

CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO DE LA CNEA
CONSIDERACIONES TEORICAS PARA EL DISEÑO
DE UN PROTOTIPO INDUSTRIAL †

R.O.Nicolás y J.C.Durán

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

Resumen

Para encarar el diseño de un prototipo industrial de un concentrador fijo a espejo facetado (CFEF) (1,2), resulta de utilidad analizar teóricamente algunos aspectos relacionados, esencialmente, con los requerimientos de precisión y su influencia en la eficiencia del concentrador.

Los aspectos analizados para CFEF no perfectos (3) son: (a) error en la posición del plano receptor, (b) posibilidad de agregar al receptor un segundo concentrador del tipo parabólico compuesto (4) y (c) posibles variantes en la ubicación relativa de los espejos.

Algunos de estos análisis son de utilidad para la simulación del funcionamiento de este tipo de concentradores, en particular, para los prototipos de laboratorio (1,2) ya instalados en la CNEA.

1. Introducción

La División Energía Solar prevé en su programa el desarrollo de un prototipo industrial de concentrador fijo a espejo facetado (CFEF) (1,2), en base a la experiencia obtenida con dos prototipos de laboratorio actualmente en prueba (ver Fig. 1). Para encarar el diseño resulta de utilidad analizar teóricamente algunos aspectos relacionados, esencialmente, con los requerimientos de precisión y su influencia en la eficiencia del concentrador.

Tomando como base el desarrollo para concentradores cilíndricos no perfectos presentado en (3)*, se analizan los siguientes aspectos: (a) influencia del error en la posición del plano receptor sobre los factores de concentración y las pérdidas, (b) posibilidad de agregar al receptor un segundo concentrador del tipo parabólico compuesto y (c) posibles variantes en la ubicación relativa de los espejos. Los dos primeros puntos están referidos, como ya fue mencionado, a los requerimientos de precisión, mientras que el último se ha analizado debido a la posibilidad de que para la construcción del prototipo

†) Trabajo realizado dentro del programa "Generación de electricidad por conversión fototérmica de la energía solar", parcialmente financiado con subsidio de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

* El mencionado desarrollo tiene en cuenta el posible error en la posición angular de los espejos.

industrial se tropiecen con algunas dificultades constructivas para respetar los criterios de ubicación relativa de los espejos analizados previamente (1).

Las definiciones de los parámetros utilizados son listadas al final del trabajo.

2. Error en la posición del receptor

Para determinar la influencia del error en la posición del receptor se calcula la distribución del factor de concentración en planos desplazados una distancia d_r (medida en dirección radial) con respecto a la posición correcta del plano receptor. Para calcular (3) el factor de concentración puntual $C(x')$ es necesario conocer la expresión del semieje mayor a y del centro x'_0 de la elipse definida por la intersección del plano receptor con el cono de rayos reflejados en un punto dado del concentrador. Para un CFEF, al considerar un desplazamiento d_r , se obtiene:

$$a = a(d_r = 0) + \beta'_0 d_r / (\cos^2(\theta_n/2) \sin \phi_0) \quad (1)$$

y

$$x'_0 = x'_0(d_r = 0) - d_r [\tan(\theta_n/2) + 2\varepsilon/\cos^2(\theta_n/2)] / \sin \phi_0, \quad (2)$$

donde $a(d_r = 0)$ y $x'_0(d_r = 0)$ están dados por las expresiones (19) y (20) de Ref. 3 y corresponden al plano receptor ubicado en su posición correcta. Una vez calculado $C(x')$ se obtienen el factor de concentración medio $\bar{C}(w_r)$ y las pérdidas geométricas en el receptor $p_g(w_r)$ y en el concentrador p_c .

Utilizando el desarrollo expuesto se calcularon el factor de concentración y las pérdidas para dos concentradores: uno perfecto ($\bar{\varepsilon} = \sigma = 0$)[†] y otro no perfecto ($\bar{\varepsilon} = 0$ y $\sigma = 4$ mrad)[†], ambos con orientación Este-Oeste y con los parámetros característicos de los prototipos actualmente en prueba: $w = 0,02 R$ y $\theta_{max} = 72,5^\circ$. En el presente trabajo sólo se muestran los gráficos más ilustrativos correspondientes a algunas épocas del año. En la Fig. 2 se ha graficado, en los equinoccios, $C(x')$ para distintos desplazamientos d_r del receptor al mediodía solar y a tres horas respecto del mismo. En las Figs. 3 y 4 se muestran, respectivamente, las variaciones de $\bar{C}(w_r)$ y de $p_g(w_r)$ en función del desplazamiento d_r para distintos valores del ancho del receptor w_r al mediodía solar en los equinoccios y a tres horas respecto del mediodía solar en los solsticios. Es interesante señalar que, al desplazar el plano receptor de su posición correcta ($d_r = 0$), se presentan dos efectos: (a) para cada haz de rayos reflejados en cualquier punto del concentrador disminuye (aumenta) el tamaño de las elipses definidas por la intersección de aquél con el plano receptor al acercar (alejar) el mismo a los espejos, lo que tiende a aumentar (disminuir) el factor de concentración, y (b) se produce un "desenfoque"[#] que tiende a disminuir el factor de concentración. Al acercar el plano receptor a los espejos

[†] Nos limitamos a considerar que cada elemento especular de un concentrador no perfecto se aparta de su posición angular correcta según una distribución gaussiana de valor medio ε y desviación standard σ .

[#] Los rayos reflejados en los centros de los elementos especulares no se cruzan en un plano receptor con $d_r \neq 0$.

($d_r < 0$) dichos efectos se contraponen observándose de la Fig. 2 que predomina el segundo en el intervalo $-0,015 R \leq d_r < 0$ y el primero para $d_r \leq -0,015 R$; en cambio, al alejar el plano receptor de los espejos ($d_r > 0$) ambos efectos contribuyen a disminuir el factor de concentración. Este hecho explica la no coincidencia de las curvas 2-3 y 4-5 de la Fig. 2 y la asimetría que presentan las Figs. 3 y 4. De estas últimas se observa que el máximo del factor de concentración medio $\bar{C}(w_r)$ y el mínimo de las pérdidas geométricas en el receptor $p_g(w_r)$ se encuentran en el intervalo $-0,015 R \leq d_r \leq -0,004 R$ dependiendo del valor de σ considerado y del ángulo κ que forman los rayos que inciden en el concentrador con un plano perpendicular al eje del mismo.

Las conclusiones más importantes que surgen del análisis anterior son: (a) es posible variar la posición del plano receptor dentro del intervalo $-0,02 R \leq d_r \leq 0,005 R$ sin que el $\bar{C}(w_r)$ varíe en más de un 2 % y (b) la influencia del error en la posición del plano receptor sobre el $\bar{C}(w_r)$ y $p_g(w_r)$ es mayor cuanto menor sea el σ que caracteriza el error en la posición de los elementos especulares de los concentradores.

3. Segundo concentrador en el receptor

La reducción del número de elementos especulares de un CFEF, aumentando sus anchos, puede simplificar notablemente el montaje, disminuyendo, además, los requerimientos de precisión. Esto puede introducir una importante reducción de los costos de construcción cuando se desea lograr un nivel de producción industrial. Sin embargo, el ensanchamiento de los elementos especulares produce una disminución no deseable del factor de concentración, lo que implica una disminución de la eficiencia de conversión de energía solar en térmica en el receptor (5). Para contrarrestar este efecto puede utilizarse (ver por ej. Ref. 6) un segundo concentrador cuyo plano de abertura coincida con el plano receptor del CFEF.

Existen diversos tipos de concentradores que pueden utilizarse como segundo concentrador, destacándose los siguientes: concentrador parabólico compuesto (CPC), concentrador cilíndrico de sección circular y concentrador constituido por dos espejos planos en forma de V truncada. El CPC es el que mejor se adapta a este tipo de uso dado que tiene la propiedad de que todos los rayos que inciden sobre su plano de abertura llegan a su receptor siempre que las proyecciones de los mismos sobre un plano perpendicular al eje del concentrador formen con el plano de simetría un ángulo comprendido entre $-\theta_a$ y θ_a . En este trabajo analizamos únicamente el incremento en el factor de concentración de un CFEF cuando se utiliza un segundo concentrador del tipo CPC; sin embargo, para la elección final de un segundo concentrador para un prototipo industrial debe realizarse un análisis de eficiencia y costos de los diversos concentradores posibles.

El factor de concentración medio de un CPC perfecto coincide para incidencia normal con el cociente C_A entre las áreas de abertura y receptora del mismo y está dado por (4):

$$C_A = 1 / \sin \theta_a . \quad (3)$$

Para un CPC real es necesario agregar un factor de corrección $f < 1$ que tenga en cuenta las imperfecciones y la reflectividad del espejo.

Se puede ver que para utilizar un CPC como segundo concentrador de un CFEF no introduciendo pérdidas adicionales, debe verificarse $\theta_a > \theta_{\max} / 2$ (el caso de mayor concentración corresponde a $\theta_a = \theta_{\max} / 2$), donde θ_{\max} es la semiapertura angular del CFEF medida desde el centro del cilindro directriz; por lo tanto, θ_{\max} debe ser un importante parámetro a tener en cuenta para la elección del conjunto CFEF-CPC. El factor de concentración medio $\bar{C}(w_r)$ para dicho conjunto está dado por:

$$\bar{C}'(w_r) = \bar{C}(w_r) C_A f, \quad (4)$$

donde $\bar{C}(w_r)$ es el factor de concentración medio para el CFEF sin segundo concentrador, mientras que C_A está dado por la Ec. (3).

En la Fig. 5 se ha graficado $\bar{C}(w_r)$, con y sin segundo concentrador, en función del ancho de los espejos w para concentradores con dos valores del semiángulo de apertura ($\theta_{\max} \approx 50^\circ$ y $\theta_{\max} \approx 70^\circ$) y dos valores de la desviación standard ($\sigma = 0$ y $\sigma = 4 \text{ mrad}$) todos con $\bar{\epsilon} = 0$, considerando, además, $f = 1$. Se muestra sólo el caso correspondiente a los solsticios para el mediodía solar y para tres horas respecto del mismo pero las conclusiones que se extraen resultan independientes de la época del año considerada. De la mencionada figura se pueden extraer conclusiones cuantitativas acerca de la posibilidad, mencionada anteriormente, de aumentar el ancho de los espejos, al agregar un segundo concentrador, sin disminuir la eficiencia del conjunto. Para los ejemplos que se dan a continuación se tomó como referencia el ancho de los espejos del prototipo de laboratorio ($w = 0,020 \text{ R}$).

- (a) Para $\theta_{\max} \approx 50^\circ$ y $\sigma = 0$, la utilización del segundo concentrador permite aumentar w de $0,020 \text{ R}$ a $0,070 - 0,075 \text{ R}$ obteniendo el mismo valor de $\bar{C}(w_r)$;
- (b) Para $\theta_{\max} \approx 50^\circ$ y $\sigma = 4 \text{ mrad}$ si se utilizan espejos de ancho $w = 0,080 \text{ R}$ con segundo concentrador, $\bar{C}(w_r)$ aumenta $\approx 50\%$ con respecto al caso $w = 0,020 \text{ R}$ sin CPC;
- (c) Para $\theta_{\max} \approx 70^\circ$ y $\sigma = 0 \text{ mrad}$, se puede aumentar w de $0,020 \text{ R}$ a $0,045 - 0,050 \text{ R}$ obteniendo el mismo valor de $\bar{C}(w_r)$;
- (d) Para $\theta_{\max} = 70^\circ$ y $\sigma = 4 \text{ mrad}$, al utilizar espejos de $w = 0,080 \text{ R}$ se aumenta el valor $\bar{C}(w_r)$ en un $8-10\%$ con respecto al caso $w = 0,020 \text{ R}$ sin CPC;
- (e) Para obtener el mismo $\bar{C}(w_r)$ que se obtiene con un concentrador de $w = 0,020 \text{ R}$ y $\theta_{\max} \approx 70^\circ$ sin CPC, utilizando uno de $\theta_{\max} \approx 50^\circ$ y con CPC el w debe estar entre $0,055 \text{ R}$ y $0,060 \text{ R}$ para $\sigma = 0$ y entre $0,100$ y $0,110 \text{ R}$ para $\sigma = 4 \text{ mrad}$.

En resumen, la utilización del segundo concentrador del tipo CPC permite aumentar considerablemente el ancho de los elementos especulares, especialmente para valores altos de σ . Es conveniente destacar que en este análisis se ha considerado un CPC perfecto; al considerar uno no perfecto ($f < 1$) van a variar los valores particulares dados anteriormente pero no se modificarán significativamente las conclusiones generales.

4. Variantes en la ubicación relativa de los espejos

Una de las posibilidades que se estudian para la construcción del prototipo industrial consiste en la fabricación de una base de cemento sobre la cual se montan los elementos especulares. Con el fin de simplificar el montaje y

para lograr la precisión requerida es conveniente que cada módulo de CFEF esté formado por un solo bloque de cemento. Sin embargo, si se respetaran los criterios de ubicación de los espejos dados en (1) esto sería en la práctica, muy difícil de realizar. Por esta razón, en esta sección analizamos posibles variantes en la ubicación relativa de los espejos que permitan la construcción de los módulos con un solo bloque.

La variante que se propone, que denominamos criterio III, consiste en colocar los espejos de manera tal que los bordes de dos sucesivos se encuentren sobre un plano que forma un ángulo ξ con la perpendicular al espejo tangente (ver Fig. 6). Nótese que el criterio I (1) corresponde al criterio III para $\xi = 0^\circ$. El criterio II consiste en que los bordes de dos espejos sucesivos se encuentren sobre un plano perpendicular al espejo inferior del par considerado, por lo cual, dichos bordes se superponen (ver Fig. 6)

Las pérdidas p_c en el concentrador dependen de la ubicación relativa de los espejos y es función del ángulo de incidencia ϕ_0 . En particular, es claro que para incidencia cercana a la normal ($\phi_0 \simeq 90^\circ$) los concentradores construidos según el criterio III con $\xi > 0^\circ$ tienen valores de p_c mayores que aquellos construidos según los criterios I y II. Como contrapartida, los primeros tienen la ventaja ya mencionada de que permiten en la práctica la construcción de la base en un solo bloque sumado al hecho de que, para igual ancho w , disminuye el número de espejos utilizados para la misma abertura del concentrador.

En la Fig. 7 se ha graficado, para dos valores del semiángulo de abertura del concentrador ($\theta_{\max} = 50^\circ$ y $\theta_{\max} = 72,5^\circ$), p_c en función de ϕ_0 para el criterio II y para $\xi = 0^\circ$ (criterio I), $\xi = 5^\circ$ y $\xi = 10^\circ$. Es conveniente recalcar que p_c no depende del ángulo κ y tampoco, en una muy buena aproximación, del σ considerado. La comparación se hace con el criterio II pues de acuerdo a lo mostrado en Ref. 7 es el que introduce menores pérdidas a lo largo del año; esto se debe, a que la mayor contribución energética se realiza para $70^\circ \lesssim \phi_0 \lesssim 110^\circ$. Se observa que para $\xi = 5^\circ$ la máxima pérdida adicional que se introduce es de 3% para $\theta_{\max} = 50^\circ$ y de 6% para $\theta_{\max} = 72,5^\circ$ con respecto al criterio II; mientras que, para valores bajos de ϕ_0 , p_c resulta en ambos casos menor que en el criterio II. Por otra parte, para el mismo valor de ξ el número de espejos se reduce en $\sim 10\%$ para $\theta_{\max} = 50^\circ$ y en $\sim 17\%$ para $\theta_{\max} = 72,5^\circ$. Mientras tanto para $\xi = 10^\circ$ el máximo de pérdidas que se introducen es, respectivamente, de $\sim 6\%$ y $\sim 10\%$, con una reducción del número de espejos del $\sim 12\%$ y $\sim 20\%$.

Del análisis anterior se infiere que, el aumento en los costos debido a la disminución de la eficiencia que se produce cuando se utiliza el criterio III, se puede compensar por la reducción del número de espejos y la posibilidad de utilizar un solo molde. Por dicha razón se considera a éste como una alternativa factible desde el punto de vista práctico para la construcción de las unidades a nivel industrial.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a los Doctores J.A.Moragues y W.Scheuer el haber hecho posible este trabajo, a través de su continuo apoyo y aliento, como también el haber leído el manuscrito con fructífero espíritu crítico, lo que indudablemente contribuyó a mejorar y clarificar su contenido.

Las figuras fueron realizadas por el Sr. J.L.Réndina y el original fue mecanografiado por la Sra. Marta R. de Gismondí.

Notación

a, x_0'	:	Semieje mayor y centro de la elipse definida por la intersección del plano receptor con el cono de rayos reflejados en un punto dado del concentrador.
C_A	:	Cociente entre el área de abertura del concentrador y el área del receptor.
$C(x')$:	Factor de concentración puntual. Cociente entre la intensidad incidente en un punto dado del receptor y la intensidad de la radiación solar directa.
$\bar{C}(w_r)$:	Factor de concentración medio. Promedio sobre el ancho del receptor del factor de concentración puntual.
d_r	:	Desplazamiento en la dirección radial del plano receptor respecto de su posición correcta.
f	:	Factor de corrección que relaciona el C_A con el $\bar{C}(w_r)$.
N	:	Número de elementos especulares.
P_c	:	Pérdidas en el concentrador. Fracción de la energía incidente en el área de abertura del concentrador no reflejada por el mismo hacia el plano receptor.
$p_g(w_r)$:	Pérdidas geométricas en el receptor. Fracción de la energía incidente en el plano receptor que no incide en el receptor propiamente dicho.
P_t	:	Plano perpendicular a la línea focal del concentrador.
R	:	Radio del concentrador.
x'	:	Coordenada en el plano receptor.
w	:	Ancho de los elementos especulares.
w_r	:	Ancho del receptor.
β'_0	:	Proyección del semiángulo de abertura solar β_0 sobre el plano P_t .
γ	:	Angulo entre el plano de abertura del concentrador y el plano horizontal.
ϵ	:	Apartamiento angular de un elemento especular de su posición correcta.
$\bar{\epsilon}$:	Valor medio de ϵ .

- ξ : Angulo que forma el plano que contienen a los bordes de dos espejos sucesivos con la perpendicular al espejo tangente.
- θ_a : Angulo de aceptación del concentrador parabólico compuesto (CPC).
- θ_{max} : Semiapertura angular del concentrador fijo a espejo facetado.
- θ_n : Posición angular del espejo n .
- κ : Angulo que forman los rayos incidentes con el plano P_t .
- ρ : Reflectividad.
- σ : Desviación standard del error.
- ϕ : Latitud de lugar.
- ϕ_0 : Angulo determinado por la proyección sobre el plano P_t de los rayos provenientes del centro del Sol y el plano de abertura del concentrador.

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, Argentina (1977).
- 2.- J.C.Durán et al., Concentrador fijo a espejo facetado de la CNEA. Progresos en el período 1/7/1978 - 30/6/1979. Actas de la 5a. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES), Córdoba, Argentina (1979)
- 3.- J.C.Durán y R.O.Nicolás, Análisis óptico bidimensional de concentradores cilíndricos no perfectos. 6a. Reunión de Trabajo de la Asociación de Energía Solar (ASADES), Catamarca, Argentina (1980).
- 4.- R.Winston, Principles of Solar Concentrators of a Novel Design. Solar Energy, 16, (1974) 89.
- 5.- R.Nicolás y J.C.Durán, Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators. Aceptado para su publicación en Solar Energy, (1980).
- 6.- J.L.Russell et al., Development status of the fixed mirror solar concentrator. Informe GA-A14375 de la General Atomic Company, California, EE.UU. (1977).
- 7.- R.O.Nicolás et al., Concentrador cilíndrico fijo a espejo facetado para aprovechamiento de la energía solar. Publicación CNEA NT 35/78, Buenos Aires (1978).

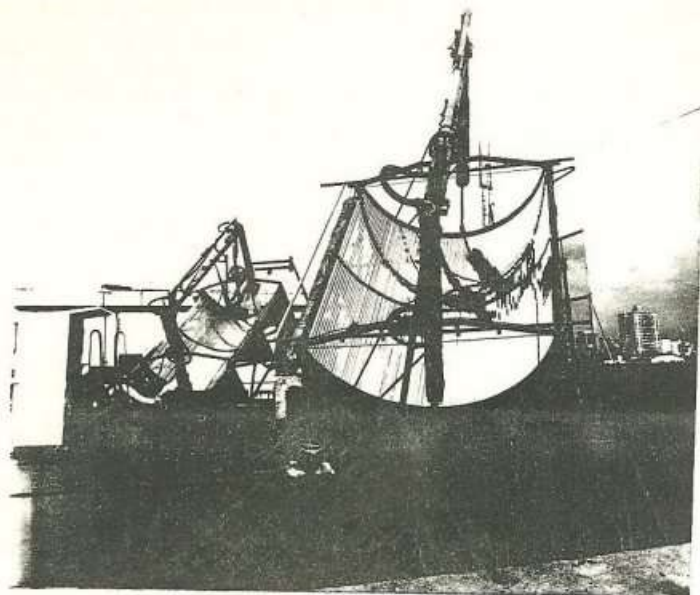


Fig. 1: Vista del conjunto de prototipos de laboratorio de concentrador fijo a espejo facetado.

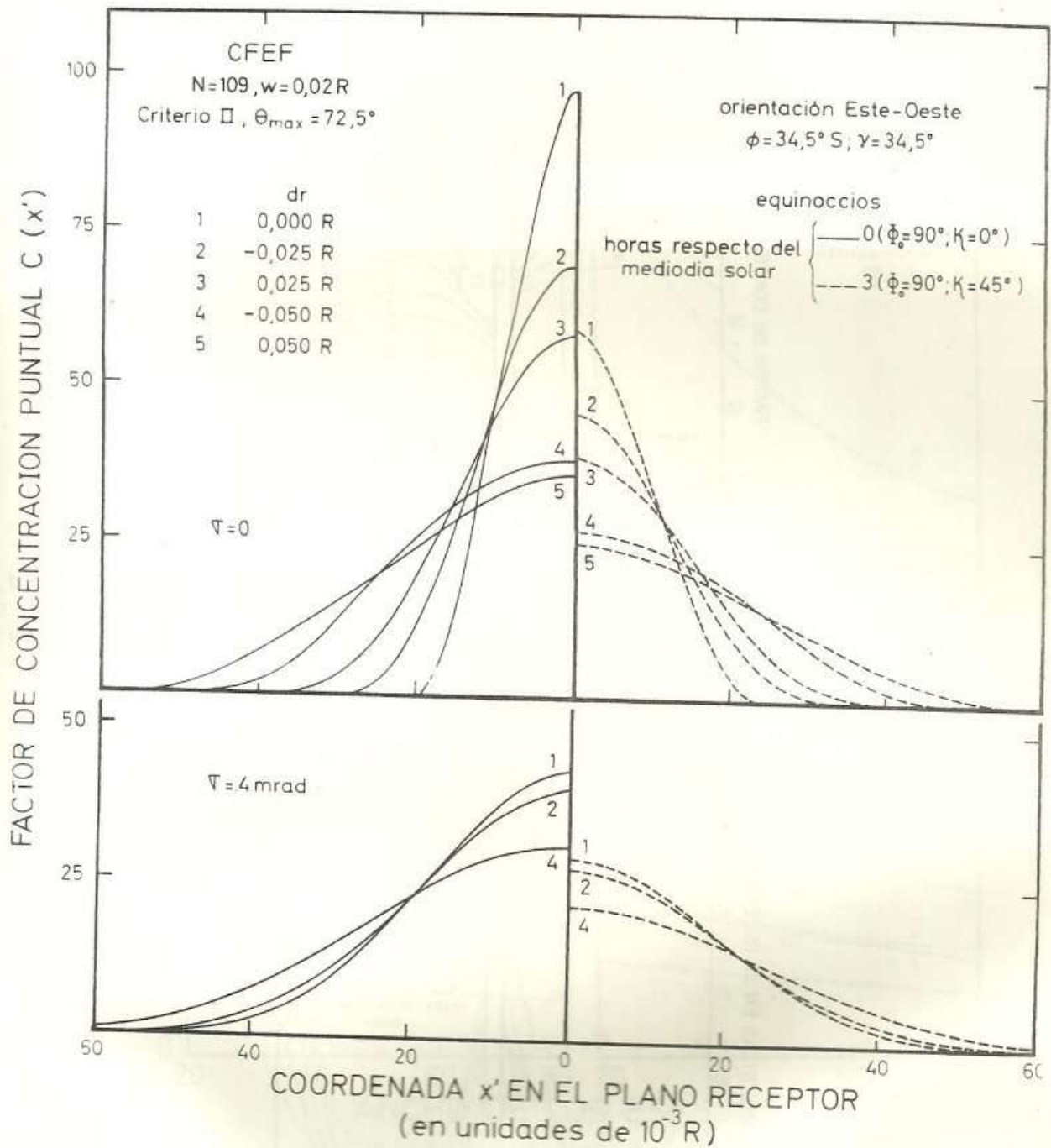


Fig. 2 : Factor de concentración puntual $C(x')$ en función de la coordenada x' en el plano receptor para un CFEF con el plano de apertura inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar, para varios valores del desplazamiento d_r del plano receptor y para dos valores de σ . Las curvas son simétricas con respecto a $x' = 0$. Para $\sigma = 4 \text{ mrad}$ no se han graficado las curvas 3 y 5 ya que éstas prácticamente coinciden con la 2 y la 4 respectivamente.

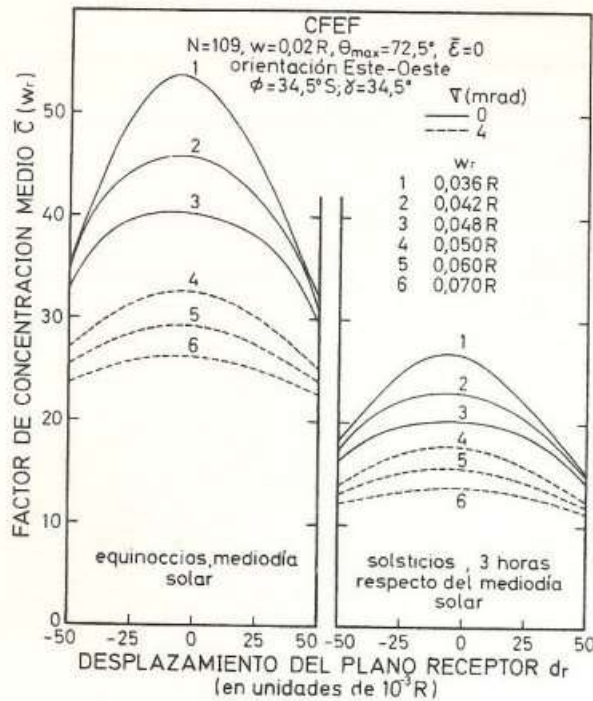


Fig. 3 : Factor de concentración medio $\bar{c}(w_r)$ en función del desplazamiento d_r del plano receptor para un CFEF con el plano de abertura inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar, para distintos valores del ancho del receptor w_r y para dos valores de σ .

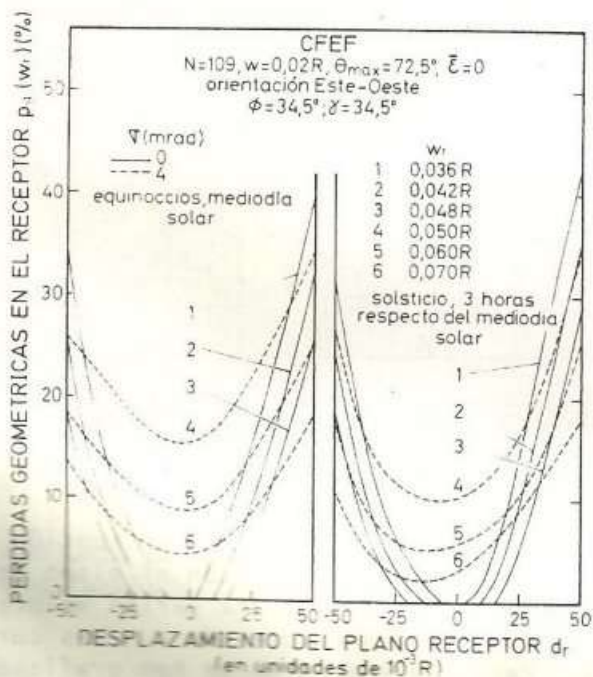


Fig. 4 : Pérdidas geométricas en el receptor $p_g(w_r)$ en función del desplazamiento d_r del plano receptor para un CFEF con el plano de abertura inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar, para distintos valores del ancho del receptor w_r y para dos valores de σ .

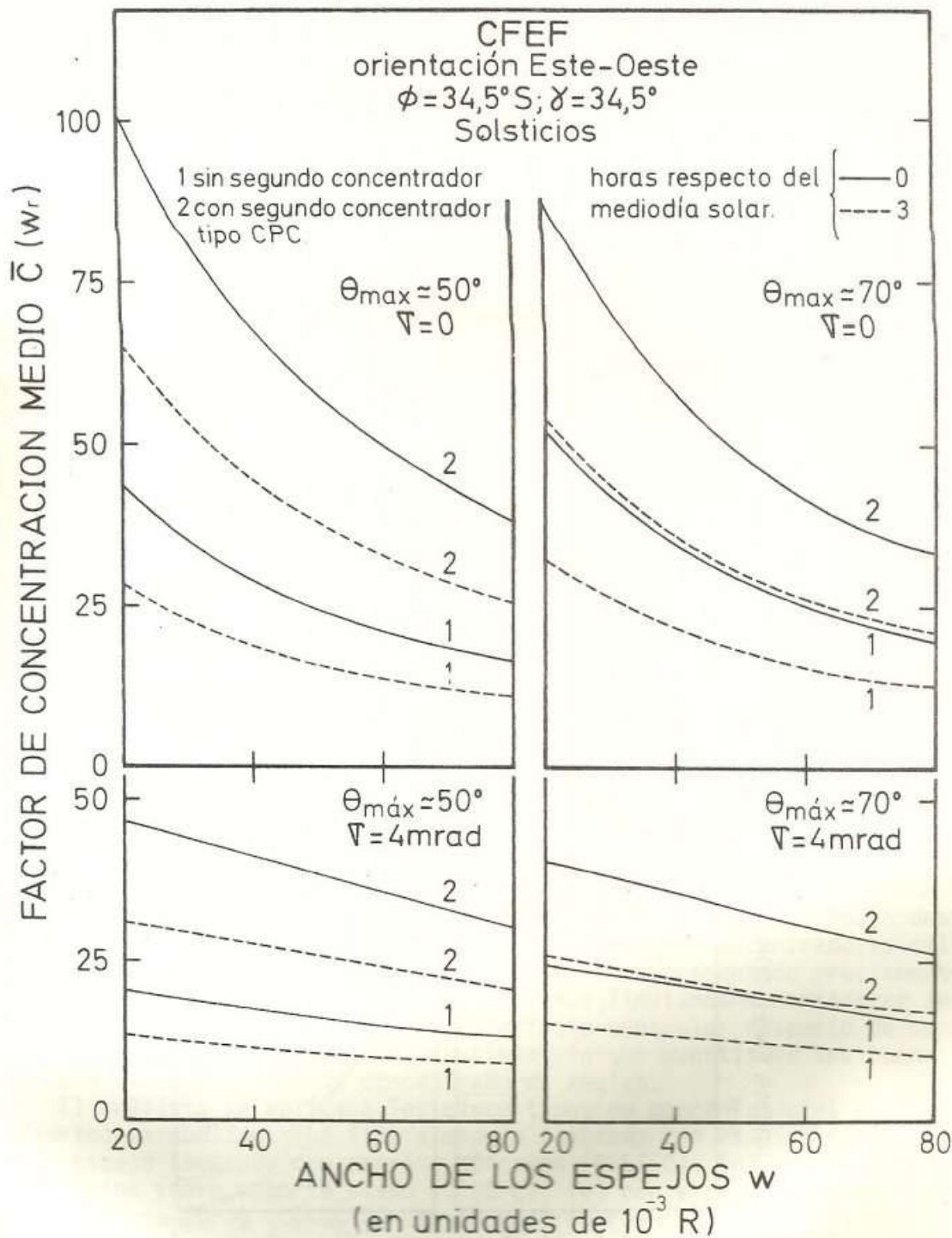


Fig. 5 : Factor de concentración medio $\bar{C}(w_r)$ en función del ancho w de los espejos para un CFEF sin y con segundo concentrador del tipo parabólico compuesto con su plano de apertura inclinado en un ángulo igual a la latitud del lugar, para distintos valores del ancho w_r del receptor y para dos valores de σ y de θ_{max} .

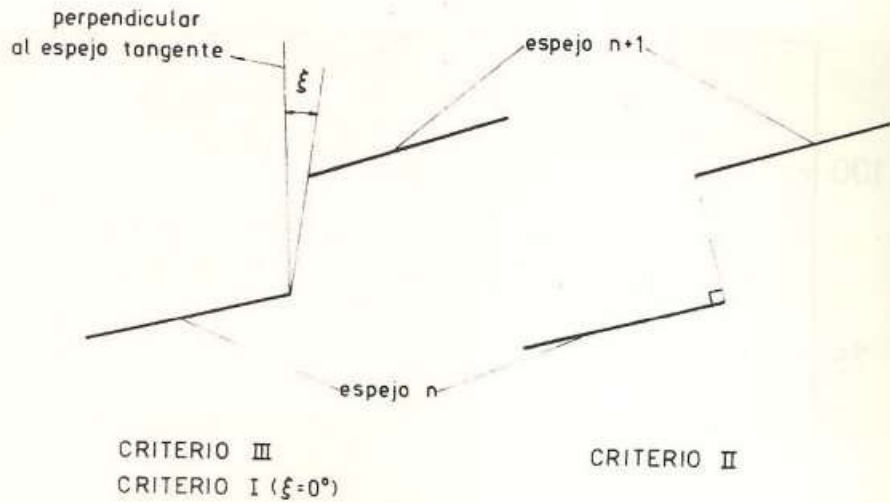


Fig. 6 : Ubicación relativa de dos espejos consecutivos para los criterios considerados.

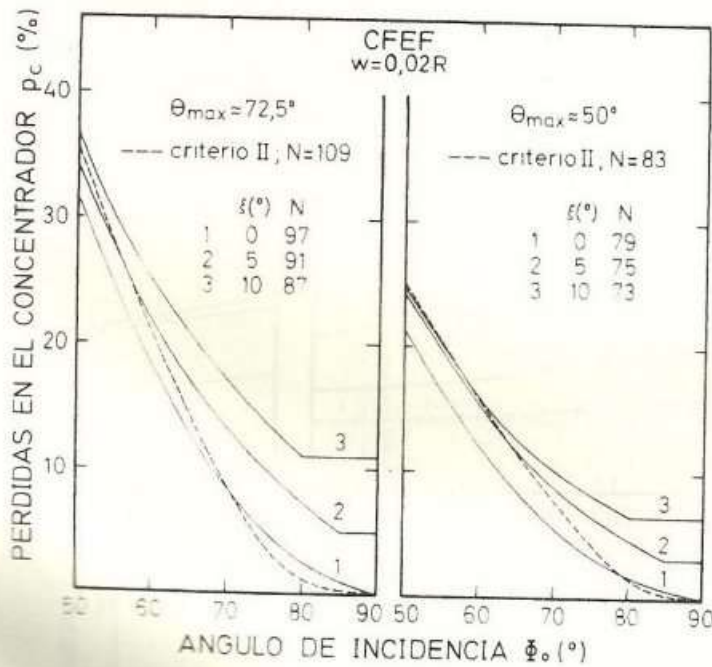


Fig. 7 : Pérdidas p_c en el concentrador en función del ángulo de incidencia ϕ_0 para un CFEF con $w = 0,020 R$, para los criterios de ubicación de espejos considerados y para dos valores de θ_{max} . Se da el número de espejos para cada caso.