

## CONCENTRADOR SOLAR CILINDRICO A ESPEJOS CONCAVOS GIRATORIOS \*

R.P. Platzek †

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

e  
INVAP Sociedad del Estado

### Resumen

Se presenta un concentrador solar formado por  $(2N+1)$  espejos cilíndricos cóncavos que rotan alrededor de sus generatrices centrales, ubicadas sobre un cilindro de referencia fijo no necesariamente circular. Los espejos están orientados de manera que los rayos provenientes del centro del Sol que se reflejan en las generatrices centrales de los espejos se cortan en una línea paralela al eje del cilindro, ubicada a una distancia  $f$  del eje de rotación del espejo central y contenida en el plano definido por dichos ejes. Para mantener esta línea fija cuando el ángulo de incidencia cambia en  $\Delta\phi_0$ , cada espejo debe girar un ángulo  $\Delta\phi_0/2$ .

Se muestra la distribución de flujo de energía en un plano receptor para este concentrador y se la compara con las de otros concentradores de simetría cilíndrica. Se efectúa una selección de valores apropiados para los parámetros del concentrador propuesto.

### CYLINDRICAL SOLAR CONCENTRATOR WITH CONCAVE ROTARY MIRRORS

#### Abstract

A solar concentrator composed of  $(2N+1)$  concave cylindrical mirrors which rotate around their middle generatrices, is studied theoretically. The rotation axes of the mirrors are also generatrices of a fixed reference cylinder, not necessarily of circular cross section. The mirrors are placed in such a way that the rays coming from the center of the Sun which are reflected along the axes of the mirrors, cross along a line. This line is parallel to the cylinder axis, is situated at a distance  $f$  from the central mirror axis, and is contained in the plane defined by both these axes. To keep this line fixed when the incidence angle changes by  $\Delta\phi_0$ , the mirrors have to be rotated by  $\Delta\phi_0/2$ .

The energy flux distribution in the receiver plane of this concentrator is shown and compared with those of other concentrators of cylindrical symmetry. A selection of appropriate values is made for the parameters of the proposed new concentrator.

---

\*) Patente en trámite.

†) Fallecido el 2 de febrero de 1979. Este trabajo fue redactado en la División Energía Solar de la CNEA sobre la base de los desarrollos y las planillas de datos dejadas por el Dr. Platzek; la comparación del concentrador presentado con otros concentradores fue hecha por J.C. Durán y R.O. Nicolás. Comunicamos este trabajo de R.P. Platzek como reconocimiento y homenaje de la División Energía Solar a quien inició a sus miembros en los estudios de la óptica de los concentradores de radiación.

## 1. Introducción

En diversas aplicaciones de la energía solar es necesario alcanzar temperaturas de operación  $>400$  C. En particular, para la obtención de energía eléctrica a partir de energía térmica, el rendimiento termodinámico crece al *augmentar el salto de temperatura*. Para lograr temperaturas altas con buena eficiencia de conversión de energía solar en térmica, sin el empleo de superficies selectivas, es necesario que en el receptor incida una elevada densidad de flujo de energía, para lo cual se requiere una alta concentración [1].

Entre los concentradores con simetría cilíndrica se destacan: a) concentrador cilíndrico-parabólico, b) concentrador fijo a espejo facetado [2] y c) concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un plano [3].

El concentrador tipo a), si está diseñado adecuadamente, puede producir alta concentración, pero tiene el inconveniente de que hay que mover toda la estructura en conjunto (concentrador y receptor) o, por lo menos, el concentrador, sumado esto a la dificultad de fabricación del espejo parabólico.

En el concentrador tipo b) el espejo facetado es fijo, pero debe moverse el receptor; la concentración que puede lograrse es notablemente inferior que la que es posible alcanzar con un concentrador cilíndrico-parabólico y, además, las pérdidas por apantallamientos y por radiación que incide entre espejos son elevadas. Entre las ventajas que presenta debe mencionarse que, aparte de ser fijo, puede ser construido con espejos planos comerciales. Una posible variante de este tipo de concentrador consiste en reemplazar los espejos planos por cóncavos [4]; de esta forma es posible disminuir considerablemente el número de espejos y aumentar la concentración.

El concentrador tipo c) tiene la ventaja de que el receptor es fijo y sólo hay que girar los espejos alrededor de su eje de simetría longitudinal. Con este tipo de concentrador se pueden lograr factores de concentración elevados, pero presenta pérdidas importantes por apantallamientos o por radiación que incide entre espejos, especialmente para incidencia normal.

En este trabajo se presenta el análisis teórico de un concentrador cilíndrico a espejos cóncavos giratorios que posee características similares al concentrador tipo c) pero que es superior desde el punto de vista óptico (mejor enfoque de los espejos en el receptor) y, además, tiene pérdidas prácticamente nulas por apantallamiento y sombras entre espejos.

Obviamente, la elección final del tipo de concentrador más conveniente para montar una central de generación de energía eléctrica se debe realizar mediante un estudio económico comparativo de los distintos sistemas completos (inclusive cañerías, turbinas, etc.). El resultado de dicho estudio debe expresarse en costo del kWh generado, teniendo en cuenta la vida útil de la central. Aquí nos limitamos exclusivamente a comparar el concentrador propuesto con otros concentradores cilíndricos desde un punto de vista óptico.

## 2. Descripción del concentrador

El concentrador propuesto (ver Fig. 1) consta de un conjunto de espejos cóncavos giratorios cuyos ejes de rotación son generatrices de un cilindro soporte, no necesariamente circular. En particular, consideraremos un concentrador simétrico con soporte circular de radio de curvatura  $\tau$  constituido por  $(2N + 1)$  espejos de anchos  $w_n$ , radios de curvatura  $r_n$  y dispuestos de manera tal que la distancia entre dos espejos sucesivos sea la mínima compatible con el requerimiento de que no se toquen al girar. El receptor del concentrador es fijo.

Los espejos están orientados de tal forma que los rayos provenientes del centro del Sol y reflejados en las generatrices medias de aquéllos se crucen a lo largo de una línea paralela al eje del cilindro, ubicada a una distancia  $f$  del eje de rotación del espejo central y contenida en el plano S definido por dichos ejes. Denominamos  $\Phi_0$  al ángulo complementario del formado por el plano S y la proyección de los rayos provenientes del centro del Sol sobre el plano  $P_t$  perpendicular al eje del cilindro. Si su valor varía en  $\Delta\Phi_0$ , los espejos deben girar un ángulo  $\Delta\Phi_0/2$  para mantener fija la línea donde se cruzan los rayos reflejados.

## 3. Cálculo del factor de concentración en el plano receptor

Consideramos un plano receptor perpendicular al plano S. El cálculo del factor de concentración en dicho plano fue realizado para el caso particular en que el Sol está contenido en el plano  $P_t$ . Para el caso general se debe tener en cuenta el ángulo que forman los rayos solares con el eje del cilindro soporte [5].

En el desarrollo consideramos todas las longitudes en unidades de  $f$ . El cálculo de la distribución de intensidades en el plano receptor se basa sobre el método de trazado de rayos. Se halla la intersección del haz de rayos reflejados en un elemento de superficie del espejo concentrador con dicho plano considerando el disco solar con distribución uniforme, con lo cual la intersección es una elipse con intensidad de radiación aproximadamente uniforme. Suponiendo espejos perfectos definimos ahora el factor de concentración puntual ideal  $C_i(x')$  en un punto de coordenada  $x'$  del plano receptor (ver Fig. 1) como el cociente entre la intensidad incidente en dicho punto y la intensidad solar directa. Integrando la contribución al punto de coordenada  $x'$  de todos los elementos de superficie de un espejo y sumando luego sobre todos los espejos, con un desarrollo análogo al dado en [3,5] se obtiene:

$$C(x') = \frac{2}{\pi} \sum_{n=-N}^N r_n \operatorname{sen} \left( \frac{\Phi_0 + \theta_n + 90^\circ}{2} \right) \int_{\alpha_{\min}^n}^{\alpha_{\max}^n} \frac{\sqrt{a^2 - (x' - x'_c)^2}}{a^2} d\alpha. \quad (1)$$

Aquí  $\alpha$  es una coordenada angular sobre cada espejo medida desde el centro de curvatura del mismo ( $-\alpha_n^0 \leq \alpha \leq \alpha_n^0$ , con  $\alpha_n^0 = w_n/(2r_n)$ ),  $a$  es el semieje mayor de la elipse (corresponde a la dirección  $x'$ ) y  $x'_c$  es el centro de la misma;  $a$  y  $x'_c$  son funciones de  $n$  y  $\alpha$ . Los límites de integración  $\alpha_{\min}^n$  y  $\alpha_{\max}^n$  definen la zona del espejo que contribuye al flujo de energía en el plano receptor y se calculan teniendo en cuenta las sombras y los apantallamientos entre espejos.

En el Apéndice se dan las fórmulas utilizadas para calcular  $\theta_n$ ,  $\alpha_{\min}^n$ ,  $\alpha_{\max}^n$ ,  $a$  y  $x_c'$ .

#### 4. Resultados y conclusiones

En la Fig. 2 se compara la distribución del factor de concentración puntual en el plano receptor del concentrador propuesto con las correspondientes a otros concentradores cilíndricos; el cálculo de éstas fue hecho aplicando el ya mencionado método descrito en Refs. [3,5]. Para los parámetros que definen cada concentrador se consideraron valores razonables desde los puntos de vista teórico y práctico. Para los dos concentradores con espejos giratorios y para el cilíndrico parabólico fue posible hacer ésto manteniendo similares sus áreas de abertura (ver cuadro en Fig. 2.a); en cambio, las de los concentradores CFEF resultaron significativamente menores, debido esencialmente a sus relativamente pequeños radios de curvatura en unidades de  $f^\dagger$ . De la figura se observa que:

- a) El concentrador cilíndrico parabólico es el que produce factores de concentración puntuales más elevados ( $\sim 190$ ). Por otra parte, ya que este concentrador se utiliza girándolo de manera que los rayos solares incidentes sean en todo momento paralelos a su plano de simetría, la curva de distribución del factor de concentración puntual característica del concentrador resulta independiente de la posición del Sol en el plano  $P_t$ .
- b) Para incidencia normal, el concentrador propuesto alcanza valores del factor de concentración similares a los del cilíndrico parabólico, apartándose notablemente para valores de  $\phi_0$  alejados de  $90^\circ$ . Esto último se debe principalmente al factor que proyecta la radiación incidente sobre la dirección perpendicular al plano de abertura, factor que aparece para todo concentrador con soporte fijo.
- c) El concentrador a espejos cóncavos giratorios sobre soporte plano tiene pérdidas importantes debido a que parte de la radiación incide sobre zonas no reflectantes y a los apantallamientos producidos entre espejos, especialmente para incidencia cercana a la normal. Por otra parte, se puede acotar que desde el punto de vista óptico, este concentrador es inferior al CECG con soporte curvo ya que, si para lograr mayores factores de concentración, se consideran anchos del concentrador grandes ( $\geq 2$ ), las contribuciones de los espejos extremos ensanchan la distribución más de lo que lo harían sobre un soporte curvo.
- d) El concentrador fijo a espejo facetado de espejos planos produce una distribución de intensidades en el plano receptor muy ancha debido a la falta de enfoque de cada uno de los elementos especulares. En consecuencia, para lograr factores de concentración razonables para aplicaciones a temperaturas de  $\sim 400$  C, es necesario utilizar espejos angostos, por ejemplo de ancho 0,01; esto implica el uso de una gran cantidad de espejos ( $\sim 100$ ). Construyendo este tipo de concentrador con espejos curvos, se reduce aproximadamente al 25 % el número de espejos requeridos para la misma abertura, lográndose simultáneamente factores de concentración 50 % mayores para  $\phi_0 = 90^\circ$  y del mismo

---

$\dagger$ ) Aunque para este tipo de concentrador no existe una distancia focal definida, se puede tomar como tal la correspondiente a incidencia normal, es decir  $f = 2R$ , donde  $R$  es el radio de cilindro directriz.

orden para  $\phi_0 = 50^\circ$ ; esto último se debe a que para ángulos de incidencia alejados de la normal la mayoría de los espejos quedan desenfocados. Para valores de  $\phi_0$  alejados de  $90^\circ$ , también en estos concentradores una parte importante de la radiación incidente se pierde por los apantallamientos producidos entre espejos o por incidir sobre zonas no reflectantes entre bordes de espejos.

A fin de seleccionar valores apropiados de los parámetros del concentrador propuesto, se analizaron diferentes combinaciones considerando únicamente espejos de igual ancho e igual radio de curvatura, por ser ésta la solución más económica ( $w_n = w, r_n = r$ ).

En la Fig. 3 se muestran dos pares de espejos correspondientes a  $\tau < 2$  (a) y  $\tau > 2$  (b), para un mismo  $\phi_0$ ; se observa que en el segundo caso, que incluye  $\tau \rightarrow \infty$ , aparecen pérdidas por apantallamientos y espacios no reflectantes entre espejos, lo que no ocurre en el primero a pesar de que un espejo produce sombra sobre el siguiente. En la Fig. 4 se dan el factor de concentración medio ideal y las pérdidas geométricas en el receptor<sup>†</sup> en función de  $\phi_0$  para concentradores con valores  $\tau$  entre 1 y 2. Se observa que al pasar  $\tau$  de 1 a 2, el factor de concentración medio crece, si bien con tendencia a saturarse; el incremento es de  $\sim 6\%$ , mientras que las pérdidas sólo varían en  $\sim 1\%$ , por lo que parece razonable elegir  $\tau$  ligeramente menor que 2.

En la Fig. 5 se da el factor de concentración medio ideal en función de  $\phi_0$  para dos juegos de parámetros del concentrador y distintos valores de  $r$ . A medida que aumenta el número de espejos el ancho de la distribución en el plano receptor crece, por lo que, tomando un ancho  $w_r$  del receptor fijo y menor que el de la distribución, si bien aumentan las pérdidas geométricas en el receptor, el factor de concentración medio se incrementa simultáneamente en forma considerable. En el caso de la Fig. 5, si bien se ha aumentado  $w_r$  en  $10\%$  al pasar de  $N=13$  a  $N=20$ , para incidencia normal de la radiación las pérdidas aumentaron de  $3-7\%$  a  $8-10\%$ , incrementándose el factor de concentración medio ideal en  $\sim 25\%$ . Por otra parte, como para un conjunto de parámetros fijos, al variar  $r$  prácticamente no se modifica el área de abertura del concentrador, mayores pérdidas implican factores de concentración menores, por lo que, para seleccionar  $r$ , es suficiente analizar la variación de estos factores en función de  $r$ . De la Fig. 5 se deduce que:

- Para el rango de  $N$  ilustrado, los valores máximos del factor de concentración medio ideal se alcanzan para  $r$  entre 2,2 y 2,3.
- A medida que aumenta el área de abertura del concentrador, el valor óptimo de  $r$  también aumenta. Esto se debe a que los espejos extremos, para estar enfocados en el receptor, requieren radios de curvatura mayores mientras mayores sean sus distancias al mismo. Dado que  $r_n = r$ , el valor óptimo de  $r$  resulta de un promedio de los valores óptimos de  $r_n$ , pesado mediante una función apropiada que incluye la dependencia respecto de  $\phi_0$ .

Con respecto a la elección de los demás parámetros, se compararon los factores de concentración que se obtienen para concentradores con diversos valores de  $N$  y de  $w$ . Por ejemplo, es posible obtener factores medios de concentración elevados (80-160) con  $N = 16-20$  y  $w = 0,05$ , sin que las pérdidas geométricas en el receptor superen el  $10\%$  si a éste se le da el ancho apropiado.

<sup>†</sup>) Definimos como pérdidas geométricas en el receptor a la fracción de la energía incidente en el plano receptor que no incide en el receptor propiamente dicho.

## APENDICE: Fórmulas para el cálculo de $C(x')$

A continuación se listan, sin dar su deducción, las expresiones necesarias para calcular el factor de concentración puntual  $C(x')$  (ec.(1)) de un concentrador CECG con cilindro soporte de sección circular. En las expresiones aparecen variables adicionales que permiten simplificar el cálculo de las incluidas en la ec.(1); se las desarrolló explícitamente al final del mencionado listado.

CALCULO DE  $\theta_n$  :

$$\theta_0 = 0, \quad \theta_{-n} = -\theta_n, \quad \theta_n = \arctg \left( \frac{\zeta \operatorname{sen} \delta_n}{\zeta \cos \delta_n - \zeta + 1} \right),$$

CALCULO DE  $\alpha_{\min}^n$  :

$$\alpha_{\min}^{-N} = -\alpha_0^N.$$

Si  $n > -N$  y  $\phi_0 < \xi(n-1)$ , vale

$$\alpha_{\min}^n = \left[ \frac{w_{n-1} (\operatorname{sen} \gamma_{n-1} \cotg \phi_0 + \cos \gamma_{n-1}) - \zeta (\operatorname{sen} \delta_n - \operatorname{sen} \delta_{n-1}) - \zeta (\cos \delta_{n-1} - \cos \delta_n) \cotg \phi_0}{r_n (\operatorname{sen} \gamma_n \cotg \phi_0 + \cos \gamma_n)} \right]_i;$$

si resulta  $\alpha_{\min}^n < -\alpha_0^N$  es  $\alpha_{\min}^n = -\alpha_0^N$ .

Si  $n > -N$  y  $\phi_0 \geq \xi(n-1)$ , es  $\alpha_{\min}^n = -\alpha_0^N$ .

CALCULO DE  $\alpha_{\max}^n$  :

$$\alpha_{\max}^N = \alpha_0^N.$$

Si  $n < N$  y  $\phi_0 > \xi(n+1)$ , vale

$$\alpha_{\max}^n = \left[ \frac{-\frac{w_{n+1}}{2} (\operatorname{sen} \gamma_{n+1} \cotg \phi_0 + \cos \gamma_{n+1}) + \zeta (\operatorname{sen} \delta_{n+1} - \operatorname{sen} \delta_n) + \zeta (\cos \delta_n - \cos \delta_{n+1}) \cotg \phi_0}{r_n (\operatorname{sen} \gamma_n \cotg \phi_0 + \cos \gamma_n)} \right]_i;$$

si resulta  $\alpha_{\max}^n > \alpha_0^n$  es  $\alpha_{\max}^n = \alpha_0^n$ .

Si  $n < N$  y  $\phi_0 < \xi(n+1)$ , es  $\alpha_{\max}^n = \alpha_0^n$ .

En todos los casos, para  $n < 0$  es  $\alpha_{\max}^n = \alpha_0^n$ .

CALCULO DE  $a$  Y  $x'_c$ :

$$a = \frac{-g_n \cdot \beta_0}{\cos \theta_n} + \frac{1}{\cos \theta_n} \left\{ r_n \operatorname{sen} \left( \frac{90^\circ - \phi_0 - \theta_n}{2} \right) + \left[ r_n \cos \left( \frac{90^\circ - \phi_0 - \theta_n}{2} \right) - 4g_n \right] \operatorname{tg} \theta_n \right\} \beta,$$

$$x'_c = t_1 \alpha + t_2 \alpha^2.$$

Las expresiones de  $a$  y  $x'_c$  provienen de un desarrollo en serie a segundo orden en  $\alpha$  y  $\beta_0$ .

-----

En lo que precede,  $\delta_n$  es el ángulo con vértice en el centro de curvatura del cilindro soporte que define la posición del espejo  $n$  con respecto al central:

$$d_0 = 0, \quad d_{-n} = -d_n, \quad d_n = d_{n-1} + \operatorname{arcsen} \left( \frac{w_{n-1} + w_n}{2\bar{z}} \right).$$

Además

$$\gamma_n = \frac{90 - \phi_0 + \theta_n}{2}, \quad \xi(m) = 90^\circ - (d_m + d_n) + \frac{(\theta_m + \theta_n)}{2},$$

$$g_n = \sqrt{1 + 2\bar{z}(\bar{z}-1)(1 - \cos d_n)},$$

$$t_1 = \frac{1}{\cos \theta_n} \left[ r_n \cos (\gamma_n - \theta_n) - 2g_n \right],$$

$$t_2 = \frac{1}{\cos \theta_n} \left[ \frac{3}{2} r_n \operatorname{sen} (\gamma_n - \theta_n) + 2t_1 \operatorname{sen} \theta_n \right].$$

## Referencias:

1. J.C.Durán y J.A.Moragues. Análisis y selección de superficies selectivas para temperaturas elevadas. Actas 3a. Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza, pág.205 (1977).
2. R.O.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 3a. Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza, pág.191 (1977).
3. J.H.Davison y A.J.Wendt. SLATS Line Focus Solar Collector. Actas ERDA. Conference on Concentrating Solar Collectors, Georgia, EE.UU., pág.2-29 (1977).
4. R.P.Platzeck. Utilización de elementos cilíndricos en concentradores fijos a espejo facetado. Actas 4a. Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, pág. 155 (1978).
5. J.C.Durán y R.O.Nicolás. Generalización del análisis óptico bidimensional de concentradores con simetría cilíndrica. Actas 5a. Reunión de Trabajo de ASADES, Córdoba, pág.125 (1979).



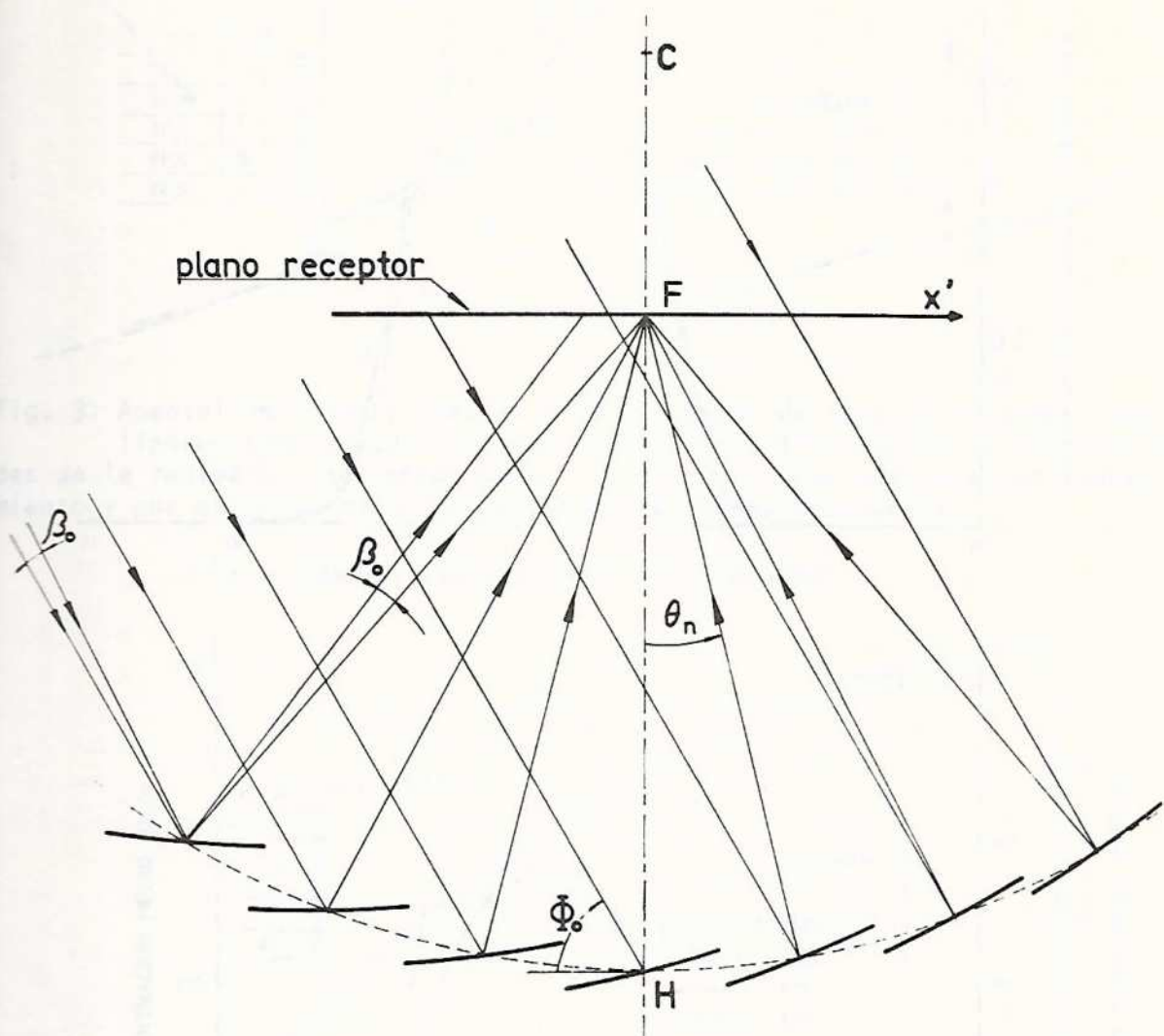


Fig. 1: Sección del concentrador a espejos cóncavos giratorios con cilindro soporte de sección circular. El punto C indica el centro de curvatura del cilindro soporte ( $\overline{CH} = r =$  radio de curvatura) y el F la línea de cruce de los rayos reflejados en las generatrices medias de los espejos ( $\overline{FH} = f$ ).  $\theta_n$  es el ángulo con vértice en F que define la posición del espejo n con respecto al espejo central.

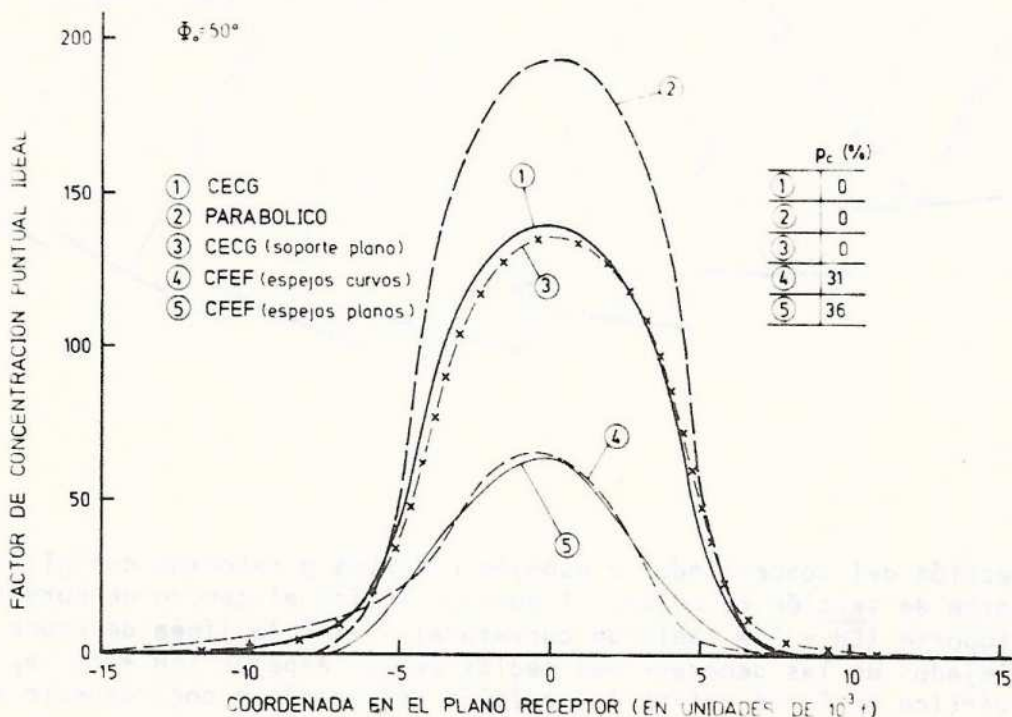
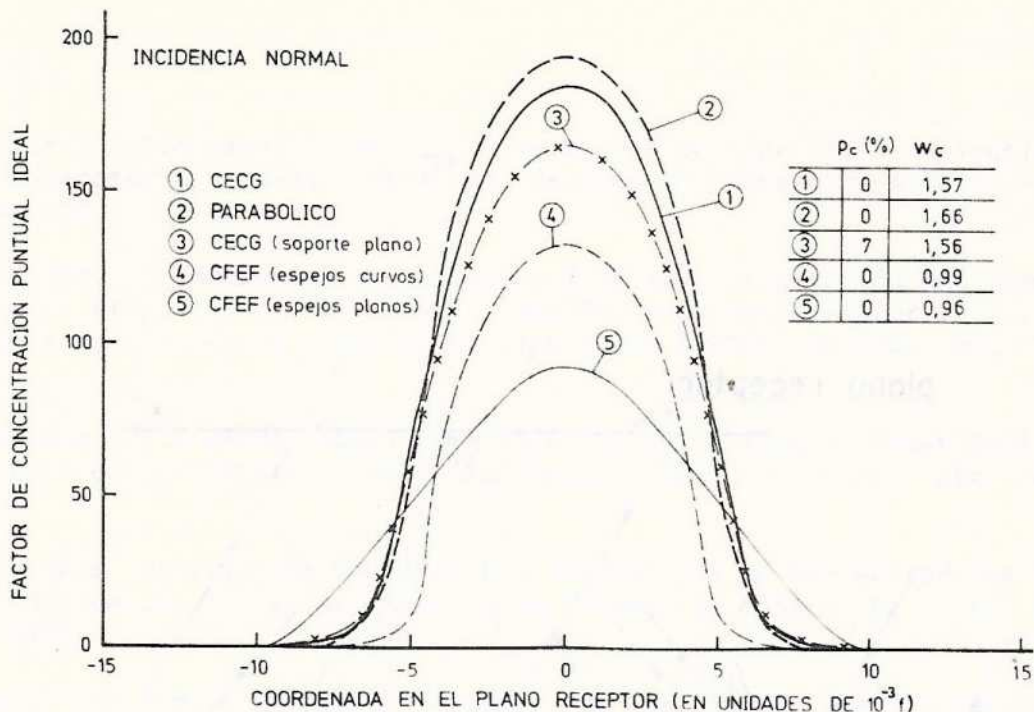


Fig. 2: Factor de concentración puntual ideal en función de la coordenada  $x'$  en el plano receptor para cinco tipos de concentradores cilíndricos: ① a espejos cóncavos giratorios con soporte circular ( $N = 16$ ;  $r = 2,2$ ;  $\tau = 1,5$ ;  $w = 0,05$ ); ② a espejo parabólico ( $\theta_{\max} = 45^\circ$ ); ③ a espejos cóncavos giratorios con soporte plano ( $N = 19$ ;  $r = 2,3$ ;  $w = 0,04$ ); ④ a espejo facetado fijo con elementos especulares curvos ( $N = 12$ ;  $r = 2$ ;  $w = 0,04$ ) y ⑤ a espejo facetado fijo con elementos especulares planos ( $N = 48$ ;  $w = 0,01$ ).

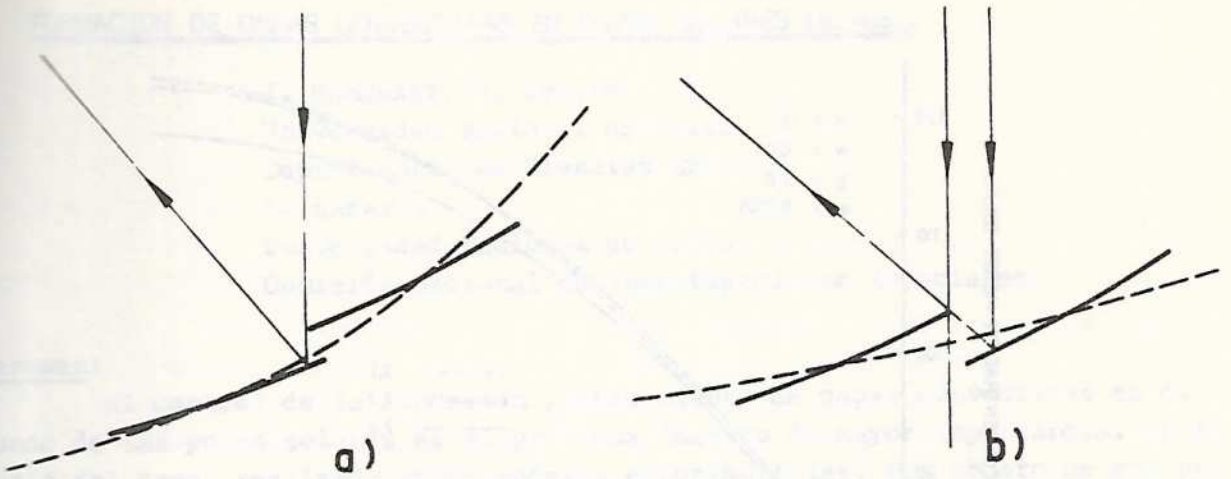


Fig. 3: Apantallamientos y sombras para dos pares de espejos ubicados sobre cilindros soporte con distinto  $\tau$ . Para  $\tau < 2$  (Fig. a) no se originan pérdidas de la radiación incidente; para  $\tau > 2$  (Fig. b), hay pérdidas por apantallamiento y por espacios no reflectantes entre bordes de espejos.

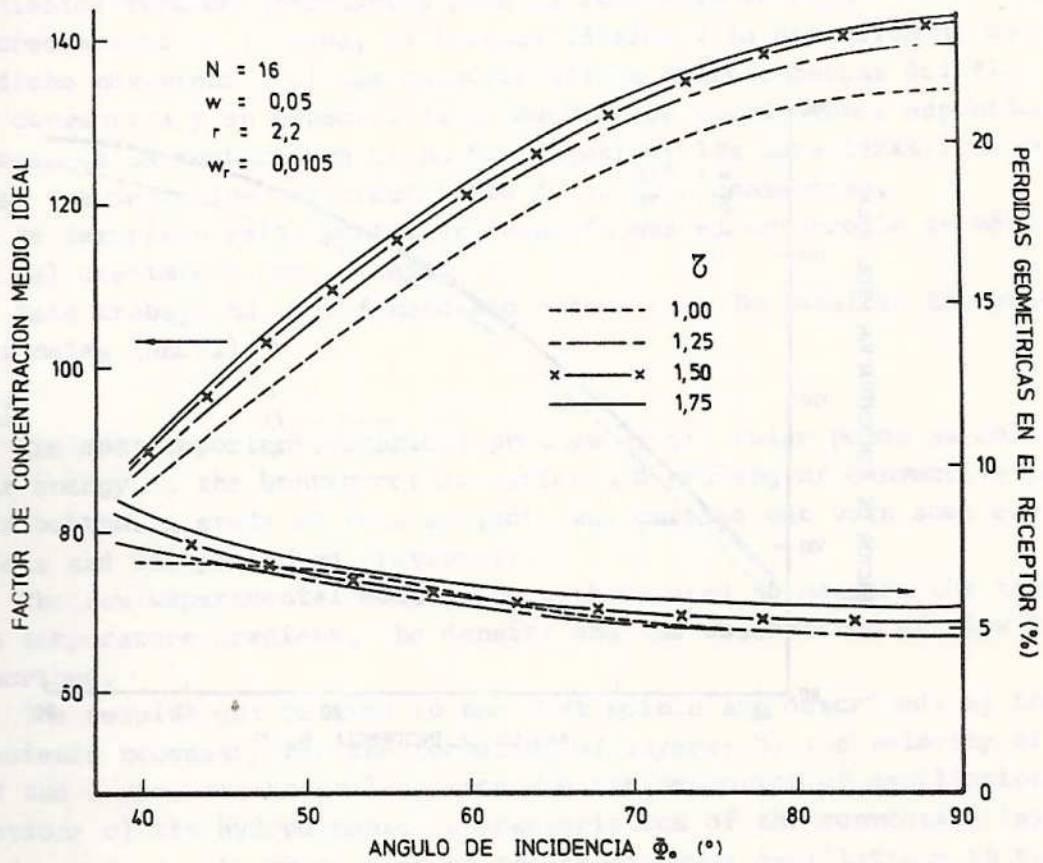


Fig. 4: Factor de concentración medio ideal y pérdidas geométricas en el receptor en función de  $\phi_0$ , para concentrador tipo CECG con valores de  $\tau$  entre 1 y 2.

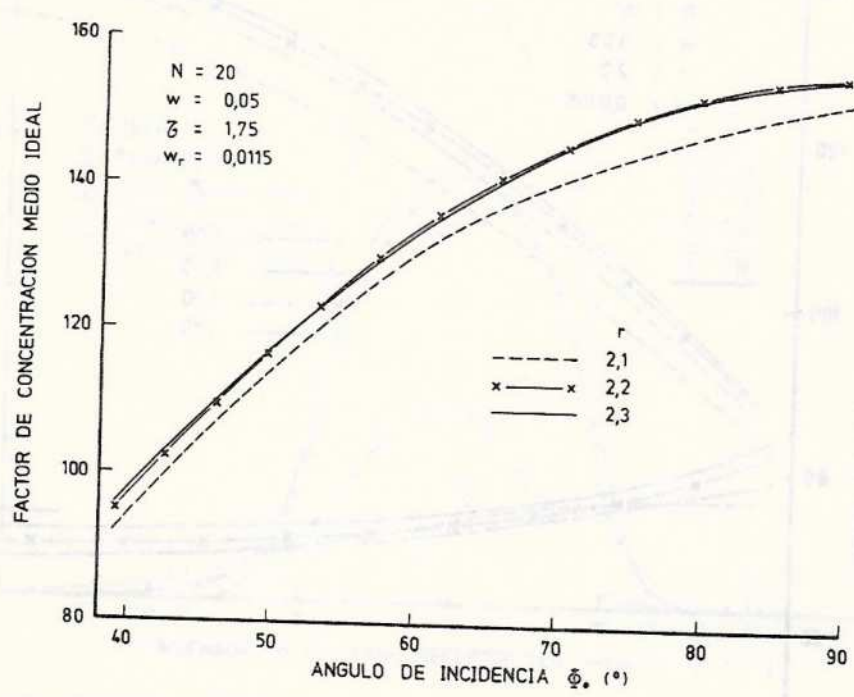
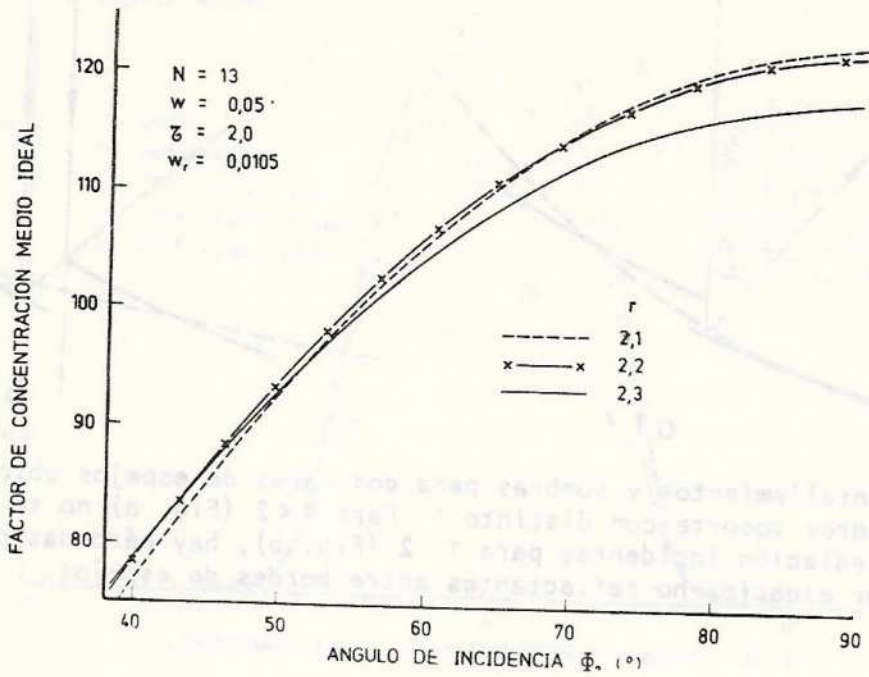


Fig. 5: Factor de concentración medio ideal en función de  $\Phi_0$  para distintos valores de  $r$  y dos juegos de parámetros del concentrador.