiado que éste, el sistema basado sobre concentradores fijos a espejo facetado (CFEF) se considera como una posible alternativa económica frente a los demás sistemas solares, con grandes ventajas en relación con los basados sobre concentradores cilíndrico-parabólicos y sobre paraboloides de revolución.

Una serie de razones nos indujo a encarar el estudio de un sistema de generación de electricidad mediante concentradores fijos a espejo facetado en lugar del de torre central, siendo las más importantes:

- (1) Posibilidad de construir prototipos de tamaño próximo al que tendrán las unidades definitivas, ya que las potencias requeridas en centrales se obtendrán por multiplicación de las unidades. De esta forma, desde el comienzo se acumula experiencia útil para el diseño final del sistema. En el caso de torre central, los problemas que se presentan en prototipos pequeños no son directamente extrapolables a los tamaños de espejos y torres que se requieren en centrales de potencia.
- (2) La característica modular permite diseñar sistemas completos de pocos kW_e , como paso previo a sistemas de mayor potencia, los cuales podrán ser utilizados en emplazamientos seleccionados a fin de obtener una experiencia integral sobre su manejo y funcionamiento.
- (3) Como etapa intermedia se pueden desarrollar concentradores fijos a espejo facetado cuyas características constructivas sean mucho más simples que las requeridas para generación de electricidad, pero apropiadas para obtener temperaturas del orden de 200-250 C, rango que posee amplias aplicaciones en los campos de refrigeración de ambientes y de aplicaciones industriales. Esta alternativa es sumamente importante por su posible utilización a mediano y hasta corto plazo, con lo cual se podrá lograr la participación de la industria privada nacional para el desarrollo del sistema y, posteriormente, en el más sofisticado requerido para la generación de electricidad.
- (4) Para la generación de electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas, el empleo de concentradores es uno de los caminos indicados para la disminución de los costos actuales, siendo el del tipo CFEF (a diferencia del de torre central) uno de los que presentan amplias posibilidades para esta aplicación.
- (5) Presenta, igual que los sistemas a receptor central, la posibilidad de

construir los denominados sistemas de generación total de energía, o sea de producción de electricidad y energía térmica (tanto para agua caliente de uso domiciliario cuanto para calefacción y refrigeración). La producción de energía eléctrica puede realizarse tanto utilizando el vapor generado para accionar una turbina, cuanto por el empleo de células fotovoltaicas. Estos sistemas son sumamente interesantes para su aplicación a pequeñas comunidades, fábricas, escuelas, establecimientos rurales, etc.

- (6) El sistema no está aún optimizado desde el punto de vista óptico, presentando posibilidades de desarrollo en este sentido.

El concentrador fijo a espejo facetado tal cual es discutido en el presente trabajo fue propuesto por J.L. Russell ¹⁾ en 1973. Sobre la base de lo expuesto en la Ref. 3, hemos desarrollado los programas de computadora necesarios utilizando metodología propia, para simular el comportamiento del CFEF en función de los diferentes parámetros que lo caracterizan. Con los resultados obtenidos, se eligieron los parámetros para la construcción de dos prototipos.

2. Descripción y características principales

El concentrador solar fijo a espejo facetado 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, o de referencia, imaginario. El plano de uno de los elementos especulares es tangente a dicho cilindro; los de cada uno de los demás, forman ángulos prefijados respecto del mismo. En la Fig. 1 se muestra esquemáticamente una sección del concentrador y se indican los parámetros principales que permiten describir su funcionamiento. Un parámetro adicional no incluido en la figura es el ángulo β formado por el eje de simetría del cilindro directriz y el plano horizontal. Es posible demostrar ³⁾ que, para cualquier dirección de un haz incidente de rayos, el conjunto de espejos dispuestos en la manera descrita forma un foco lineal y que las sucesivas posiciones de éste, debidas al movimiento aparente del Sol, están también ubicadas sobre el mismo cilindro de referencia. Por lo tanto, el receptor de la energía concentrada puede estar constituido por un tubo soportado por brazos cuyo centro de giro se halla sobre el eje de simetría O_c del cilindro.

De entre las alternativas para la ubicación de los espejos de acuerdo a la forma de disponer sus bordes longitudinales se seleccionan dos: (a) los bordes de dos espejos sucesivos se encuentran ubicados sobre un plano perpendicular al que contiene al espejo tangente (criterio 1); (b) dichos bordes se encuentran sobre un plano perpendicular al espejo inferior del par considerado (criterio 2). Los parámetros que influyen en la elección del criterio a adoptar son discutidos en las secciones siguientes.

De todas las posibles orientaciones del concentrador, analizaremos dos casos extremos: que su eje longitudinal se encuentre en la dirección Norte-Sur o en la Este-Oeste. Las características de comportamiento para cada una de estas orientaciones son discutidas en la Secc. 5.

El valor de ϕ lógicamente depende de la época del año, del día, de la hora y de la orientación del concentrador según las siguientes relaciones (por simplicidad consideramos $\beta = 0$):

$$\phi_{E-0} = \arctg\left(-\frac{\operatorname{tg} h}{\cos A}\right) + \xi, \quad (1)$$

$$\phi_{N-S} = \arctg\left(-\frac{\operatorname{tg} h}{\operatorname{sen} A}\right) + \xi, \quad (2)$$

donde

$h = \arcsen(\operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t) =$ altura solar,

$A = \arcsen\left(\frac{\cos \delta \operatorname{sen} t}{\cos \phi}\right) =$ ángulo azimutal,

$\phi =$ latitud,

$\delta =$ declinación,

$t =$ hora en grados respecto del mediodía solar.

En la Fig. 2 mostramos la variación diaria de ϕ para las dos orientaciones del concentrador en consideración, calculada para la latitud de la Capital Federal y de San Rafael, Prov. de Mendoza, suponiendo que el plano de abertura del concentrador se encuentra horizontal.

La posición θ_f del foco lineal también se puede expresar en función de ϕ :

$$\theta_f = 2(\phi + \rho).$$

Utilizando las ecuaciones (1) y (2), es posible obtener θ_f para cualquier hora del día y época del año, para ambas orientaciones del concentrador. De la variación de ϕ mostrada en la Fig. 2, se puede concluir que, para la orientación N-S, θ_f varía diariamente en $\sim 180^\circ$, mientras que, para la orientación E-0, la variación de θ_f es pequeña si se excluyen las horas vecinas al amanecer y al crepúsculo; en la Fig. 3 se ilustra esto para cuatro épocas del año.

3. Pérdidas geométricas

Una de las características importantes del CFEF, debida a su particular configuración geométrica, es que parte de la radiación incidente se pierde por los apantallamientos producidos entre espejos o por incidir sobre zonas no reflectantes, como los espacios entre los bordes de dos espejos sucesivos. En la Fig. 4 se ilustran estas pérdidas para un par de espejos.

Las pérdidas geométricas totales p_g están dadas por el cociente entre la sumatoria de todas las superficies del CFEF desde las cuales la radiación incidente sobre ellas no llega hasta el receptor y la superficie de su abertura, ambas proyectadas en la dirección perpendicular a la de los rayos incidentes. Las hemos evaluado siguiendo la metodología dada en la

Ref. 3, pero aplicando un enfoque y una técnica de cálculo diferentes. En vez de suponer elementos especulares de ancho W infinitesimal ³⁾, supusimos que dicho ancho es finito, con lo cual las integrales de la evaluación de Russell et al. se reemplazan por sumatorias. De esta manera se pueden calcular las pérdidas efectivas para casos reales de concentradores con W/R significativamente distinto de cero; lo hemos hecho para las dos disposiciones consideradas para los espejos (en la Ref. 3 sólo se había calculado p_g para el criterio 1). Por otra parte, las ubicaciones angulares θ_n resultan determinadas explícitamente para cada elemento. Nuestra evaluación y la de Russell et al. coinciden, como corresponde, para $W/R \rightarrow 0$, pero se apartan significativamente para $W/R \gtrsim 0,04$.

En la Fig. 5 se muestran nuestros resultados para un CFEF con $\theta_a = 90^\circ$ y $W/R \rightarrow 0$ y para los dos criterios considerados en cuanto a la ubicación de los espejos (Secc. 2). De ella se concluye que las pérdidas se mantienen pequeñas mientras las variaciones de ϕ están acotadas alrededor de $p_g = 0$; por ej., para mantener p_g menor que 20 %, la variación de ϕ no debe ser mayor que 80° . Según la Fig. 2, durante las 6 horas centradas alrededor del mediodía solar, que son las de mayor intensidad incidente, ϕ varía $\sim 60^\circ$ para un CFEF orientado en la dirección E-O y $\sim 130^\circ$ para uno en la orientación N-S. Se observa que sólo para $\rho = 0^\circ$ las curvas resultan simétricas. Esto es debido a la simetría en la disposición de los espejos. Para $\rho \neq 0^\circ$, dada la asimetría del número de espejos respecto del espejo tangente, las pérdidas resultan mayores para la zona en la que el número de espejos es mayor. La variación de p_g en función de ρ da la posibilidad de elegir este último de manera de disminuir las pérdidas para una dada época del año, una vez establecidos los demás parámetros del CFEF.

Asimismo, se observa que las pérdidas totales son menores si los espejos están dispuestos según el criterio 2 (con sus bordes sobre un plano perpendicular al del espejo inferior del par considerado). Esto es consecuencia de que al calcular los θ para un dado W/R , para todo n resulta θ_n mayor con el criterio 1 que con el criterio 2. Por lo tanto, a abertura fija del CFEF, en el primer caso se tendrán menos espejos que en el segundo, y, consecuentemente, estarán más separados, aumentando las pérdidas. Para optar entre ambas disposiciones de los espejos es necesario efectuar un balance económico entre las ventajas de disminuir las pérdidas y las desventajas de aumentar el número de espejos.

4. Factor de concentración

Para el análisis que sigue consideramos las energías incidentes sobre el concentrador y el receptor, expresadas por unidad de longitud de éstos y por unidad de tiempo (W/m). Supondremos, además, que el coeficiente de reflexión de los elementos especulares planos es igual a 1 y que no existen otros tipos de pérdidas por efectos ópticos.

La energía solar incidente sobre el receptor es

$$E_r = I_c A_c (1 - p_g), \quad (3)$$

donde I_c es la intensidad incidente sobre el plano de abertura del concen-

trador y A_c el ancho de ésta. Por lo tanto, la intensidad en el receptor es

$$I_r = E_r / A_r ,$$

donde A_r es el ancho del receptor.

Definimos el factor de concentración C como el cociente entre las intensidades incidentes sobre el receptor y el concentrador:

$$C = I_r / I_c = A_c (1 - p_g) / A_r . \quad (4)$$

El factor de concentración máximo, sin introducir nuevas pérdidas, estará dado por el mínimo valor de A_r que, dentro de la condición de que toda la radiación proveniente desde el concentrador incida sobre el receptor, resulta igual al máximo ancho de la imagen solar sobre el mismo:

$$A_r = W + 4 R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} , \quad (5)$$

siendo $\alpha = 32'$ la abertura angular del Sol. Reemplazando (5) en la expresión (4) resulta:

$$C = \frac{2 \operatorname{sen} (\theta_a / 2) (1 - p_g)}{W/R + 4 \operatorname{tg} (\alpha / 2)} . \quad (6)$$

Se observa que C depende de los parámetros W/R y θ_a y que, a través de p_g , es función de la época del año y de la hora del día. En la Fig. 6 mostramos cómo los parámetros W/R y θ_a influyen en el valor máximo de C (correspondiente a $p_g = 0$) y en la Fig. 7, cómo varía C en función de la época del año para un CFEF con $W/R = 0,02$, orientado en las dos direcciones previamente consideradas.

Del análisis de estos datos se puede concluir que: (a) al disminuir W/R aumenta C ; el límite está sólo dado por razones constructivas; (b) aumentando θ_a no siempre aumenta C , ya que también aumenta p_g , pudiendo llegar a ser este último factor el preponderante.

5. Simulación del comportamiento del concentrador

Afin de simular el comportamiento del concentrador es necesario disponer de la distribución de radiación solar directa para las distintas horas del día a lo largo del año. Para calcularla, utilizamos un programa propuesto por Dogniaux⁴⁾, en el cual se suponen condiciones de cielo despejado, siendo necesario disponer de datos sobre el coeficiente de turbidez y el contenido de agua precipitable o, lo que es equivalente, la presión de vapor de agua en la atmósfera. Los valores obtenidos para Buenos Aires fueron comparados con los experimentales publicados en la Ref. 5, no observándose diferencias superiores al 15 %.

Para el cálculo global del funcionamiento del concentrador se consideró un coeficiente de reflexión del 85 %, haciéndose las siguientes hipótesis simplificadoras:

- (a) los espejos se consideran de primera superficie;
- (b) se desprecian otros tipos de pérdidas por efectos ópticos;

- (c) el largo del concentrador se considera más que 50 veces mayor que su radio, con lo cual se desprecian las pérdidas en los extremos;
- (d) se supone que la condición de cielo despejado se cumple durante los 365 días del año.

Una de las figuras de mérito del sistema es la eficiencia, que definimos como el cociente entre la energía incidente sobre el receptor y la energía solar incidente sobre el plano de abertura del concentrador.

En la Fig. 8 se muestra la variación de la eficiencia media anual y de la energía incidente sobre el receptor a lo largo de un año, en función del ancho del concentrador (o, lo que es equivalente, del ángulo de abertura), para las dos orientaciones consideradas; para que en ambas el plano de abertura de CFEF tenga la misma inclinación, se las caracterizó por β y ξ intercambiadas. Estos resultados confirman lo aseverado en las secciones anteriores en el sentido de que la orientación E-0 es la más conveniente para este tipo de concentrador. Además, se observa que para la orientación E-0 el ángulo de abertura más adecuado se encuentra entre 120 y 150 grados.

Otro parámetro a tener en cuenta es el cociente γ entre la energía incidente sobre el receptor entre el 21/3 y el 20/9 y la que incide en el período 21/9-20/3. Salvo requerimientos de consumo muy especiales, es conveniente que esta relación se acerque a uno. En la Fig. 9 se muestran la variación de la energía incidente a lo largo de un año y el mencionado cociente, en función del ángulo ξ para un concentrador con orientación E-0 ubicado en Buenos Aires. Para esta latitud, el ξ más conveniente es de $\sim 40^\circ$, con lo cual se obtiene una relación $\gamma = 0,86$, disminuyendo sólo en un 2,4 % la energía anual incidente respecto al máximo, que se logra cuando ξ es igual a la latitud del lugar (con $\gamma = 0,77$).

6. Construcción de prototipos

Sobre la base del análisis efectuado en las secciones precedentes, encaramos la construcción de dos prototipos similares que nos permitirán verificar experimentalmente las propiedades del concentrador fijo a espejo facetado estudiado teóricamente. En particular, nos permitirán determinar la exactitud con que deben ser construídas sus partes para que, con pérdidas de eficiencia tolerables, se pueda obtener un diseño lo más económico posible.

A fin de verificar la posibilidad de utilizar espejos construídos con vidrio nacional fabricado por estiramiento (sistema Pittsburgh), que presenta el inconveniente de poseer ondulaciones y caras no paralelas, uno de los prototipos tendrá espejos hechos con este material (de 2,2 mm de espesor, que es el menor obtenible en plaza). El otro tendrá espejos de vidrio importado de ~ 1 mm de espesor, fabricado por flotamiento. En ambos casos, el espejo será realizado por la misma fábrica, en segunda superficie, dado que no pudimos identificar una técnica de primera superficie que diese espejos estables en condiciones de uso.

Ambos concentradores estarán compuestos por dos secciones de 1,18 m de largo cada una, con un radio de 1 m, siendo el ancho de los espejos de 2 cm (lo cual da una relación $W/R = 0,02$). Se adoptó el criterio 2

para la disposición de los espejos ya que es el que produce menores pérdidas geométricas. El diseño es tal que cada elemento especular estará fijado sobre soportes independientes que, a fin de determinar con qué precisión debe construirse el sistema definitivo, podrán ser girados en $\pm 1^\circ$ respecto de la posición calculada; se preve que podrán ser fijados con una precisión de $0,1^\circ$.

Será posible variar el ángulo de abertura entre 60° (55 espejos) y 150° (110 espejos). Asimismo, para la orientación E-O se preve una variación del ángulo ξ entre 0° y 45° y, para la N-S, de la β entre 0° y 60° . Los dos prototipos podrán ser acoplados a fin de formar un concentrador de aproximadamente 4,80 m de largo.

Se espera que para fines de Diciembre del corriente año se encuentre concluido el diseño final del concentrador, con planos para taller, estando programado el montaje de al menos uno de los concentradores para fines de Marzo de 1978.

A fin de determinar el coeficiente de reflexión de los espejos, así como su dispersión, se diseñó un sistema que permite determinarlos para diferentes ángulos de incidencia y para distintas longitudes de onda. Se dispondrá de lámparas de Hg, Na y Cd que, junto con un láser de He-Ne, nos permitirá cubrir la zona de 0,4 a $0,65 \mu\text{m}$ del espectro solar.

7. Desarrollos previstos

En el último bimestre de 1977 se encarará el prediseño del receptor y del sistema de seguimiento del movimiento aparente del Sol.

Asimismo, se estudiará la posibilidad de agregar un concentrador auxiliar en el receptor (p.ej., tipo Winston) que nos permitirá aumentar el factor de concentración manteniendo la relación W/R o aumentar ésta sin disminuir el factor de concentración.

Agradecimientos

Agradecemos al Lic. Julio C. Durán su participación en las discusiones y el habernos ayudado a solucionar los inconvenientes surgidos en los programas de computación utilizados en este análisis y a la Prof. Alicia Díaz Romero la buena disposición con que nos asesoró para asegurar la correcta marcha de éstos. Asimismo, estamos reconocidos al Técnico Jorge Prieto, quien confeccionó los gráficos.

Referencias

- 1) J.L.Russell, Jr., "Investigation of a Central Station Solar Power Plant", Informe GA-A12759 de la General Atomic Company, California, EE.UU. de N.A. (1973).
- 2) J.A.Moragues y W.Scheuer, "Conversión de Energía Solar en Electricidad. Estudio de Evaluación", Informe CNEA-NT2377, de la Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (1977).
- 3) J.L.Russell, Jr., E.P.DePlomb y R.K.Bansal, "Principles of the Fixed Mirror Solar Concentrator", Informe GA-A12902 de la General Atomic Company, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 4) R. Dogniaux, "Programme de Calcul pour la Prédétermination Précise des Eclairéments Energétiques et Lumineux en Relation avec l'Utilisation de l'Energie Solaire", presentado en el "Colloque International sur l'Electricité Solaire", Toulouse, Francia (1976).
- 5) Servicio Metereológico Nacional, "Datos de Radiación Solar del Período 1º de Julio de 1957 al 31 de Diciembre de 1958", Buenos Aires (1962).

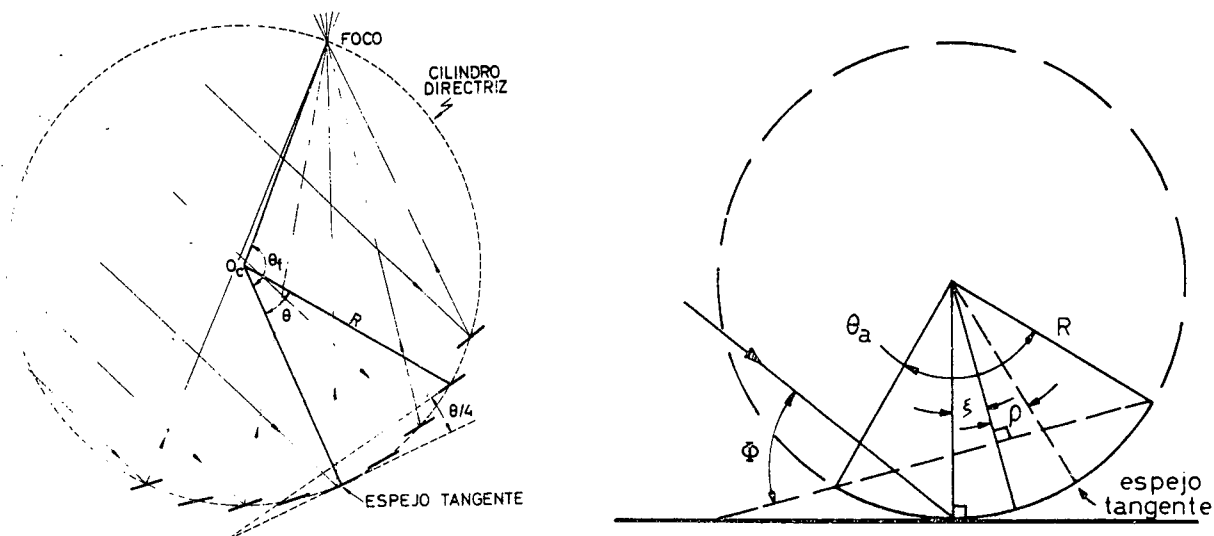


Fig. 1: Sección de un concentrador fijo a espejo facetado de radio R . Los rayos incidentes han sido proyectados sobre el plano perpendicular al eje de simetría O_C del cilindro de referencia imaginario. El ángulo θ determina la posición angular de cada espejo respecto al espejo tangente. El plano que 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 al espejo tangente.

En la parte derecha de la figura se indican los siguientes parámetros característicos:

ϕ : ángulo entre el plano de apertura y el plano que contiene al eje de simetría del cilindro directriz (O_C) y al Sol;

θ_a : apertura angular del concentrador;

ξ : ángulo entre dos planos que contienen al eje de simetría O_C del cilindro de referencia, conteniendo, además, uno a la vertical en el lugar y, el otro, a la bisectriz del ángulo de apertura θ_a .

ρ : ángulo formado entre el plano de simetría del concentrador y el plano que contiene al eje O_C y al eje de simetría del espejo tangente.

Todos los ángulos se consideran positivos cuando se los mide en el sentido antihorario, excepto ϕ .

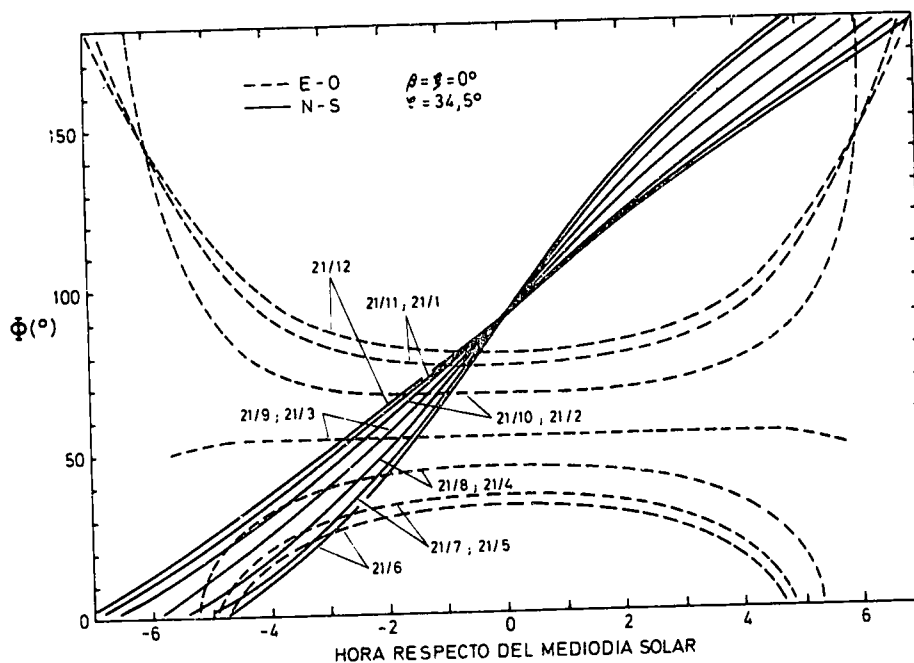


Fig. 2: Variación diaria de ϕ para distintas épocas del año, considerando un concentrador con $\xi = \beta = 0$ ubicado a $34^{\circ}30'S$.

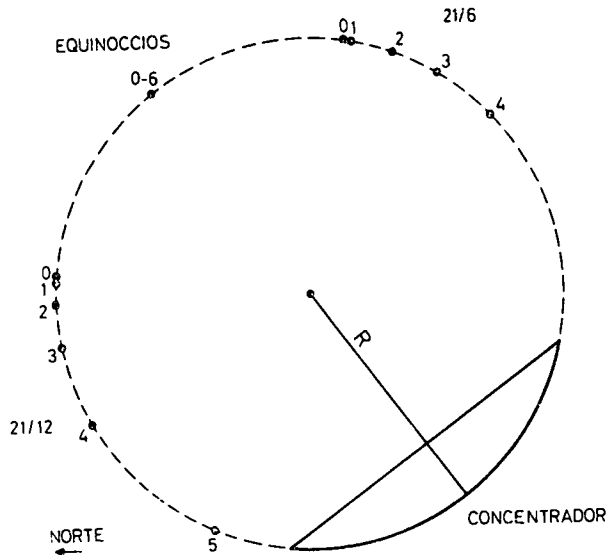


Fig. 3: Variación diaria de la posición del foco lineal en un CFEF ubicado a $34^{\circ}30'S$ con orientación E-0 y con $\beta = 0$ y $\xi = 34^{\circ}30'$. Los números identifican horas antes o después del mediodía solar, correspondientes a cuatro épocas del año.

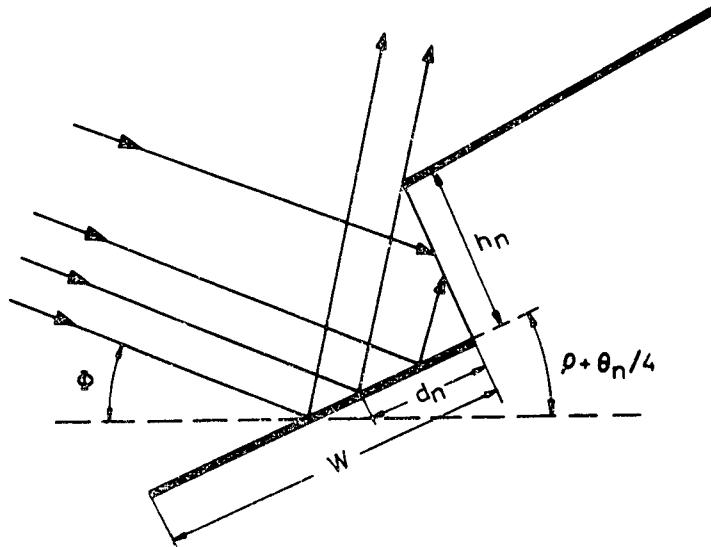


Fig. 4: Proyección de dos espejos sucesivos sobre un plano perpendicular al eje de simetría del cilindro directriz, para un concentrador con $\xi = 0$. W es el ancho del espejo; h_n la distancia entre los bordes de los espejos n y $n+1$ y d_n la parte del espejo n caracterizada porque la luz reflejada desde ella es interceptada antes de llegar al receptor. Según Ref. 3.

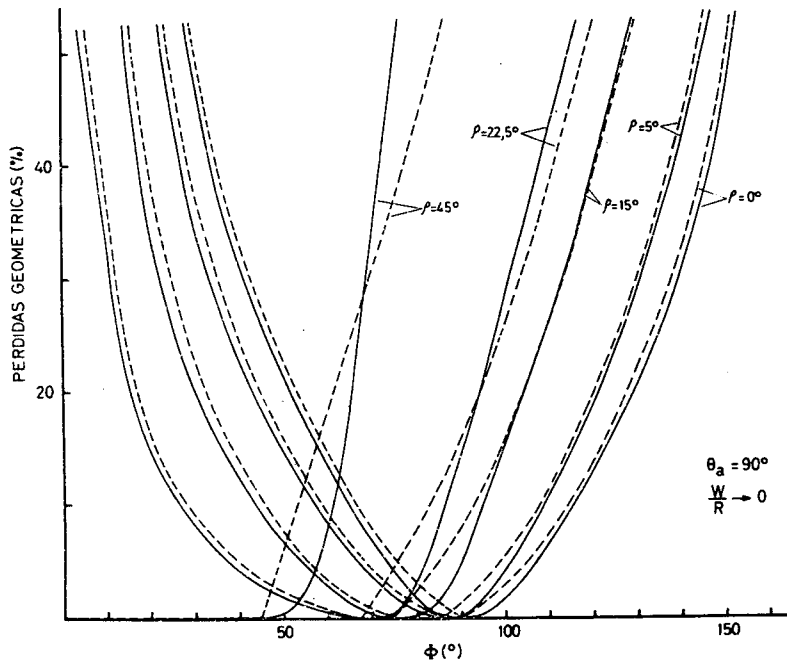


Fig. 5: Pérdidas geométricas en un CFEF, en función de ϕ , para las dos disposiciones de los espejos consideradas y varios valores de ρ . Criterio 1: ---- ; criterio 2: — .

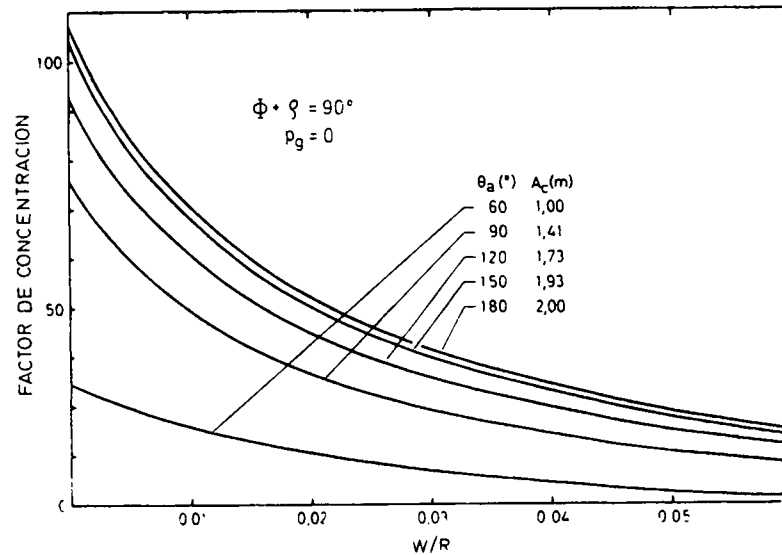


Fig. 6: Factor de concentración de un CFEF en el cual se cumple la condición $\phi + \gamma = 90^\circ$ (ver Fig. 5) y, por lo tanto, $p = 0$, en función de W/R , para distintos valores del ángulo de apertura θ_a (y del correspondiente ancho A_c del concentrador si $R = 1$ m.)

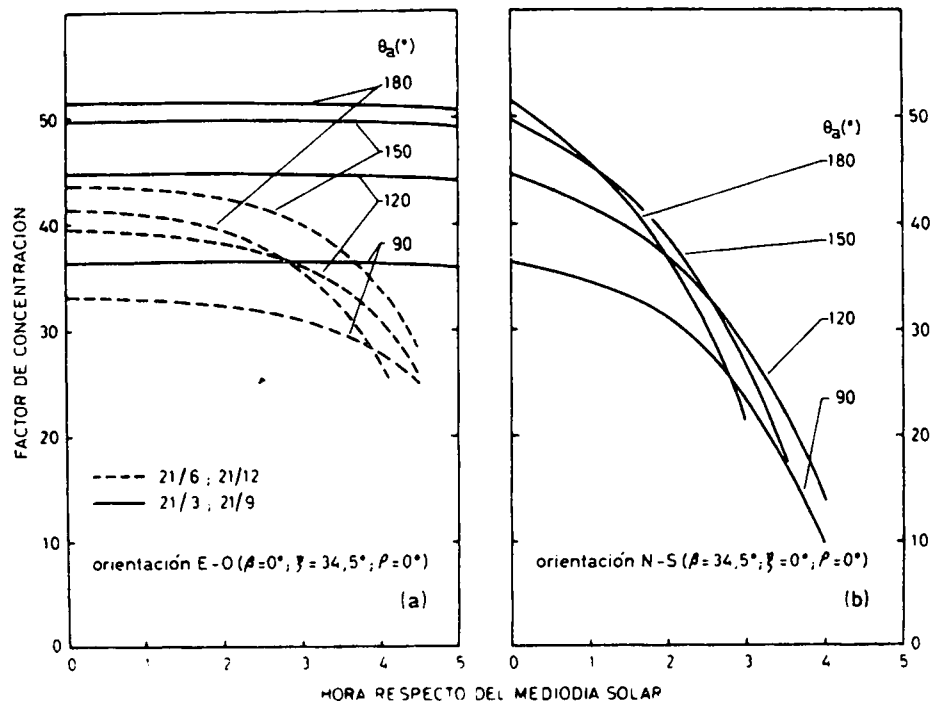


Fig. 7: Variación diaria del factor de concentración de un CFEF con $W/R = 0,02$ ubicado a $34,5^\circ S$ para distintos ángulos de apertura θ_a .
 (a) Orientación E-O. Factores de concentración máximo y mínimo logrables en el año.
 (b) Orientación N-S. El factor de concentración es constante a lo largo del año.

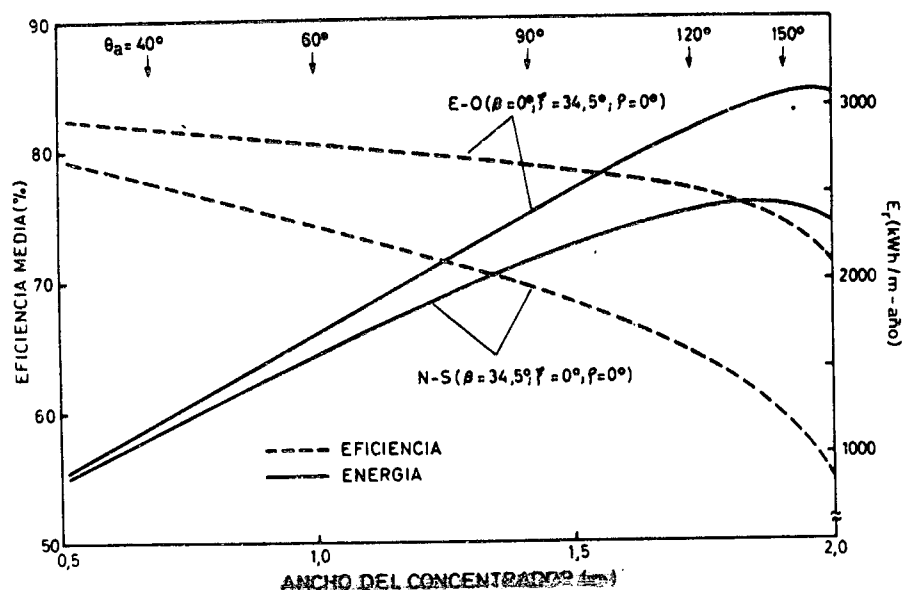


Fig. 8: Eficiencia media anual y energía incidente en el receptor a lo largo de un año (por unidad de longitud del concentrador) en función del ancho de un CFEF con $R = 1$ m, ubicado en Buenos Aires con orientación E-0 o N-S.

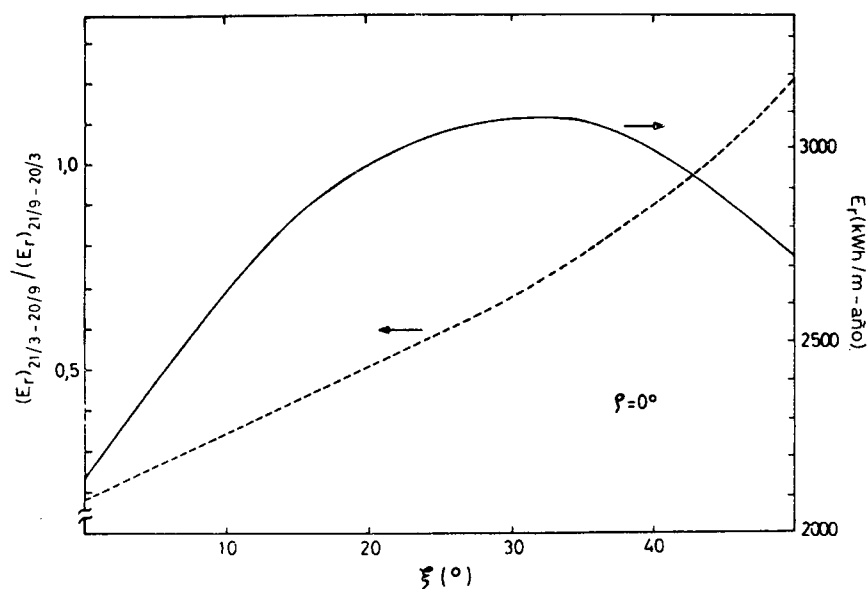


Fig. 9: Energía incidente en el receptor a lo largo de un año y relación y entre las que inciden en los períodos 21/3-20/9 y 21/9-20/3, en función del ángulo. Se ha realizado el cálculo para un concentrador con orientación E-0, ubicado en Buenos Aires, con un ángulo de abertura de 150° y con un radio de 1 m. La energía anual incidente está dada por unidad de longitud del concentrador.