

CNEA - NT. 35/78

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

CONCENTRADOR CILINDRICO FIJO A ESPEJO FACETADO PARA APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR

ESTUDIO TEORICO Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO

Rubén O. Nicolás, Ricardo P. Platzeck y Julio C. Durán
Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales

y

Jaime A. Moragues y Walter Scheuer
Departamento de Física - Gerencia de Investigaciones

BUENOS AIRES

1978

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

CONCENTRADOR CILINDRICO FIJO A ESPEJO FACETADO PARA APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR

ESTUDIO TEORICO Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO

Rubén O. Nicolás, Ricardo P. Platzeck y Julio C. Durán
Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales

y

Jaime A. Moragues y Walter Scheuer
Departamento de Física - Gerencia de Investigaciones

BUENOS AIRES

1978

CONCENTRADOR CILINDRICO FIJO A ESPEJO FACETADO PARA APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR

ESTUDIO TEORICO Y DISEÑO DE UN PROTOTIPO

Rubén O. Nicolás*, Ricardo P. Platzeck† y Julio C. Durán*

Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales

y

Jaime A. Moragues# y Walter Scheuer

Departamento de Física - Gerencia de Investigaciones

RESUMEN

Se describen brevemente los sistemas de conversión fototérmica de la energía solar y se enuncian las razones por las cuales se seleccionó al concentrador fijo a espejo facetado (CFEF) para ser utilizado en la etapa inicial de un programa de generación de electricidad a partir de la energía solar. Dicho concentrador fue propuesto por Russell ¹⁾ y está formado por un conjunto de espejos planos, angostos y largos.

Se realiza un estudio teórico de dicho concentrador, abarcando:

a) la determinación de la posición e inclinación de cada uno de los espejos; b) el desplazamiento del foco en función del ángulo de incidencia; c) las pérdidas debidas a sombras y apantallamientos provocados por los espejos, para lo cual se tiene en cuenta, a diferencia de lo hecho en la Ref. 2, el ancho finito de los mismos; d) las pérdidas producidas en los extremos del sistema y e) una evaluación del factor de concentración.

Sobre la base del análisis precedente se simuló el comportamiento del CFEF mediante computadora. Se estudió el flujo de energía y la energía que llegan al plano receptor en función de los parámetros del concentrador, a fin de seleccionar un conjunto de valores de éstos tendientes a optimizar la operación del sistema a lo largo del año.

Se diseñó, tomando como base los valores obtenidos anteriormente, un prototipo de 2,4 m de largo, 1 m de radio y con un ángulo de apertura variable hasta 145°, pudiéndose modificar, además, la inclinación del concentrador entre 0 y 60 grados. Se están construyendo dos prototipos, uno con espejos de vidrio nacional y el otro con espejos de vidrio importado.

Se determinan las imágenes producidas por los dos tipos de espejos, como así también el coeficiente de reflexión de los mismos.

+ Los Capítulos 2 y 3 de la presente publicación fueron elaborados por el Lic. Rubén O. Nicolás, constituyendo el contenido básico del Trabajo de Seminario que presentara a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

* Becario de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

† Comisión Nacional de Energía Atómica e INVAP Sociedad del Estado.

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

FACETED FIXED MIRROR CONCENTRATOR FOR
SOLAR ENERGY APPLICATIONS
THEORETICAL ANALYSIS AND PROTOTYPE DESIGN

Rubén O. Nicolás, Ricardo P. Platzeck, Julio C. Durán,
Jaime A. Moragues and Walter Scheuer

ABSTRACT

Systems for the photothermal conversion of solar energy are briefly described and the reasons for selecting the faceted fixed mirror solar concentrator (FFMSC) for use in the initial stage of a program for the generation of electric power from solar energy are given. The FFMSC has been proposed by Russell ¹⁾ and it is formed by a set of flat, long mirror slats.

A theoretical analysis of the concentrator is given, which covers: a) the determination of the position and of the angular tilt of each of the mirrors; b) the movement of the focal zone as a function of the angle of incidence; c) the losses due to shadowing and screening originated by the mirror slats, for which their finite width is taken into account; d) the losses at the ends of the system; e) an evaluation of the concentration factor.

On the basis of the preceeding analysis, the performance of a FFMSC was simulated. The flux of energy and the energy reaching the receptor-plane were both studied as a function of the parameters of the concentrator, so that a set of values appropriate for the optimization of the system over the whole year could be selected.

Taking into account this set of values, a prototype has been designed with a length of 2.4 m, a radius of 1 m and an aperture angle variable up to 145 degrees; besides, it may be tilted up to 60 degrees. Two units are being constructed, one using mirrors made from locally produced glass and a second one using imported glass. The optical quality of these mirrors has been determined.

INDICE

	Página
1. <u>CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD</u>	1
1.1 GENERALIDADES DE LA ENERGIA SOLAR	1
1.1.1 Radiación solar. Datos físicos	1
1.2 DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA DE ORIGEN SOLAR EN LA ARGENTINA	3
1.3 SISTEMAS DE CONVERSION	3
1.3.1 Sistemas fototérmicos	5
1.4 ELECCION DEL SISTEMA A DESARROLLAR EN LA CNEA	7
2. <u>ANALISIS TEORICO DEL CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO (CFEF)</u>	11
2.1 PROPIEDADES GENERALES	11
2.2 DEFINICION DE PARAMETROS CARACTERISTICOS	17
2.3 DESPLAZAMIENTO DEL FOCO EN FUNCION DE ϕ	19
2.4 CRITERIOS PARA LA UBICACION DE LOS ESPEJOS	22
2.5 PERDIDAS GEOMETRICAS	23
2.6 PERDIDAS GEOMETRICAS TOTALES	31
2.7 FACTOR DE CONCENTRACION GEOMETRICO	34
APENDICES	39
2.A CALCULO DE ϕ Y ψ	39
2.B PERDIDAS GEOMETRICAS	41
2.B.1 Cálculo de p_g'	41
2.B.2 Cálculo de los límites de las sumatorias	43
2.C EFICIENCIA DE CONVERSION TERMICA EN EL RECEPTOR	44
3. <u>SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CFEF Y OPTIMIZACION DE PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA PROTOTIPOS</u>	49
3.1 PROGRAMA DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCENTRADOR	49
3.2 OPTIMIZACION DE PARAMETROS	51
3.3 SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO CFEF OPTIMIZADO	55
4. <u>DISEÑO Y MONTAJE DE PROTOTIPOS</u>	57
APENDICE	62
4.A ESPEJOS: DISPONIBILIDAD EN PLAZA Y PROPIEDADES	62
4.A.1 Disponibilidad en el mercado local	62
4.A.2 Dirección de corte más conveniente	63
4.A.3 Coeficiente de reflexión	63

	Página
ANEXO: PROGRAMA SIMUCFEF	69
REFERENCIAS	77
AGRADECIMIENTOS	77
NOTACION	78

CAPITULO 1

CONVERSION DE LA ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

1. CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD[†]

1.1. GENERALIDADES DE LA ENERGIA SOLAR

La energía solar está principalmente caracterizada por ser una forma de energía prácticamente inagotable y no contaminante la cual, además, en mayor o menor grado, está disponible en cualquier lugar de la Tierra. Como desventajas pueden mencionarse que la energía recibida del Sol es de baja densidad y que su suministro es intermitente, por lo que resulta necesario recogerla sobre superficies relativamente grandes y utilizar sistemas de almacenaje para las horas durante las cuales no hay radiación solar.

El estado actual de los conocimientos permite afirmar que la factibilidad de las aplicaciones de la energía solar está demostrada en numerosos campos y que para su utilización en gran escala sólo se requieren desarrollos que permitan reducir los costos de los sistemas de su conversión a otras formas de energía; por lo tanto, los factores que determinarán si la energía solar se utilizará para la producción masiva de electricidad serán de orden económico, político y ecológico. Es de destacar también que, para esta particular aplicación, la tecnología requerida no es sofisticada, estando al alcance de países con un grado de desarrollo como el de la Argentina.

1.1.1. Radiación solar. Datos físicos

Las complejas reacciones de fusión nuclear que se producen en el Sol son el origen de la energía solar. En una buena aproximación y para fines prácticos, el Sol puede considerarse como una enorme esfera incandescente cuya temperatura de emisión es de 5760 K.

Se denomina *constante solar* a la cantidad de energía total recibida por unidad de tiempo sobre la unidad de área expuesta en forma normal a los rayos solares, en ausencia de atmósfera y calculada a la denominada distancia media del Sol a la Tierra (149,5 millones de km). El valor de

[†] En el presente capítulo se resume parte de la información dada en Ref. 3.

Tabla 1.1

Radiación solar global en la República Argentina ^{a)}

Estación	Latitud Longitud	Altura sobre nivel del mar (m)	Período de registro	Energía incidente por día ^{b)} (kWh/m ² .día)			Potencia promedio en 24 horas ^{c)} (W/m ²)			Potencia pico ^{d)} (W/m ²)		
				Junio	Diciembre	Anual	Junio	Diciembre	Anual	Junio	Diciembre	Anual
Tucumán	26°48' S 65°12' 0	481	1965-68	2,63	5,86	4,40	110	244	183			620
Pilar (Córdoba)	31°40' S 63°53' 0	338	1964-66	2,80	6,63	4,87	117	276	203			660
Mendoza	32°53' S 68°51' 0	828	1965-68	2,57	7,93	5,02	107	330	209			690
San Martín (Mendoza)	33°05' S 68°25' 0	653	1965-67	2,79	7,95	4,75	116	331	198			720
Buenos Aires	34°35' S 58°29' 0	25	1964-68	2,01	6,99	4,50	84	291	187	330 ^{e)}	920 ^{e)}	620
Neuquén	38°57' S 68°08' 0	270	1965-68	1,98	8,02	4,80	83	334	200			650

a) Según Ref. 3 .

b) Para los meses de Junio y Diciembre se da el promedio de los valores correspondientes a todos los días del mes en cuestión, extendido a todos los años en que existen registros. El valor anual es el correspondiente promedio de los promedios mensuales.

c) Valores promedios de energía definidos en b) divididos por 24 horas.

d) Potencia promedio sobre una hora, con el sol alrededor de su posición de altura máxima.

e) Datos del año 1967.

aceptación general es de 1353 W/m^2 .

Al atravesar la atmósfera terrestre, parte de la radiación solar incidente es absorbida. Se denomina *radiación directa* a la radiación que llega a la Tierra sin sufrir procesos de dispersión y *radiación difusa* a la que alcanza la superficie terrestre luego de experimentar dichos procesos. *Radiación global* es la suma de ambas. A la primera se la mide en un plano perpendicular a la radiación incidente y a las radiaciones difusa y global, en un plano horizontal.

1.2. DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA DE ORIGEN SOLAR EN LA ARGENTINA

La generación de electricidad en nuestro país, por centrales del servicio público (que suministran ~80% del total generado), fue ⁴⁾ durante 1976 y 1977 de 25.200 y 27.180 GWh respectivamente. Según una proyección elaborada ⁵⁾ por la Gerencia de Centrales Nucleares de la CNEA, se necesitaría una generación de 125.000 GWh para el año 1990.

Para la zona de nuestro país situada al norte de la provincia de Río Negro es razonable considerar $4,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ como promedio anual de la energía solar incidente en la zona (ver Tabla 1.1). Si para la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad se supone un valor del 20% y para el factor de ocupación del terreno se toma el 50%, se concluye que para satisfacer la demanda de electricidad en 1990 se necesitaría un área de colección de 760 km^2 ; cabe destacar que esta superficie sólo representa un 0.04% del área total considerada. Por otra parte, a partir de esa área se puede generar 40 veces más energía eléctrica que con la central El Chocón, cuyo lago artificial cubre una superficie de $\sim 820 \text{ km}^2$.

1.3. SISTEMAS DE CONVERSION

Existen diversas maneras para transformar la energía solar que incide sobre la Tierra en energía eléctrica. De acuerdo con el proceso interviniente se pueden definir dos grandes grupos: los de conversión directa y los de conversión indirecta. Al primer grupo pertenecen el proceso termoiónico, en el cual se calienta un cátodo que emite electrones; el termoelectrónico, en el cual se calienta una de las junturas de un par metálico y el fotovoltaico, que consiste en la aparición de una diferencia de potencial entre dos terminales conectadas a un dispositivo adecuado, cuando sobre éste incide radiación solar; al segundo pertenece la conversión fototérmica, en la que la energía solar es entregada a un fluido que accio-

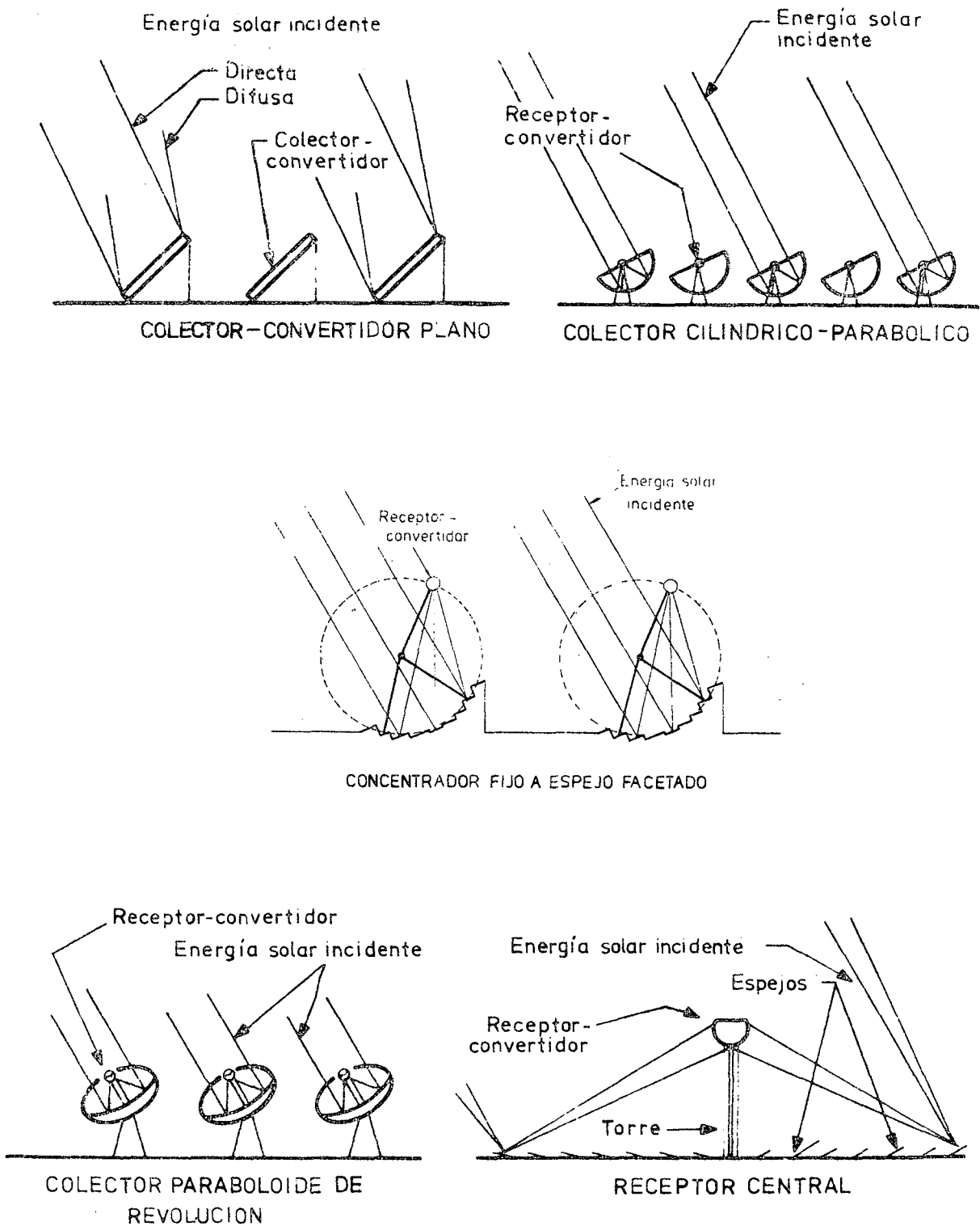


Fig. 1.1: Representación esquemática de los distintos sistemas de conversión de energía solar en térmica. Según Ref. 3.

na un turbogenerador.

En el estudio ³⁾ previamente mencionado sólo se analizan las conversiones fototérmica y fotovoltaica, por ser éstas las que aparecen como las más promisorias a mediano plazo, estando, por otra parte, las demás muy poco desarrolladas al presente. Se concluye que, en el peor de los casos, el costo del kWh producido por centrales solares fototérmicas es aproximadamente dos veces mayor que el producido por centrales convencionales si, para el cálculo de éste, se parte de los costos de combustibles vigentes en 1973-74. Además, conviene destacar el hecho de que los cálculos están basados sobre costos de colectores y sistemas de almacenaje que sólo se obtendrán mediante producción masiva de sus componentes. Para los sistemas fotovoltaicos es necesario lograr una disminución de costos de aproximadamente dos órdenes de magnitud para que sean competitivos con los convencionales, para lo cual en la actualidad se efectúan múltiples desarrollos alternativos. Teniendo en cuenta los costos de desarrollo involucrados y la infraestructura con que se contaba en la CNEA, se decidió encarar el estudio, desarrollo y construcción de un sistema fototérmico, sin dejar por ello de mantener al día la información con respecto a los sistemas fotovoltaicos.

1.3.1. Sistemas fototérmicos

Como ya se ha dicho, la generación de electricidad por conversión fototérmica de la energía solar se basa en el empleo de la energía térmica obtenida para calentar un fluido a la temperatura adecuada para accionar turbinas convencionales. El colector, conjunto de dispositivos que colecta la energía solar y la transforma en energía térmica, y el transporte de dicha energía hasta el turbogenerador, constituyen el *subsistema específicamente solar* y los turbogeneradores constituyen el *subsistema convencional*.

La temperatura alcanzable con el subsistema solar es un parámetro muy importante, ya que de ella depende la eficiencia del sistema convencional, puesto que ésta crece con el aumento de la diferencia de temperatura del ciclo térmico, la cual será tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura de entrada a la turbina.

Hacemos ahora una breve referencia a las distintas clases de subsistemas solares, que se consideran pueden ser utilizadas para la generación masiva de electricidad. Se describen sólo aquellos sistemas actualmente en desarrollo (Fig. 1.1).

a) SISTEMA DE COLECTORES-CONVERTIDORES PLANOS: Está formado por un conjunto de módulos, cada uno de los cuales convierte la *radiación global* que llega sobre una superficie de varios m^2 y la transforma en energía térmica in situ. Todos los módulos de una instalación dada se inclinan a un ángulo determinado, que puede ser variado estacionalmente para obtener un mayor rendimiento medio anual. Este sistema no puede alcanzar temperaturas mayores de 180 C.

b) SISTEMA DE CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO (CFEF): Es el sistema de concepción más reciente, propuesto por Russell ¹⁾ en 1974. Cada módulo (de algunas decenas de m^2) está constituido por un conjunto de espejos planos, angostos y largos, dispuestos de manera que sus ejes longitudinales de simetría estén sobre un imaginario cilindro directriz (o de referencia). Tiene la propiedad de que, cualquiera sea la dirección del haz paralelo incidente, el foco del sistema se localiza sobre el mismo cilindro de referencia mencionado. Sobre este último se desplaza el receptor-convertidor de la energía solar en energía térmica. Con este sistema, que presenta la ventaja con respecto a los que nombraremos a continuación de tener un sistema de concentración fijo, se espera alcanzar una temperatura entre 400-500 C. Tanto en este sistema, como en los siguientes, sólo se aprovecha la *radiación directa*.

c) SISTEMA DE CONCENTRADORES CILINDRICO-PARABOLICOS: Está formado por un conjunto de módulos de varios m^2 que concentran la energía incidente en su eje focal, donde se coloca el receptor-convertidor. La temperatura alcanzable es de ~450 C.

d) SISTEMA DE CONCENTRADORES PARABOLOIDES DE REVOLUCION: Consiste en una serie de módulos de algunos m^2 que concentran la radiación incidente en el foco del sistema, donde se coloca el receptor-convertidor, alcanzándose temperaturas de ~1000 C.

e) SISTEMA DE TORRE CENTRAL: Consiste en concentrar por medios ópticos, en una zona de pocos m^2 , la radiación solar directa incidente sobre una superficie de 1-2 km^2 . Esto se realiza mediante un conjunto de espejos planos o curvos montados sobre helióstatos y convenientemente distribuidos, que reflejan la radiación solar que llega a ellos hacia un receptor central ubicado en una torre. La temperatura que se puede obtener es de ~1000 C.

Un factor muy importante a tener en cuenta es la complejidad que presenta cada sistema en cuanto a su movimiento. El primero de ellos puede funcionar, con eficiencia razonable, sin necesidad de movimiento o, sino, como ya hemos dicho, con un ajuste estacional. Los concentradores cilíndricos del tipo CFEF o parabólico, sólo necesitan un grado de libertad en el movimiento, pero en el primero de ellos es suficiente mover el receptor, que es más pequeño y menos pesado que el concentrador, que es la parte móvil en los parabólicos. En los dos sistemas restantes, paraboloides de revolución y torre central, se necesitan dos grados de libertad.

Una de las conclusiones que se extraen del estudio mencionado es que, por el momento, aparecen como económicamente más competitivas las centrales solares que funcionan en el modo de seguimiento de carga. En la Fig. 1.2 se muestra una comparación, para centrales funcionando en ese modo, entre los sistemas solares mencionados y las centrales convencionales.

1.4. ELECCION DEL SISTEMA A DESARROLLAR EN LA CNEA

En la Fig. 1.2 aparece el sistema de torre central como el más competitivo con los tradicionales, pero el CFEF constituye una buena alternativa a tener en cuenta. Las razones más importantes que nos indujeron a encarar el estudio y desarrollo de un sistema de generación de electricidad mediante concentradores fijos a espejo facetado en lugar del de torre central son:

a) 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.

b) 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.

c) Como etapa intermedia se pueden desarrollar concentradores fijos a espejos facetados cuyas características constructivas sean 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 importante por su posible utilización

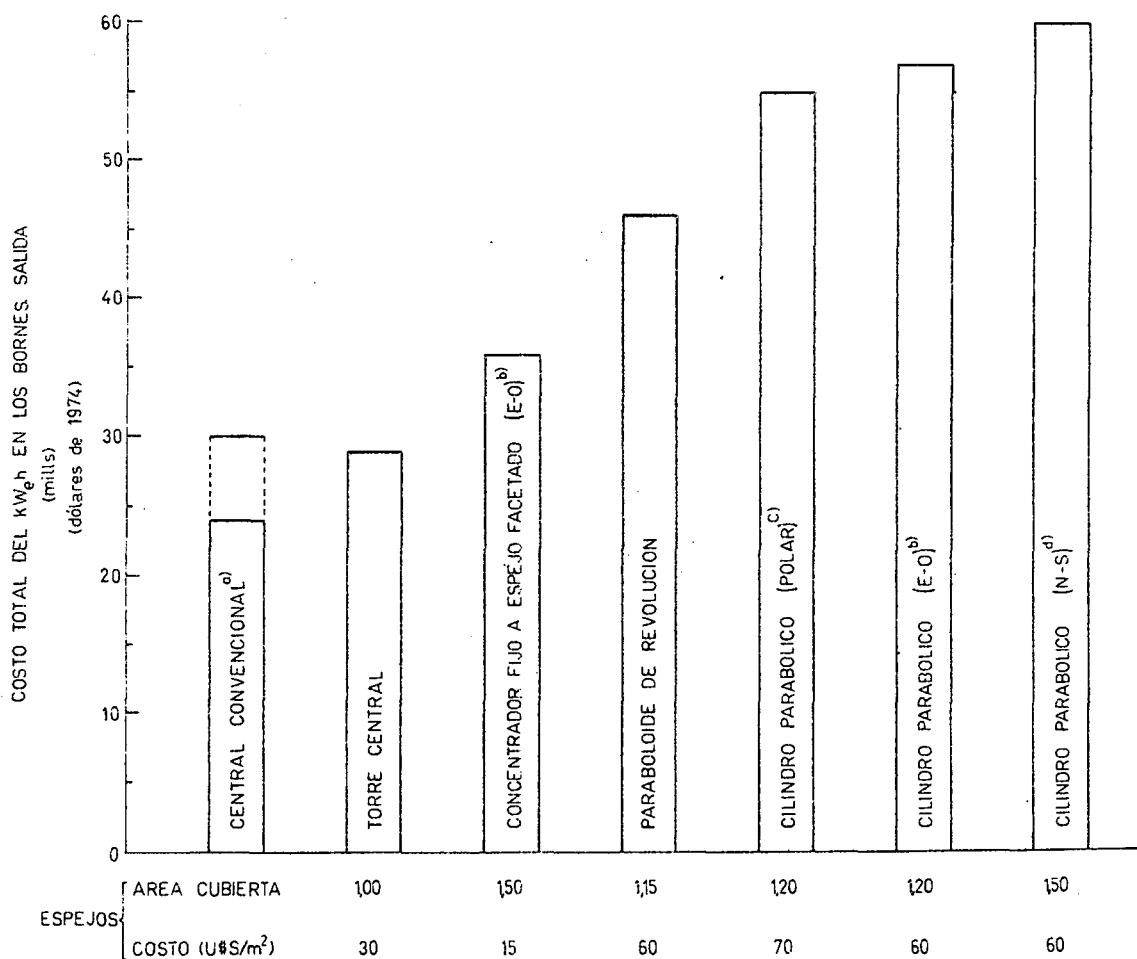


Fig. 1.2: Costo del kW_{eh} producido por una central de 100 MWe operado en el modo de seguimiento de carga, para los distintos sistemas de conversión. Dicho costo ha sido calculado suponiendo como costos de los componentes de las centrales solares los que se lograrán mediante producción masiva y que el costo del kW_{eh} convencional es el basado sobre precios del carbón vigentes en 1973-1974. Según Ref. 3.

- a) Central de ciclo combinado a combustible fósil de 400 MWe de potencia. Las estimaciones de costo varían entre 24 y 30 mills/ kW_{eh} .
- b) Eje de movimiento en dirección E-O y posición horizontal.
- c) Eje de movimiento orientado en la dirección N-S e inclinado respecto de la horizontal en un ángulo igual a la latitud del lugar.
- d) Eje de movimiento en dirección N-S y posición horizontal.

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.

d) 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.

e) 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 la 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 por su aplicación a pequeñas comunidades, fábricas, escuelas, establecimientos rurales, etc..

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

CAPITULO 2

ANALISIS TEORICO DEL CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO (CFEF)

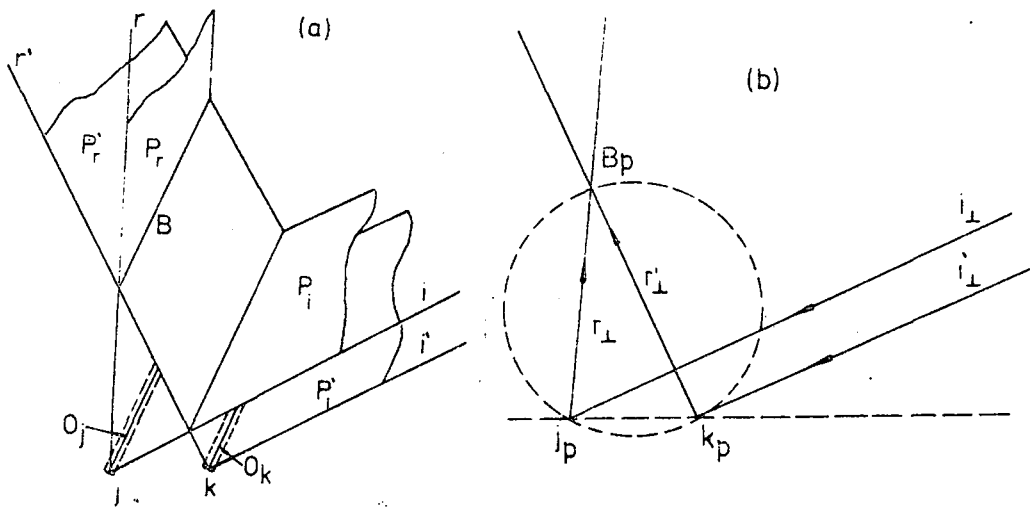


Fig. 2.1: Reflexión de dos campos paralelos de luz. Según Ref. 2 .

a) P_i y P'_i son dos campos paralelos incidentes en dos espejos j y k , planos, angostos y largos cuyos ejes longitudinales son paralelos. El cruce de los campos reflejados P_r y P'_r determina la recta B , paralela a O_j y O_k . Con i e i' se indican dos rayos de los campos incidentes P_i y P'_i y con r y r' los correspondientes reflejados.

b) Proyección de la figura anterior sobre un plano $P_\perp$ perpendicular a O_j y O_k ; $i_\perp$, $i'_\perp$, $r_\perp$, $r'_\perp$, B_p , j_p y k_p son, respectivamente, las intersecciones de P_i , P'_i , P_r , P'_r , B , O_j y O_k con $P_\perp$. Conviene destacar que $i_\perp$ e $i'_\perp$ ($r_\perp$ y $r'_\perp$) no son rayos incidentes (reflejados) sino la proyección de éstos sobre el plano $P_\perp$. Se ha marcado con línea cortada la circunferencia circunscripta al triángulo $j_p B_p k_p$.

2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO (CFEF)

2.1. PROPIEDADES GENERALES

De acuerdo con lo señalado en el capítulo precedente, los concentradores que consideramos están constituidos por un conjunto de espejos cuyos ejes de simetría longitudinales están ubicados sobre un cilindro de referencia imaginario (página 6). En lo que sigue estableceremos la configuración geométrica que debe tener el conjunto de espejos para que, independientemente de la dirección del haz paralelo de rayos incidentes, se forme un foco lineal sobre dicho cilindro. La configuración estará determinada por la posición y la inclinación de cada espejo con respecto a un sistema de coordenadas apropiado. Todo el desarrollo expuesto en esta Sección 2.1 está fuertemente basado sobre lo hecho por Russell et al. en la Ref. 5. A lo largo del mismo sólo se consideran los rayos reflejados en los ejes longitudinales de simetría de los espejos que, como demostraremos, son los que se cruzan sobre el cilindro de referencia. El ensanchamiento del foco producido por el ancho finito de los espejos se discute en la Sección 2.7.

En la Fig. 2.1.a se muestra la reflexión de dos campos de luz[†] paralelos en dos espejos planos, angostos y largos (j, k), cuyos ejes longitudinales ($0_j, 0_k$) son paralelos, pero cuyos planos no lo son. En la Fig. 2.1.b se observa la geometría anterior en un plano $P_\perp$, perpendicular a los ejes $0_j, 0_k$. Además, se indica la circunferencia circunscripta al triángulo $j_p B_p k_p$. La demostración se efectúa utilizando las proyecciones de los rayos sobre el plano $P_\perp$: se comienza por determinar para cada espejo la relación que debe existir entre su posición y su inclinación para que, a un ángulo de incidencia arbitrario, B_p esté sobre una sección transversal del cilindro directriz; luego se comprueba si, cuando varía el ángulo de incidencia, B_p se localiza en la misma circunferencia.

Como primer paso se considera incidencia vertical imponiendo, además, la condición de que B_p se localice en el extremo superior de la sección transversal del cilindro directriz (Fig. 2.2). Estas condiciones se introducen sólo por simplicidad de cálculo, pero la demostración no pierde

[†] Se considera aquí como campo de luz incidente (reflejado) a todos aquellos rayos paralelos que, contenidos en un mismo plano, inciden (se reflejan) en el eje de simetría longitudinal del espejo en cuestión.

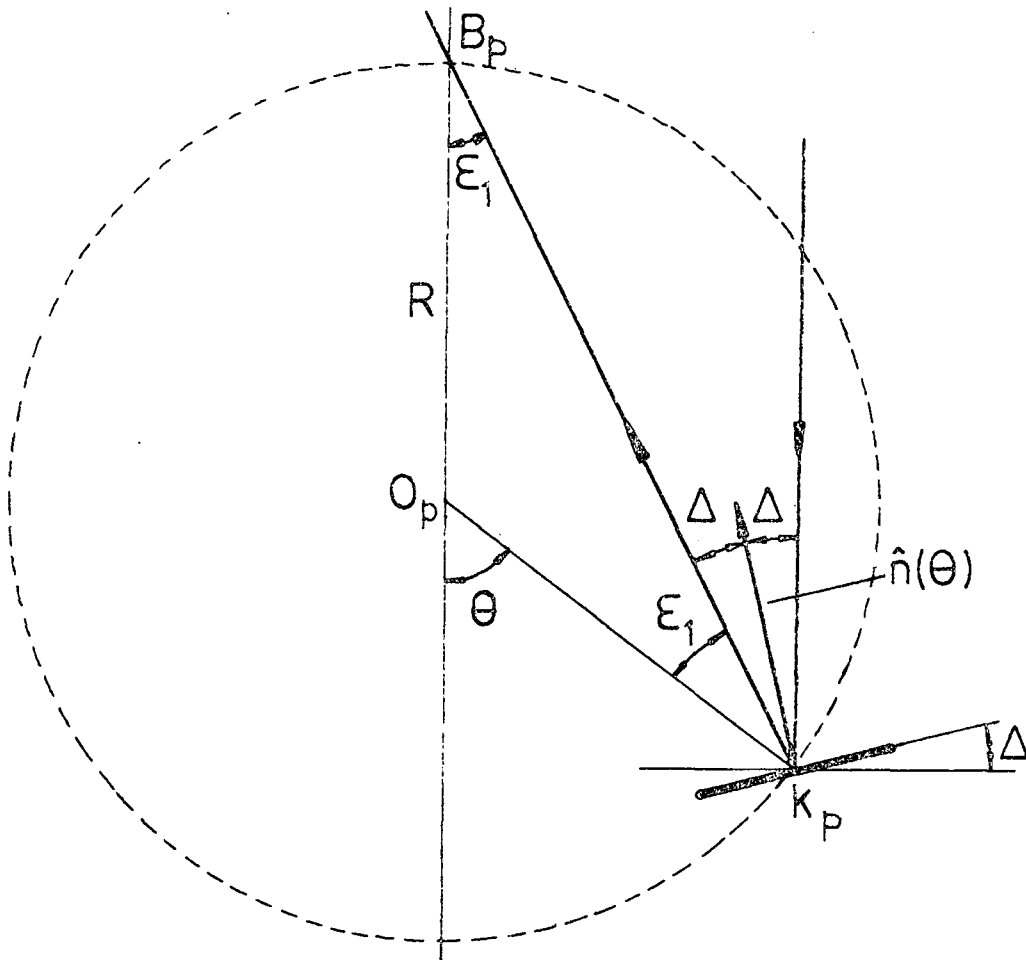


Fig. 2.2: Similar a la Fig. 2.1.b, habiéndose indicado ahora con θ la coordenada angular de un espejo genérico con respecto a la vertical y con Δ su inclinación respecto de la horizontal. Se ha impuesto la condición de que, para una dirección vertical de $i_{\perp}$, el punto B_p esté localizado en el extremo superior de la sección transversal del cilindro directriz. O_p indica el centro de la misma y $\hat{n}(\theta)$ la normal al espejo.

generalidad por esta causa. Además, también por razones de simplicidad, solo se representó el espejo k, pero el segundo espejo j debe considerarse implícito. De la figura se deduce que $\theta = \varepsilon_1 + 2\Delta$ y $\theta = 2\varepsilon_1$, de donde

$$\Delta = \theta/4. \quad (2.1)$$

Es decir, todo rayo que incida verticalmente sobre un espejo cuya posición esté caracterizada por un ángulo θ cualquiera respecto de la vertical del lugar, dará un rayo reflejado que pasa por B_p si la inclinación del espejo es $\theta/4$ respecto de la horizontal.

Como paso siguiente se abandona la condición de incidencia vertical y se toma una terna de ejes ortogonales tal que el eje x coincida con el eje de simetría O_c (supuesto horizontal) del cilindro directriz. El versor

$$\hat{n}(\theta) = (0, -\sin(\theta/4), \cos(\theta/4)) \quad (2.2)$$

indica la normal al espejo cuya coordenada angular es θ . Por otra parte, la ley de reflexión puede expresarse de la siguiente manera:

$$\hat{r} = \hat{i} - 2 \hat{n} (\hat{i} \cdot \hat{n}), \quad (2.3)$$

donde $\hat{i}$ ($\hat{r}$) es un vector unitario en la dirección del rayo incidente (reflejado), es decir:

$$\hat{i} = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) \quad , \quad \text{con } \alpha_1^2 + \beta_1^2 + \gamma_1^2 = 1. \quad (2.4)$$

Los versores $\hat{i}$ y $\hat{r}$ se pueden expresar como la suma de dos componentes perpendiculares, una paralela al eje O_c y otra contenida en $P_\perp$:

$$\hat{i} = \vec{i}_{//} + \vec{i}_\perp = (\alpha_1, 0, 0) + (0, \beta_1, \gamma_1) \quad (2.5)$$

$$\hat{r} = \vec{r}_{//} + \vec{r}_\perp. \quad (2.6)$$

Si en la (2.3) se reemplaza $\hat{i}$ por (2.5), teniendo en cuenta, además, que $\hat{n}$ es función de θ , resulta:

$$\begin{aligned} \hat{r}(\theta) &= \vec{i}_{//} + \vec{i}_\perp - 2 \hat{n}(\theta) \{(\vec{i}_\perp + \vec{i}_{//}) \cdot \hat{n}(\theta)\} = \\ &= \vec{i}_{//} - 2 \hat{n}(\theta) (\vec{i}_{//} \cdot \hat{n}(\theta)) + \vec{i}_\perp - 2 \hat{n}(\theta) (\vec{i}_\perp \cdot \hat{n}(\theta)) \end{aligned}$$

que, como $\vec{i}_{//} \cdot \hat{n}(\theta) = 0$, lleva a:

$$\hat{r}(\theta) = \vec{i}_{//} + \vec{i}_\perp - 2 \hat{n}(\theta) (\vec{i}_\perp \cdot \hat{n}(\theta)). \quad (2.7)$$

Comparando con (2.6) resulta:

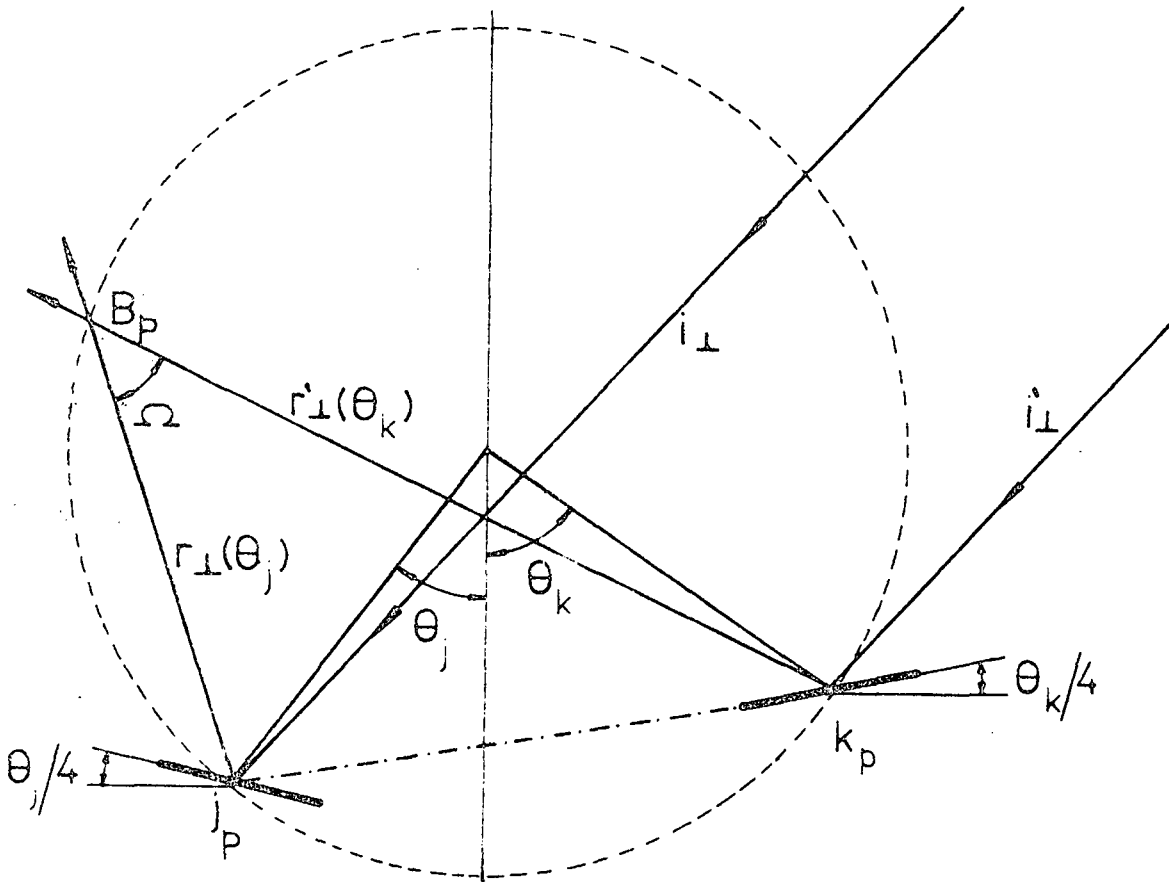


Fig. 2.3: Proyección sobre el plano $P_{\perp}$ de un haz paralelo de rayos incidentes sobre dos espejos caracterizados por los ángulos θ_j y θ_k . El ángulo Ω es el comprendido entre las proyecciones de los rayos reflejados sobre el mismo plano.

$$\vec{r}_{//}(\theta) = \vec{i}_{//}(\theta) = (\alpha_1, 0, 0) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_{\perp}(\theta) &= \vec{i}_{\perp} - 2 \hat{n}(\theta) (\vec{i}_{\perp} \cdot \hat{n}(\theta)) = \\ &= (0, \beta_1, \gamma_1) - 2 (0, -\sin(\theta/4), \cos(\theta/4)) (-\beta_1 \sin(\theta/4) + \\ &+ \gamma_1 \cos(\theta/4)) = \\ &= (0, \beta_1 \cos(\theta/2) + \gamma_1 \sin(\theta/2), -\gamma_1 \cos(\theta/2) + \beta_1 \sin(\theta/2)) . \end{aligned} \quad (2.9)$$

Por lo tanto, de (2.8) se ve que $\vec{r}_{//}(\theta)$ es independiente de θ y sólo depende del ángulo de incidencia. Analizaremos entonces el comportamiento del vector $\vec{r}_{\perp}$. Si las posiciones de dos espejos quedan determinadas por los ángulos θ_j y θ_k (ver Fig. 2.3), para demostrar que B_p se localiza en la misma circunferencia que para incidencia normal, basta demostrar que el ángulo Ω es constante para cualquier incidencia, ya que se cumple la propiedad de que todos los triángulos que tienen un lado común (línea cortada en la Fig. 2.3) y el mismo valor del ángulo opuesto a éste, están inscriptos en la misma circunferencia. Para ello consideramos:

$$\cos \Omega = \frac{\vec{r}_{\perp}(\theta_j) \cdot \vec{r}_{\perp}(\theta_k)}{|\vec{r}_{\perp}(\theta_j)| |\vec{r}_{\perp}(\theta_k)|} \quad (2.10)$$

Como $\hat{r} \cdot \hat{r} = 1 = \vec{r}_{\perp} \cdot \vec{r}_{\perp} + \vec{r}_{//} \cdot \vec{r}_{//}$ y, por (2.8), vale $|\vec{r}_{//}| = \alpha_1$, resulta:

$$|\vec{r}_{\perp}(\theta)| = \sqrt{1 - \alpha_1^2} . \quad (2.11)$$

Se observa que, aunque $\vec{r}_{\perp}(\theta)$ depende de θ , su módulo sólo depende del ángulo de incidencia.

Por otra parte

$$\begin{aligned} \vec{r}_{\perp}(\theta_j) \cdot \vec{r}_{\perp}(\theta_k) &= (\beta_1 \cos(\theta_j/2) + \gamma_1 \sin(\theta_j/2)) \cdot (\beta_1 \cos(\theta_k/2) + \\ &+ \gamma_1 \sin(\theta_k/2)) + (-\gamma_1 \cos(\theta_j/2) + \beta_1 \sin(\theta_j/2)) \cdot \\ &\cdot (-\gamma_1 \cos(\theta_k/2) + \beta_1 \sin(\theta_k/2)) = \\ &= \beta_1^2 (\cos(\theta_j/2) \cos(\theta_k/2) + \sin(\theta_j/2) \sin(\theta_k/2)) + \\ &+ \gamma_1^2 (\cos(\theta_j/2) \cos(\theta_k/2) + \sin(\theta_j/2) \sin(\theta_k/2)) = \end{aligned}$$

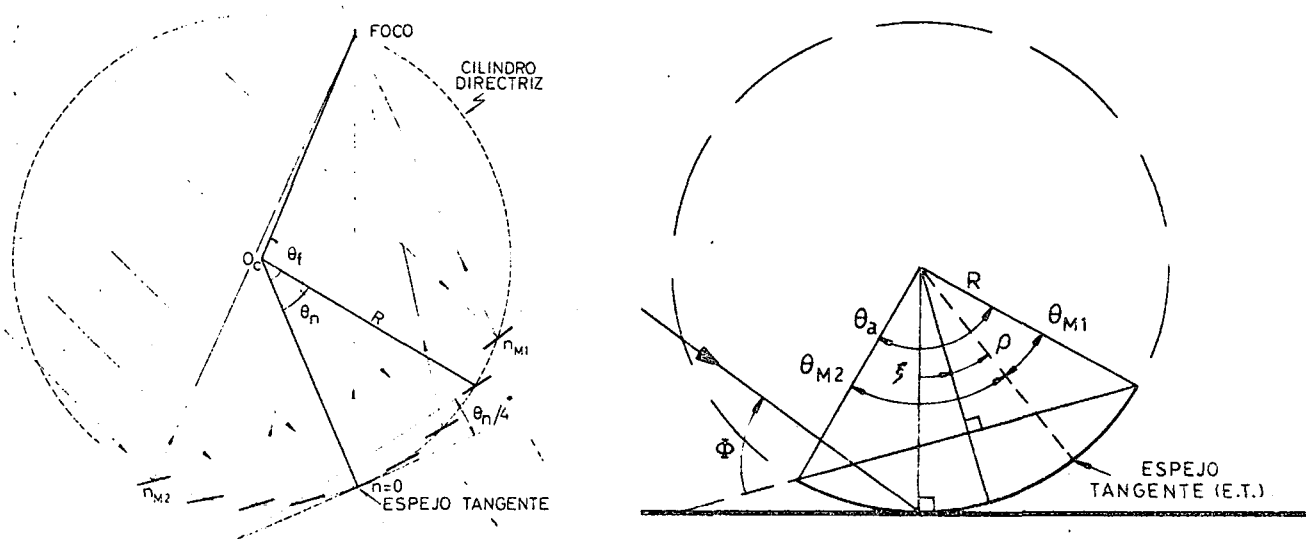


Fig. 2.4: Sección de un concentrador fijo a espejo facetado de radio R . Los rayos incidentes han sido proyectados sobre el plano perpendicular al eje de simetría O_c del cilindro de referencia imaginario. El ángulo θ_n determina la posición del espejo n respecto del espejo tangente ($n=0$). El plano que contiene a cada uno de los espejos forma un ángulo $\theta_n/4$ con el que contiene al espejo tangente. El ángulo θ_f determina la posición angular del foco lineal respecto del espejo tangente.

Todos los ángulos se consideran positivos cuando se los mide en el sentido antihorario, excepto Φ . El signo de n coincide con el de θ_n .

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

Φ : ángulo determinado por la proyección de los rayos incidentes sobre el plano $P_{\perp}$ y el plano de apertura;

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 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;

θ_{M1} : valor máximo de θ_n , que corresponde al espejo n_{M1} ;

θ_{M2} : módulo del valor mínimo de θ_n , que corresponde al espejo $-n_{M2}$.

$$\begin{aligned}
 &= (\beta_1^2 + \gamma_1^2) \cos\{(\theta_j - \theta_k)/2\} = \\
 &= (1 - \alpha_1^2) \cos\{(\theta_j - \theta_k)/2\} .
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

De (2.10), (2.11) y (2.12)

$$\cos(\Omega) = \cos\{(\theta_j - \theta_k)/2\} , \tag{2.13}$$

que prueba que el valor de Ω es independiente del ángulo de incidencia, con lo que se demuestra que, si se cumple (2.1), B_p se localiza sobre el cilindro directriz para cualquier dirección del haz incidente.

La demostración efectuada es extensible a una cantidad arbitraria de espejos cuyos ejes de simetría longitudinales estén sobre una misma circunferencia, considerando éstos de a pares y repitiendo el desarrollo anterior.

En realidad, se ha probado que todas las proyecciones de los rayos reflejados sobre el plano $P_\perp$ pasan por el mismo punto B_p , y que éste siempre está ubicado sobre la circunferencia que es generatriz del cilindro de referencia. El punto donde cada rayo reflejado corta a la línea B depende del ángulo de incidencia a través de $\vec{i}_{//}$, del punto del espejo en que incide el rayo y del ángulo θ que caracteriza al espejo. De ahora en adelante, a la línea B se la denominará foco lineal o simplemente foco.

2.2. DEFINICION DE PARAMETROS CARACTERISTICOS

El versor normal a la tangente a una circunferencia en un punto caracterizado por el ángulo θ es $(0, -\sin(\theta), \cos(\theta))$. Comparando esta expresión con la (2.2), se concluye que sólo existe un espejo cuyo plano es tangente al cilindro directriz (espejo tangente E.T.); es aquél caracterizado por $\theta = 0$. Esto permite redefinir el ángulo θ y la inclinación (ver Fig. 2.4). En esta figura se indican los parámetros principales que permiten describir el funcionamiento del CFEF. Existen, además, otros dos parámetros importantes no incluidos en la figura: a) el ángulo β formado por el eje de simetría O_c del cilindro y el plano horizontal, y b) el ángulo Ψ , determinado por dicho eje O_c y la proyección de los rayos incidentes sobre el plano de simetría longitudinal del concentrador. Los ángulos ϕ y Ψ dependen de la inclinación (caracterizada por β y ξ) y de la orientación del CFEF y son función de la época del año y de la hora del día.

De todas las posibles orientaciones del concentrador, analizaremos dos casos extremos: a) con su eje longitudinal O_c en la dirección

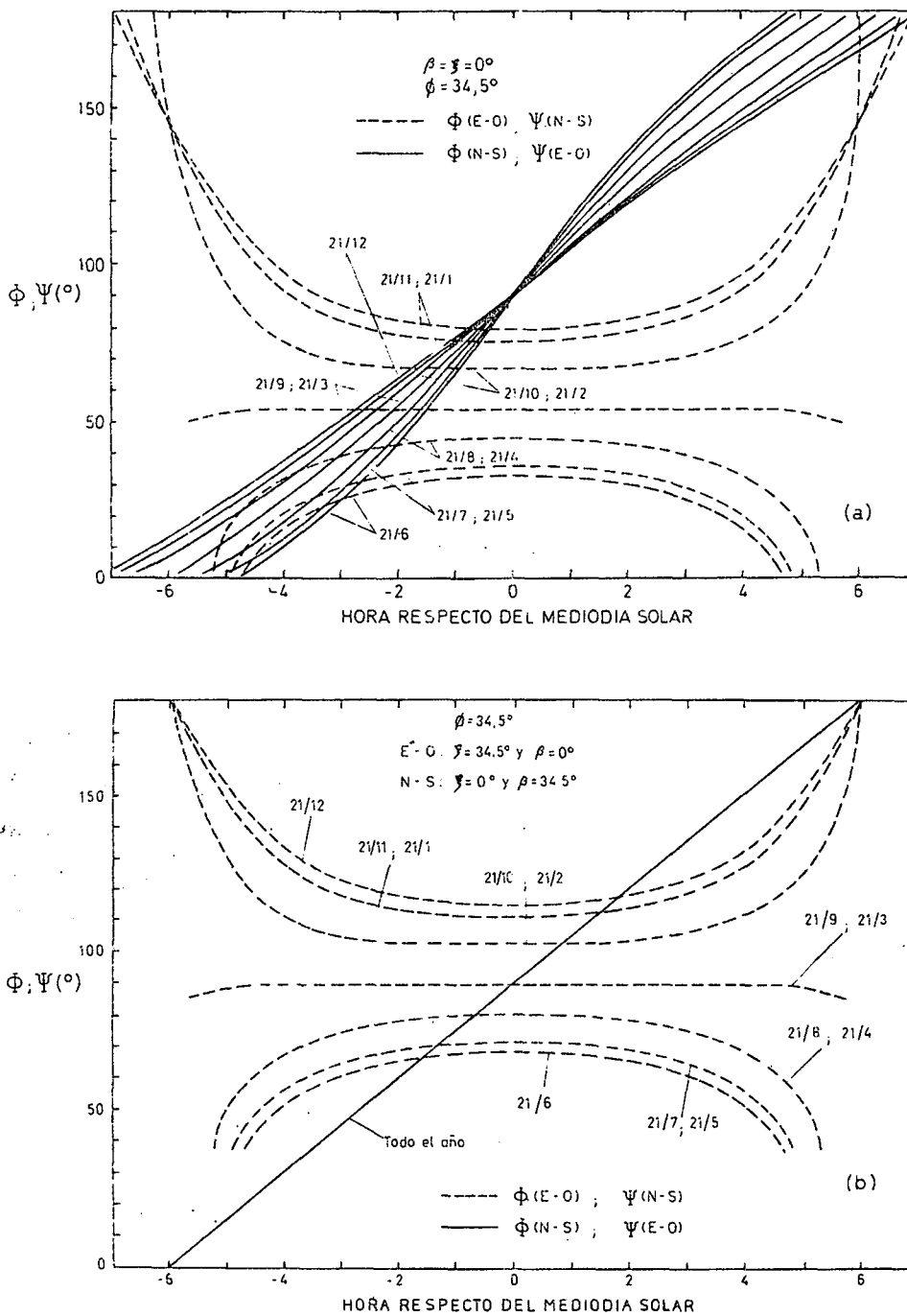


Fig. 2.5: Variación horario de Φ y Ψ para distintas épocas del año y para un concentrador ubicado a $34^\circ 30' S$.

a) Plano de abertura horizontal: $\xi = \beta = 0$

b) Plano de abertura inclinado $34^\circ 30'$ hacia el norte: $\xi = 34.5^\circ$ y $\beta = 0$ para orientación E-O y $\xi = 0$ y $\beta = 34.5^\circ$ para orientación N-S.

este-oeste (orientación E-0) o b) con dicho eje longitudinal O_c en la dirección norte-sur (orientación N-S). Nótese que los valores de ϕ y de ψ se intercambian entre sí al pasar de una orientación a la otra si se intercambian ξ y β , manteniéndose, por lo tanto, la misma inclinación relativa del CFEF (plano de abertura del CFEF respecto del plano horizontal). Es decir que los valores de ϕ para orientación E-0 son los valores de ψ para orientación N-S.

En el Apéndice 2.A describimos el método de cálculo que usamos para obtener ϕ y ψ , al cual hemos expresado en un programa en lenguaje FORTRAN (como todos los que se mencionan en este trabajo) que denominamos FITE. En la Fig. 2.5 mostramos los resultados obtenidos — variación diaria de ϕ y ψ para distintas épocas del año — para dos CFEF con distintas inclinaciones, ambos ubicados a la latitud $34^{\circ}30'S$ (correspondiente a la ciudad de Buenos Aires). De la misma puede deducirse que el ángulo ϕ para orientación N-S (ψ para E-0), varía diariamente en aproximadamente 180° , mientras que el ϕ para orientación E-0 (ψ para N-S) presenta una variación diaria mucho menor, si se excluyen las horas vecinas al amanecer y al crepúsculo. Otra conclusión interesante es que, para una inclinación igual a la latitud del lugar, la variación de ϕ para orientación N-S (ψ para E-0) es independiente de la época del año considerada.

2.3. DESPLAZAMIENTO DEL FOCO EN FUNCION DE ϕ

En la Secc. 2.1 demostramos que, para todo ángulo de incidencia, el foco lineal formado por el CFEF está localizado sobre el cilindro directriz de éste. Habiendo introducido ahora los parámetros característicos del concentrador, podemos evaluar explícitamente la posición θ_f del foco en función de ϕ , es decir, en función de la época del año, la hora del día, la inclinación y la orientación del CFEF. Para ello, introducimos un sistema de coordenadas cuyo eje x coincida con O_c y cuyo eje y sea paralelo al plano del espejo tangente (Fig. 2.6). En él determinaremos el desplazamiento en el plano $P_{\perp}$ de la intersección de un rayo reflejado en un espejo cualquiera (por simplicidad elegimos el E.T.) con la circunferencia generatriz del cilindro de referencia. La ecuación de la circunferencia está dada por

$$y^2 + z^2 = R^2 \quad (2.14)$$

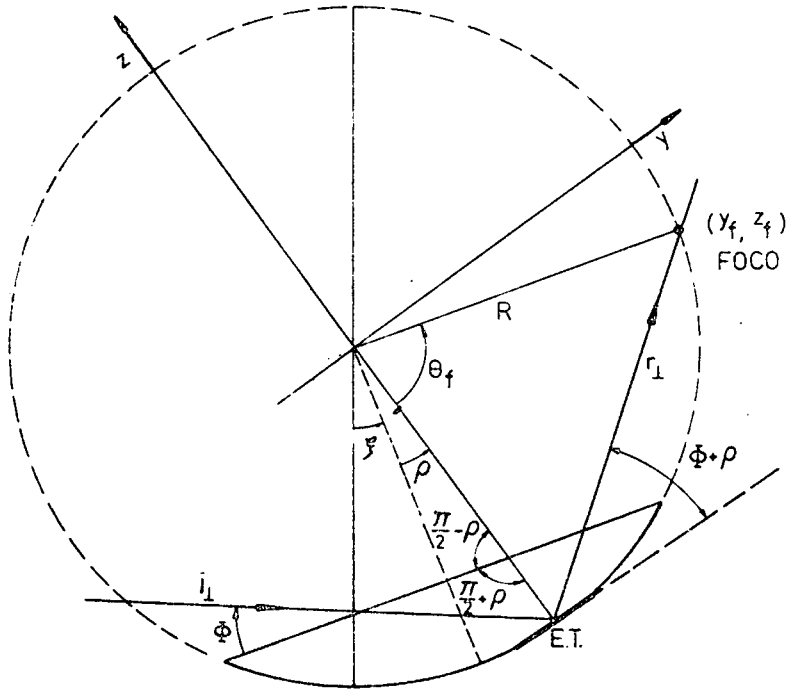


Fig. 2.6: Sistema de coordenadas y parámetros utilizados para la obtención de la expresión de θ_f en función ϕ .

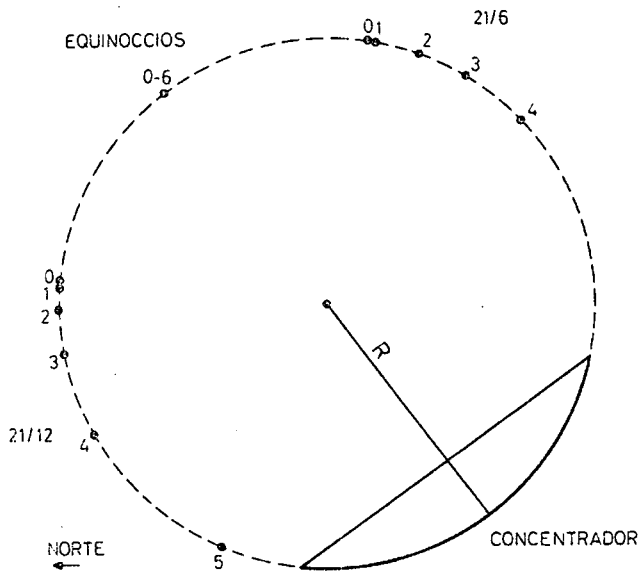


Fig. 2.7: Variación horaria de la posición del foco lineal en un CFEF ubicado a $34^{\circ}30'S$ con orientación E-0 y con $\beta=\rho=0$ y $\xi = 34^{\circ}30'$. Los números identifican horas antes o después del mediodía solar, correspondientes a cuatro épocas del año.

y

$$z = y \operatorname{tg}(\phi + \rho) - R \quad (2.15)$$

es la ecuación del rayo reflejado en el E.T.. Si reemplazamos (2.15) en (2.14) podemos determinar las coordenadas del foco en función de ϕ , ρ y R :

$$y_f^2 (1 + \operatorname{tg}^2(\phi + \rho)) - y_f 2 R \operatorname{tg}(\phi + \rho) = 0 .$$

La raíz $y_f = 0$ no interesa pues corresponde a la ubicación del E.T.. Despejando

$$y_f = 2 R \operatorname{tg}(\phi + \rho) / (1 + \operatorname{tg}^2(\phi + \rho)) = R \operatorname{sen}\{2(\phi + \rho)\}$$

resulta $z_f = -R \cos\{2(\phi + \rho)\}$.

Como: $\operatorname{tg}(\theta_f) = -y_f/z_f = \operatorname{tg}\{2(\phi + \rho)\}$,

$$\theta_f = 2(\phi + \rho) . \quad (2.16)$$

La expresión (2.16) da θ_f en función de ϕ . Si se considera un concentrador cuyo plano de abertura está inclinado con un ángulo igual a la latitud del lugar, para la orientación E-O la variación diaria de la posición del foco es la ilustrada en la Fig. 2.7, mientras que, para la orientación N-S, de la Fig. 2.5.b se deduce que la velocidad angular del foco es constante e igual a 30° por hora.

La condición que debe cumplirse para que el foco se forme en la parte del cilindro directriz no ocupada por espejos es (ver Fig. 2.4)

$$\theta_{M1} < \theta_f < (2\pi - \theta_{M2}) . \quad (2.17)$$

Reemplazando (2.16) en (2.17):

$$\phi_{M1} = \theta_{M1}/2 - \rho < \phi < \pi - (\theta_{M2}/2 + \rho) = \phi_{M2} . \quad (2.18)$$

De (2.18) concluimos que al aumentar θ_{M1} y θ_{M2} , aumenta ϕ_{M1} y disminuye ϕ_{M2} ; por lo tanto se reduce el intervalo de valores de ϕ para los cuales el foco se forma en la zona de interés.

2.4. CRITERIOS PARA LA UBICACION DE LOS ESPEJOS

Para analizar lo referente a las posibles ubicaciones relativas de los espejos, expresamos su posición en una terna de ejes tal que su eje x coincida con el eje de simetría longitudinal del E.T. y su eje y esté contenido en el plano de dicho espejo. Introduciremos, además, como nueva coordenada a la distancia u (positiva a la derecha) entre un punto dado de un espejo cualquiera y el eje de simetría longitudinal de dicho espejo. En la Fig. 2.8 se muestra una sección del CFEF en $P_{\perp}$, donde, por simplicidad, se esquematiza sólo un espejo. Las coordenadas sobre el corte de cualquier espejo se pueden expresar mediante

$$y_n(u) = R \sin(\theta_n) + u \cos(\theta_n/4) \quad (2.19)$$

$$z_n(u) = R(1 - \cos(\theta_n)) + u \sin(\theta_n/4), \quad (2.20)$$

donde el subíndice n indica que se trata del espejo n ésimo ($n = 0$ corresponde al E.T.). Si se indica el ancho de los espejos con W , u varía entre $-W/2$ y $W/2$; en consecuencia, los puntos de coordenadas $(y_n(-W/2), z_n(-W/2))$, $(y_n(0), z_n(0))$ e $(y_n(W/2), z_n(W/2))$ corresponden, respectivamente, al borde inferior, al centro y al borde superior del espejo n ésimo.

De las distintas alternativas para la ubicación de los espejos, se consideran dos:

Criterio I: los bordes de dos espejos sucesivos se encuentran ubicados sobre un plano perpendicular al que contiene al E.T., condición que expresamos como

$$y_{n+1}(-W/2) = y_n(W/2) \quad ; \quad (2.21)$$

Criterio II: los bordes de dos espejos sucesivos se encuentran sobre un plano perpendicular al espejo inferior del par considerado, lo que podemos expresar por

$$\tan(\pi/2 + \theta_n/4) = (z_{n+1}(-W/2) - z_n(W/2)) / (y_{n+1}(-W/2) - y_n(W/2)) \quad (2.22)$$

La posición de cada espejo, es decir el θ_n que caracteriza al espejo n , depende de cuál criterio se utilice. Además, como la distribución de espejos resulta simétrica respecto del E.T., se verifica

$\theta_{-n} = -\theta_n$, por lo que sólo es necesario calcular los $\theta_n > 0$. Reemplazando (2.19) y (2.20) en (2.21) y (2.22) y despejando, obtenemos:

$$\theta'_{n+1} = \arcsen\{\sen(\theta'_n) + (W/2R)(\cos(\theta'_n/4) + \cos(\theta'_{n+1}/4))\}, \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \theta''_{n+1} = & \arcsen[\sen(\theta''_n) + (W/2R)(\cos(\theta''_n/4) + \cos(\theta''_{n+1}/4)) + \\ & + \cotg(\pi/2 + \theta''_n/4) \{\cos(\theta''_n) - \cos(\theta''_{n+1})\} - \\ & - (W/2R)(\sen(\theta''_n/4) + \sen(\theta''_{n+1}/4))] , \end{aligned} \quad (2.24)$$

donde el supraíndice indica el criterio. Resolvemos las ecuaciones (2.23) y (2.24) por recurrencia, tomando en ambos casos como valor aproximado inicial $\theta_{n+1} = \theta_n + \frac{W}{R}$ (recordando que $\theta_0 = 0$).

Obsérvese que, para un mismo criterio, los valores de θ_n sólo dependen del cociente W/R . Este es uno de los parámetros adimensionales que caracterizan a un CFEF. Por otra parte, para cada valor de W/R , existen valores máximos de θ_n a partir de los cuales las expresiones (2.23) y (2.24) no tienen solución: $\theta'_{\text{máx.}}$ y $\theta''_{\text{máx.}}$, respectivamente. Esto significa que la máxima abertura angular del concentrador se logra cuando $\theta_{M1} = \theta_{M2} = \theta_{\text{máx.}}$, lo cual implica $\theta_a = 2\theta_{\text{máx.}}$ y $\rho = \frac{\theta_{M2} - \theta_{M1}}{2} = 0$. En la Fig. 2.9 hemos graficado los θ'_n y θ''_n resultantes para un CFEF de $W/R = 0,02$. Se observa que $\theta''_n \leq \theta'_n$, o sea que los espejos ubicados de acuerdo con el segundo criterio se hallan más próximos entre sí que los colocados de acuerdo con el primero; por lo tanto, el número de espejos de un CFEF construido según el criterio II, nunca será menor que el correspondiente a un CFEF de igual abertura construido según el criterio I. Los parámetros que influyen en la elección del criterio a adoptar son discutidos más adelante.

2.5. PERDIDAS GEOMETRICAS

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 son los espacios entre los bordes de dos espejos sucesivos. En estas pérdidas, que denominaremos "pérdidas geométricas" p_g , no incluiremos las producidas en los extremos del receptor; es decir: consideramos un CFEF lo suficientemente largo como para que dichas pérdidas sean despreciables, por lo que se efectuará

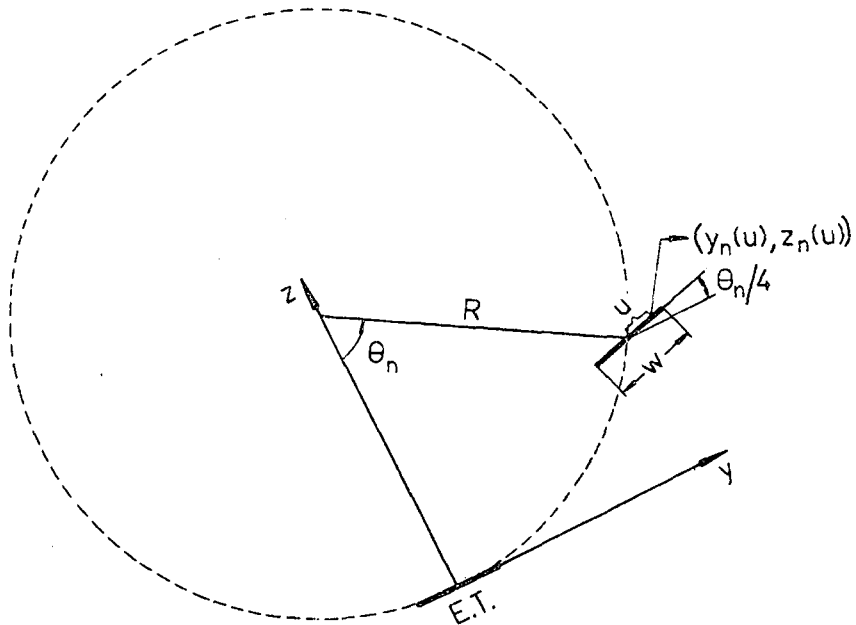


Fig. 2.8: Sistema de coordenadas en el que se expresa la ubicación de un punto dado de un espejo cualquiera. El valor de u caracteriza la posición del punto respecto del eje de simetría longitudinal del espejo considerado; W es el ancho de éste.

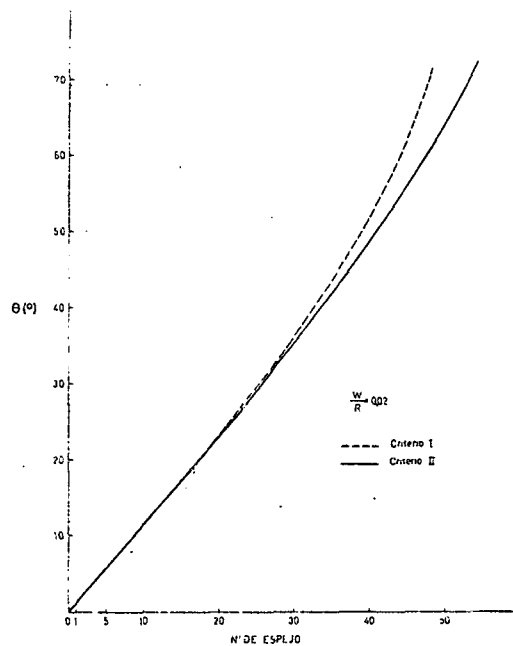


Fig. 2.9: Posición angular de los espejos en un CFEF con $W/R=0,02$, en función del número de espejo, para los dos criterios considerados.

un tratamiento bidimensional, o sea en el plano $P_{\perp}$.[†] En la Fig. 2.10 mostramos los apantallamientos y sombras producidos en dos pares de espejos, uno caracterizado por $\theta_{n+1} > \theta_n \geq 0$ y el otro por $\theta_n \leq \theta_{n+1} < 0$. De esta figura se concluye que, si $\phi < \pi/2 - \rho$, en los espejos con $\theta < 0$ no se produce ninguna pérdida, ya que, a pesar de producirse sombras, todos los rayos incidentes se reflejan y llegan al foco; en cambio, para $\theta \geq 0$, los rayos incidentes en h_n y d_n se pierden. Cuando $\phi > \pi/2 - \rho$, la situación se invierte y las pérdidas se producen para $\theta \leq 0$. Las pérdidas geométricas son, fundamentalmente, una función del ángulo de incidencia, es decir de ϕ , y dependen de ρ y del criterio adoptado para la ubicación de los espejos.

Uno de los métodos de cálculo de p_g es el propuesto por Russell et al. en la Ref. 2, en la cual p_g está dado por el cociente entre la sumatoria de todas las superficies del CFEF desde las cuales la radiación incidente sobre ellas no llega al receptor y la superficie de abertura, ambas proyectadas sobre un plano perpendicular a la dirección de los rayos incidentes (S_p y S_a , respectivamente). Nosotros, dentro de este método, además de evaluar p_g para el caso de elementos especulares de ancho infinitesimal tal como lo hicieron Russell et al.²⁾ (caso límite no realizable prácticamente), hemos establecido las fórmulas para hacerlo para anchos finitos, con lo cual las integrales de Russell et al. se reemplazan por sumatorias; asimismo, hemos considerado las dos disposiciones de los espejos ya mencionadas (en la Ref. 2 sólo se desarrollaron explícitamente las fórmulas correspondientes al criterio I). En esta sección detallamos el cálculo para espejos ubicados según el criterio II (para el correspondiente al criterio I ver Apéndice 2.B).

A partir de (2.19) y (2.20) resulta

$$h_n'' = \sqrt{(y_{n+1}''(-W/2) - y_n''(W/2))^2 + (z_{n+1}''(-W/2) - z_n''(W/2))^2}, \quad (2.25.a)$$

para $0 \leq n < n_{M1}$; mientras que para $-n_{M2} < n < 0$

$$h_n'' = \sqrt{(y_{n-1}''(-W/2) - y_n''(W/2))^2 + (z_{n-1}''(-W/2) - z_n''(W/2))^2}, \quad (2.25.b)$$

y además definimos $h_{n_{M1}}'' = h_{-n_{M2}}'' = 0$. Resulta evidente que, debido a la simetría del sistema, se verifica $h_n'' = h_{-n}''$ para $|n| \leq \min(n_{M1}, n_{M2})$; por lo tanto,

[†] Por esta razón, todas las superficies consideradas en el cálculo de p_g se refieren a superficies por unidad de longitud del concentrador. Asimismo, se consideran rayos incidentes paralelos al plano $P_{\perp}$; esta última hipótesis no quita generalidad a los resultados.

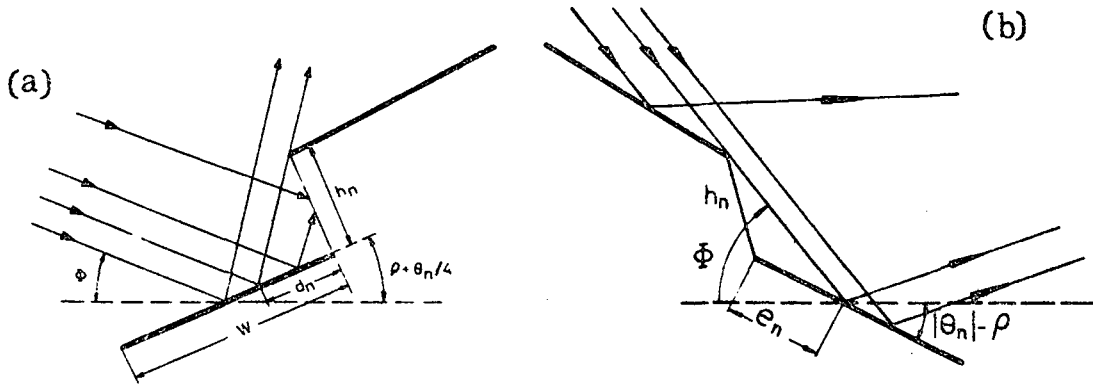


Fig. 2.10: Apantallamientos y sombras cuando $\phi < \pi/2 - \rho$ para dos pares de espejos ubicados de manera que $\theta > 0$ (Fig. a) y $\theta < 0$ (Fig. b). Con h_n indicamos la distancia entre los bordes de los espejos n y $n+1$ ($n-1$), para $0 \leq n < n_{M1}$ ($0 \geq n > -n_{M2}$); con d_n la parte del espejo n caracterizada porque la radiación reflejada desde ella es interceptada antes de llegar al receptor y con e_n la parte del espejo n a la cual no llegan los rayos incidentes.

Obsérvese que, salvo para el E.T. en el que e_n y d_n pueden ser distintos de cero simultáneamente, para cualquier otro espejo n , si $d_n \neq 0$ debe ser $e_n = 0$ y viceversa; por lo tanto, siempre que demos el intervalo donde es necesario calcular e_n o d_n , queda establecido que en él d_n o, respectivamente, e_n , es cero.

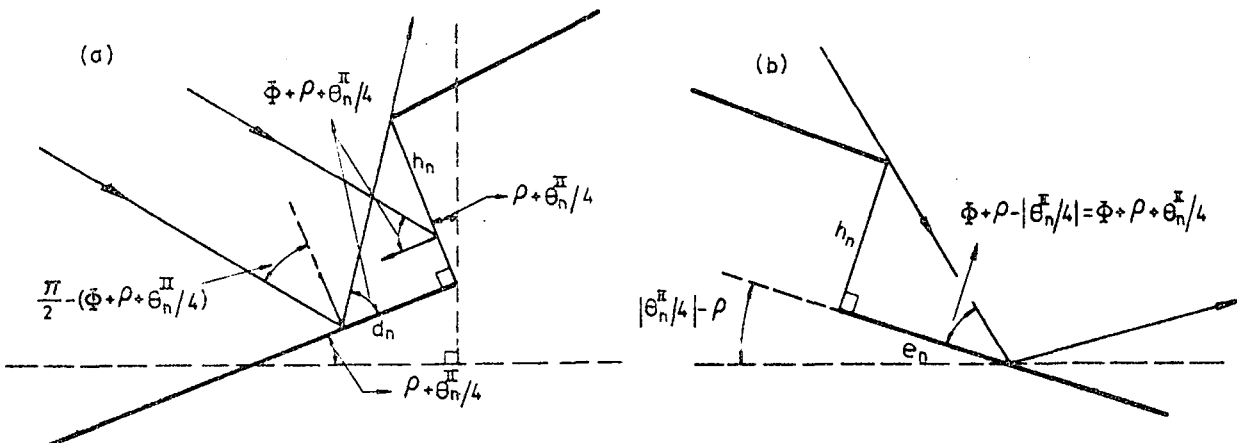


Fig. 2.11: Detalles geométricos y ángulos de interés para un par de espejos ubicados según el criterio II. Se considera $\phi < \pi/2 - \rho$ para

a) $\theta_{n+1} > \theta_n \geq 0$ y b) $\theta_n < \theta_{n+1} \leq 0$.

para el cálculo sólo es necesario utilizar (2.25.a) si $n_{M1} > n_{M2}$ o (2.25.b) si $n_{M1} < n_{M2}$. De la Fig. 2.11.a se deduce que

$$d_n'' = h_n'' \cotg(\phi + \rho + \theta_n''/4) \operatorname{sg}(n). \quad (2.26)$$

Por lo tanto, para cada ϕ ,

$$S_p'' = \sum_{n_i}^{n_s} \{h_n'' \cos(\phi + \rho + \theta_n''/4) \operatorname{sg}(n) + d_n'' \sin(\phi + \rho + \theta_n''/4)\}, \quad (2.27)$$

donde n_i y n_s son los n que caracterizan a los ángulos $\theta_n = \theta_i$ y $\theta_n = \theta_s$, respectivamente, siendo el significado de θ_i y θ_s el que se describe a continuación; el cálculo de estos ángulos está descrito en el Apéndice 2.B. Si $\phi < \pi/2 - \rho$ ($\phi > \pi/2 - \rho$) la sumatoria se extiende sobre todos los $\theta \geq 0$ ($\theta < 0$) iluminados, es decir que $\theta_s = \theta_{M1}$ ($\theta_s = -\theta_{M2}$) y $\theta_i = 0$; si todos los espejos con $\theta \geq 0$ ($\theta < 0$) están iluminados. Esta situación se presenta para valores de ϕ mayores (menores) que un determinado valor que llamaremos ϕ_1 (ϕ_2). Para $\phi < \phi_1$ ($\phi > \phi_2$), θ_i es igual al θ_n que caracteriza al primer espejo iluminado con $\theta \geq 0$ ($\theta < 0$). Hay que tener cuidado en la aplicación de las expresiones (2.26) y (2.27): a) si d_n'' resulta mayor que W (indica que todos los rayos incidentes en el espejo n son interceptados antes de llegar al receptor), hay que tomar $d_n'' = W$ y en el caso de que $d_n'' < 0$ (indica que todos los rayos reflejados en el espejo n llegan al foco) hay que tomar $d_n'' = 0$. De (2.26), la condición $d_n'' < 0$ equivale a $\phi + \rho + \theta_n''/4 > \pi/2$, lo que conduce a que el primer término de (2.27) sea negativo (indicando que entre los espejos n y $n+1$ no incide radiación), por lo que h_n'' también debe tomarse igual a cero. Para poder calcular p_g resta calcular S_a , cuya expresión se obtiene fácilmente de la Fig. 2.4:

$$S_a = 2R \operatorname{sen}(\phi) \operatorname{sen}(\theta_a/2). \quad (2.28)$$

Entonces, p_g se calcula a través de

$$p_g'' = (S_p''/S_a). \quad (2.29.a)$$

A fin de disponer de un método más apropiado para el cálculo de las pérdidas geométricas totales (ver Sección 2.6) y la distribución del flujo de energía en el plano receptor, hemos desarrollado un procedimiento alternativo para evaluar p_g . Este, a diferencia del anterior, calcula la sumatoria de las superficies "útiles" del CFEF (definidas como aquellas para las que los rayos reflejados en ellas llegan al foco), proyectadas sobre un plano normal a la dirección de los rayos incidentes (S_u). En este caso:

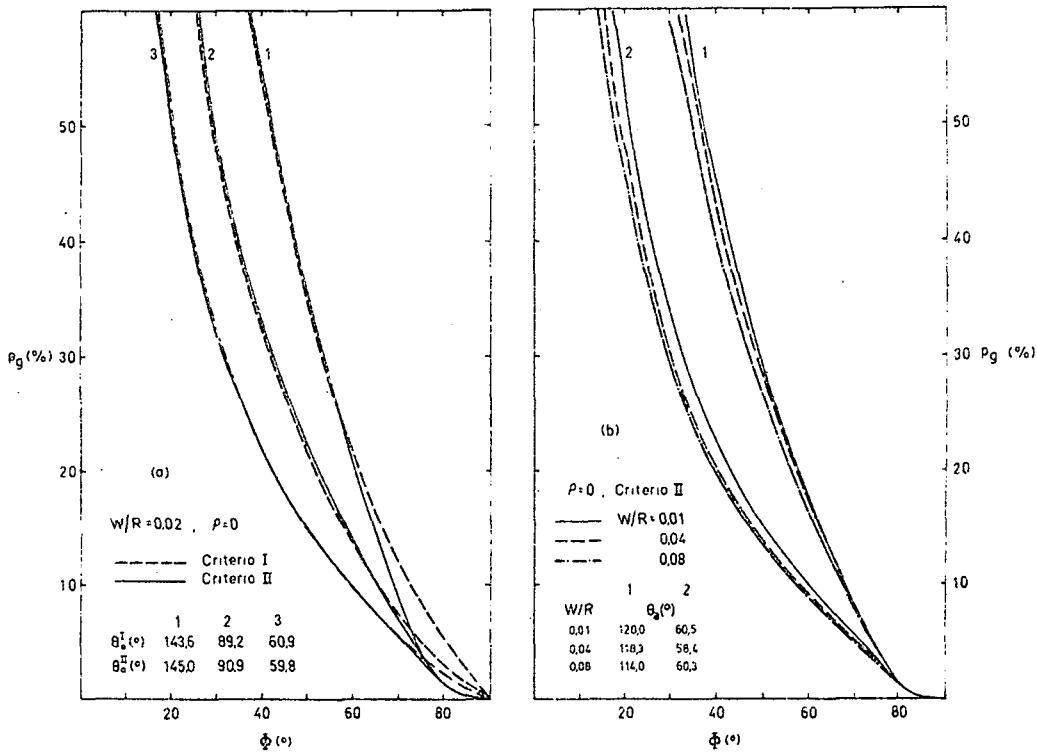


Fig. 2.12: Pérdidas geométricas p_g en función de ϕ para varios CFEF con
a) $W/R=0,02$ y $p=0$, para distintos valores de θ_a y ambos criterios;
b) $p=0$, para distintos valores de W/R , dos valores de θ_a y el criterio II.
Siendo $p=0$, las figuras son simétricas respecto de $\phi=90^\circ$.

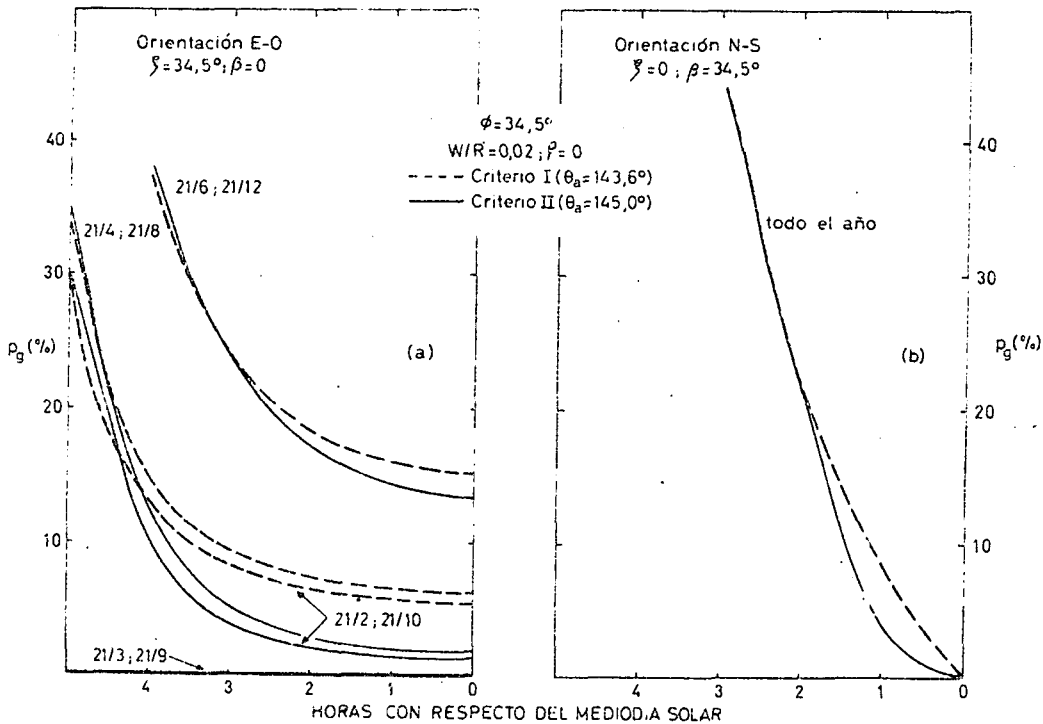


Fig. 2.13: Pérdidas geométricas p_g para distintas épocas del año, para un concentrador con $W/R=0,02$, $p=0$ y $\theta_a=145^\circ$, ubicado a $\phi=34,5^\circ$ S. Se consideran ambos criterios de colocación de espejos y las dos orientaciones seleccionadas.

$$p_g^{II} = (1 - S_u^{II}/S_a) \quad (2.29.b)$$

y

$$S_u^{II} = \sum_{n_i^{**}}^{n_s^{**}} (W - d_n^{II} - e_n^{II}) \sin(\Phi + \rho + \theta_n^{II}/4) + W \sin(\Phi + \rho + \theta_M^{II}/4), \quad (2.30)$$

donde e_n^{II} se calcula mediante (ver Fig. 2.11.b):

$$e_n^{II} = h_n^{II} \cotg(\Phi + \rho + \theta_n^{II}/4) \operatorname{sg}(-n). \quad (2.31)$$

Recuérdese que, salvo para el E.T., e_n y d_n no pueden ser distintos de cero simultáneamente (ver Fig. 2.10); por lo tanto, si $\Phi < \pi/2 - \rho$ ($\Phi > \pi/2 - \rho$) sólo es necesario calcular e_n^{II} para $\theta_n \leq 0$ ($\theta_n \geq 0$) y $\theta_n > 4(\pi/2 - \rho - \Phi)$ ($\theta_n < 4(\pi/2 - \rho - \Phi)$) y d_n^{II} para $0 \leq \theta_n \leq 4(\pi/2 - \rho - \Phi)$ ($4(\pi/2 - \rho - \Phi) \leq \theta_n \leq 0$)).

Los valores de θ_i^* y θ_s^* dependen del valor de Φ . Si $\Phi < \pi/2 - \rho$ ($\Phi > \pi/2 - \rho$) resulta $\theta_M^* = -\theta_{M2}^*$ ($\theta_M^* = \theta_{M1}$) y $\theta_s^* = \theta_{M1}$ ($\theta_s^* = -\theta_{M2}$), mientras que θ_i^* corresponde al del primer espejo iluminado sin tener en cuenta el espejo caracterizado por $-\theta_{M2}$ (θ_{M1}). Para valores de Φ mayores (menores) que un determinado valor Φ_1^* (Φ_2^*) todos los espejos del concentrador están iluminados. Nuevamente destacamos que, cuando $d_n > W$ ó $e_n > W$, deben tomarse $d_n = W$ ó $e_n = W$, respectivamente, y que, en los casos $d_n < 0$ ó $e_n < 0$, se coloca $d_n = 0$ ó $e_n = 0$, respectivamente.

Los métodos de cálculo de p_g fueron expresados en un programa que denominamos PERGEOM. Si en éste se incluye al programa FITE como subrutina (ver Sección 2.2), pueden calcularse las pérdidas geométricas en función de la hora del día y la época del año para cualquiera de las dos orientaciones consideradas y para distintas inclinaciones del plano de abertura. La evaluación de Russell et al. (anchos infinitesimales) y la nuestra (anchos finitos, por ambos métodos) coinciden, como corresponde, para W/R tendiendo a cero, pero se apartan significativamente para $W/R \geq 0,04$.

En la Fig. 2.12.a mostramos cómo varían las p_g en función de Φ , para un CFEF con $W/R = 0,02$, $\rho = 0$, distintos ángulos de abertura θ_a y para ambos criterios considerados. Las figuras son simétricas respecto a $\Phi = 90^\circ$ ya que se considera $\rho = 0$. Las conclusiones más importantes son:

- a) p_g aumenta con θ_a y tanto más cuanto menor sea Φ , como era razonable esperar ya que, según la Fig. 2.9, los últimos espejos están más separados que los primeros y, por lo tanto, la superficie no útil es mayor;
- b) para Φ cercano a 90° , que son los valores de mayor interés (ver Fig. 2.13), resulta $p_g^{II} < p_g^I$ mientras que, para valores bajos de Φ , es $p_g^{II} > p_g^I$;

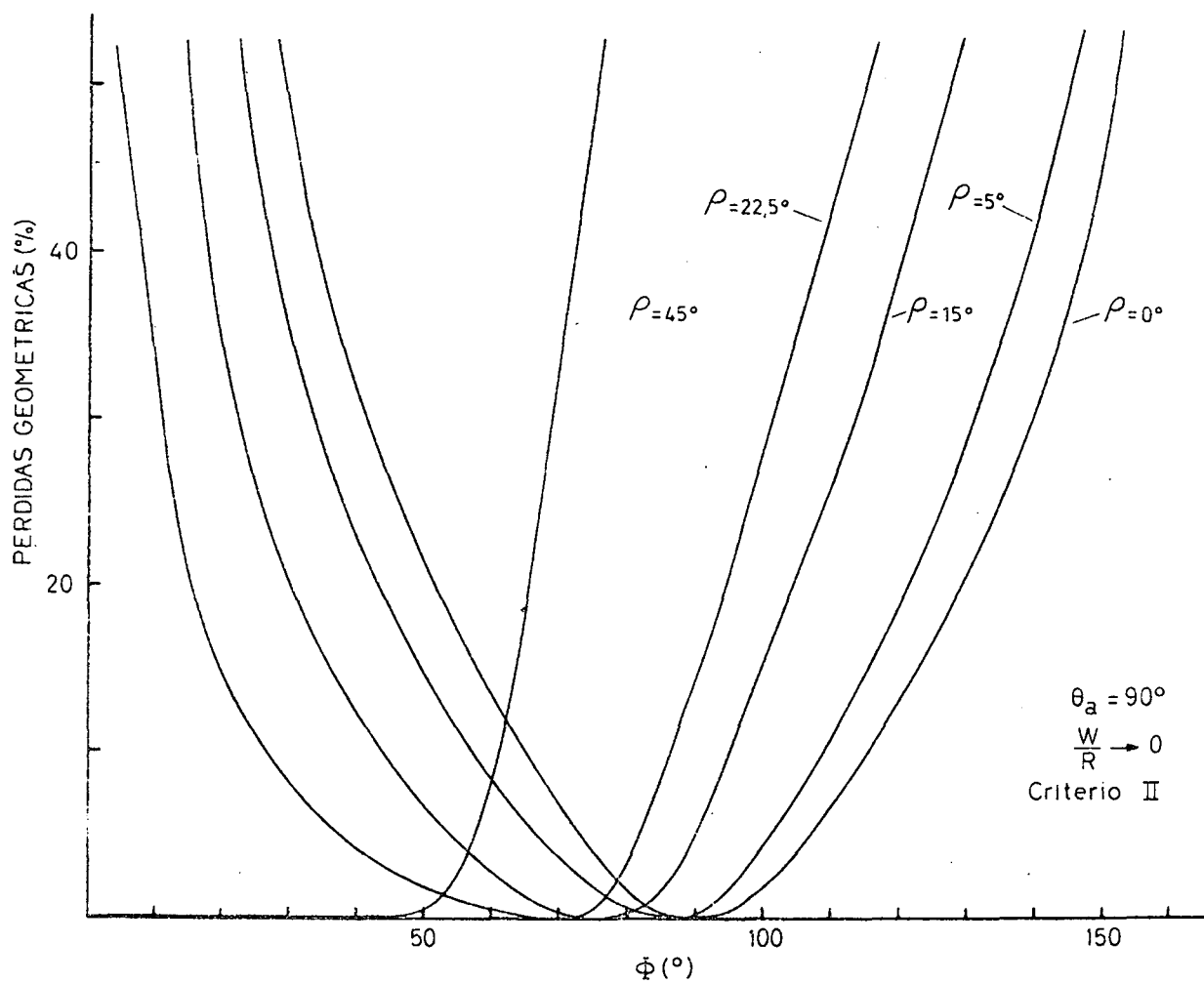


Fig. 2.14: Pérdidas geométricas p_g en función de ϕ para un CFEF con $W/R \rightarrow 0$, criterio I y $\theta_a \sim 90^\circ$, para distintos valores de ρ .

esto se debe a dos efectos que se contraponen: $h_n'' < h_n'$, que disminuye las pérdidas para el criterio II con relación al criterio I, y $d_n'' > d_n'$, que las aumenta, predominando en un caso el primero y, en el otro, el segundo.

En la Fig. 2.12.b se muestra p_g'' en función de ϕ para un CFEF con $\rho = 0$, dos valores de θ_a y para espejos con distintos valores de W/R ; de ella se concluye que las pérdidas geométricas disminuyen al aumentar W/R lo cual es debido principalmente al peso que van tomando los espejos caracterizados por θ_{M1} y $-\theta_{M2}$, que siempre están totalmente iluminados.

En la Fig. 2.13 se muestran las pérdidas geométricas para ambos criterios, para distintas épocas del año y para un CFEF con $W/R = 0,02$, $\rho = 0$, $\theta_a \sim 145^\circ$, y con una inclinación igual a la latitud del lugar ($34^\circ 30'$). Se concluye que, en lo que a pérdidas se refiere, tratándose de concentradores de largo infinito la orientación E-0 es más conveniente que la N-S; esto podía preverse de la Fig. 2.5 ya que, durante las 6 horas centradas alrededor del mediodía solar, que son las de mayor interés, a lo largo del año $\phi(E-0)$ varía en $\pm 30^\circ$ respecto de $\phi = 90^\circ$, al que corresponde $p_g = 0$, mientras que $\phi(N-S)$ lo hace en $\pm 45^\circ$.

Si se considera $\rho \neq 0$ resulta $p_g \neq 0$ para $\phi + \rho = 90^\circ$ y las pérdidas geométricas no resultan simétricas, como ilustramos en la Fig. 2.14; no obstante, las conclusiones deducidas de las Figuras 2.12 y 2.13, dada su justificación, son independientes del valor de ρ . Recuérdese que, para un CFEF caracterizado por un W/R y un criterio dados, el máximo θ_a compatible con ellos se obtiene con $\rho = 0$. La variación de p_g en función de ρ da la posibilidad de elegir éste de manera de disminuir las pérdidas para una época dada del año o determinadas horas del día, una vez establecidos los demás parámetros del CFEF.

2.6. PERDIDAS GEOMETRICAS TOTALES

En esta sección evaluamos las pérdidas geométricas totales p_{gt} , que resultan de agregar a p_g las producidas en los extremos del receptor, que se considera del mismo largo L que el CFEF. Nuestros principales propósitos son: a) determinar un valor mínimo de L/R a partir del cual las pérdidas en los extremos dejan de ser significativas ($p_{gt} \approx p_g$); b) poder simular el comportamiento de concentradores con largo finito ya que, en la primera etapa de experimentación, contaremos con dos CFEF de longitud reducida (ver Cap. 4).

Realizamos el cálculo de p_{gt} siguiendo el procedimiento alterna-

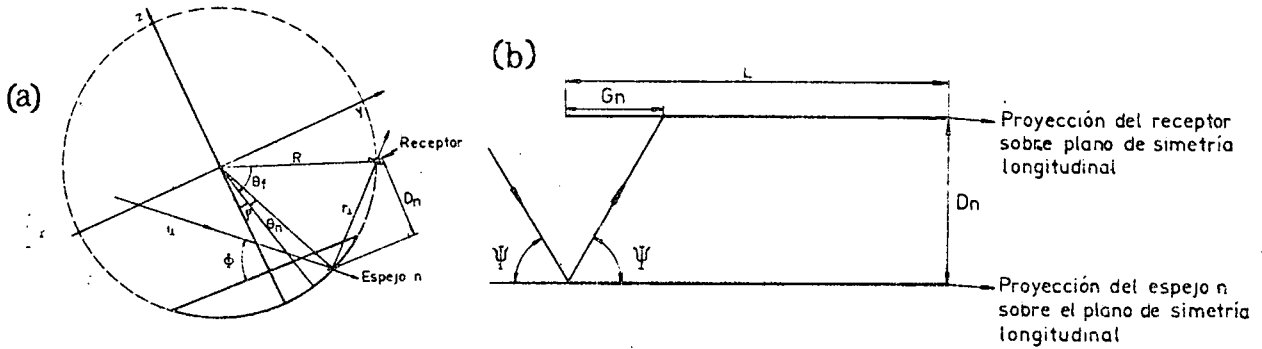


Fig. 2.15: a) Proyección sobre el plano P_1 de un rayo incidente y del correspondiente rayo reflejado, e intersección de dicho plano con el espejo considerado y con el receptor; y b) Proyección sobre el plano de simetría longitudinal del CFEF del rayo incidente, del reflejado, del receptor y del espejo considerado. Con D_n se indica la distancia entre la proyección del receptor y la del espejo n sobre el plano de simetría y con G_n la porción del receptor no iluminada por dicho espejo.

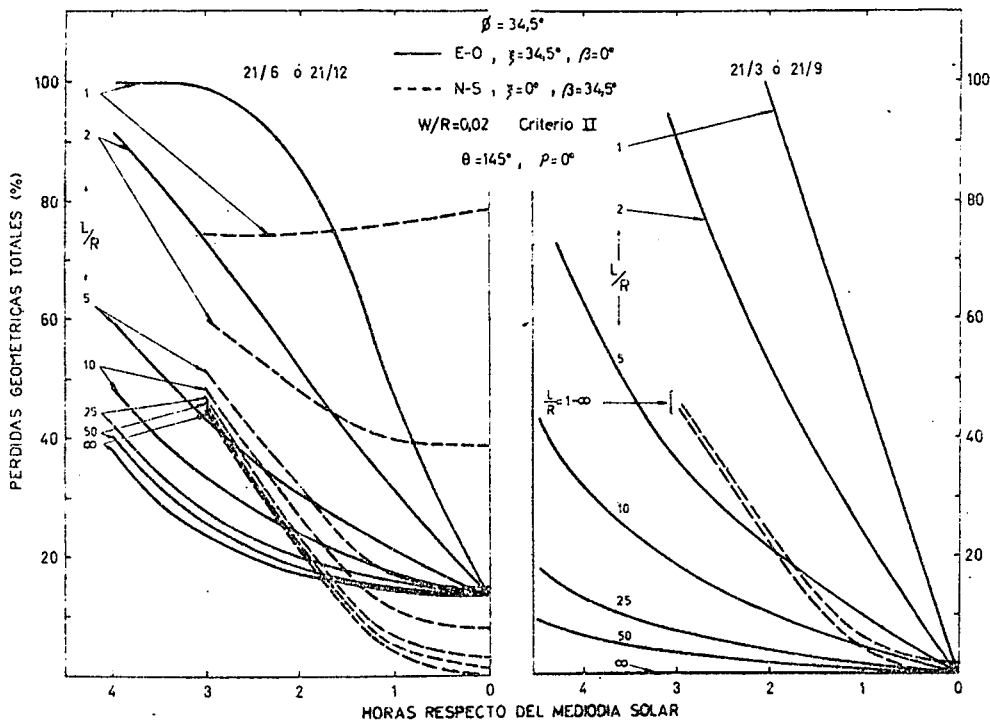


Fig. 2.16: Pérdidas geométricas totales p_{gt} en función de la hora respecto del mediodía, para distintas épocas del año. Para las dos orientaciones consideradas.

tivo citado en pág. 27. Como lo hicimos en la sección anterior (ver ec. (2.30)), calcularemos la sumatoria S_u de las superficies útiles, introduciendo en cada término un factor que tiene en cuenta qué parte del receptor no está iluminado por el espejo correspondiente:

$$S_u = \sum_{n=1}^{n_s^*} (W - d_n - e_n) f_n (L - G_n) + W f_M (L - G_M), \quad (2.32)$$

donde f_n es el factor que proyecta la superficie considerada sobre un plano perpendicular a la dirección de los rayos incidentes y G_n es la longitud del receptor que no es iluminada por luz reflejada en el espejo n . Como ahora estamos considerando el caso tridimensional, $f_n = K \sin(\phi + \rho + \theta_n/4)$, donde K es el factor que proyecta al rayo incidente sobre el plano $P_\perp$. Observemos que K sólo depende del ángulo de incidencia.

La expresión de S_a es:

$$S_a = 2 R L \sin(\theta_a/2) f_a, \quad (2.33)$$

donde f_a es el factor que proyecta el plano de abertura sobre un plano perpendicular a los rayos incidentes, y está dado por $f_a = K \sin(\phi)$ por las mismas razones apuntadas anteriormente.

Dado que $p_{gt} = 1 - S_u/S_a$, calculamos el cociente de las superficies:

$$S_u/S_a = (2 R \sin(\theta_a/2) \sin(\phi))^{-1} \left\{ \sum_{n=1}^{n_s^*} (W - d_n - e_n) \cdot \sin(\phi + \rho + \theta_n/4) (1 - G_n/L) + W \sin(\phi + \rho + \theta_M/4) (1 - G_M/L) \right\}. \quad (2.34)$$

Para hallar la expresión de G_n , utilizamos la Fig. 2.15 donde mostramos, en el plano $P_\perp$ y en el plano de simetría longitudinal del CFEF, la proyección de los rayos incidente y reflejado en un extremo del CFEF, que es el que define el valor de G_n . Se deduce que:

$$G_n = D_n \cotg(\psi) \quad \text{y} \quad D_n = R (\cos(\rho + \theta_n) - \cos(\rho + \theta_f)) , \quad (2.35)$$

por lo cual:

$$G_n/L = (R/L) \cotg(\psi) (\cos(\rho + \theta_n) - \cos(2\phi + 3\rho)) . \quad (2.36)$$

Si resulta $G_n/L > 1$, significa que el receptor no está iluminado por rayos reflejados en el espejo n ; entonces debe tomarse $G_n/L = 1$.

Luego, a partir de (2.34) y (2.36) extraemos dos conclusiones interesantes: a) no se requiere hallar el valor de K ya que (2.34) es independiente de este valor. Este resultado no debe sorprender porque (2.34) es el cociente entre las proyecciones de 2 superficies, siendo el valor de K el mismo para ambas ya que sólo depende del ángulo de incidencia; b) si $L \gg R$, como $G_n/L \approx 0$ (ver (2.36)), se cumple que $p_{gt} \approx p_g$ (ver Sección 2.5).

En este desarrollo no hemos empleado ningún supraíndice ya que las fórmulas expuestas son igualmente válidas para los criterios I y II. A partir de ellas construimos el programa de cálculo PERTOT, que incluye al PERGEOM y utiliza la subrutina FITE.

En la Fig. 2.16 se muestra cómo varía p_{gt}'' a lo largo del día en distintas épocas del año, para un CFEF con diversos valores de L/R , $W/R = 0,02$, $\rho = 0^\circ$ y $\theta_a = 145^\circ$, ubicado a $34,5^\circ S$ con una inclinación igual a la latitud del lugar. Se observa que: a) para $L/R \geq 50$, p_{gt} se acerca suficientemente a p_g como para considerar que las pérdidas en los extremos dejan de ser significativas ($p_{gt} - p_g \leq 5\%$); b) para la orientación N-S, siempre se puede lograr, para cualquier época del año y para cualquier valor de L/R , que p_{gt} prácticamente coincida con p_g en las horas de interés; para ello basta que $\Psi(N-S) \approx 90^\circ$ durante las horas centradas alrededor del mediodía solar, lo que se obtiene con $\beta = 90^\circ - \Psi(N-S, \xi = \beta = 0^\circ)$, donde el valor de Ψ (ver Fig. 2.5) es su promedio en las mencionadas horas; en la figura, esta condición se cumple para los equinoccios. Las conclusiones precedentes son independientes del criterio de ubicación de espejos y del ángulo de abertura utilizado, lo cual será discutido más extensamente en el capítulo siguiente.

2.7. FACTOR DE CONCENTRACION GEOMETRICO

En lo que sigue consideramos un receptor plano que contiene al foco y tal que, en todo momento, la normal al mismo que pasa por dicho foco corta también al eje de simetría longitudinal del E.T.. Por otra parte, definimos como factor de concentración C al cociente entre la intensidad media incidente sobre el receptor (I_r) y la intensidad de la radiación solar directa (I_s):

$$C = I_r / I_s, \quad (2.37)$$

donde las intensidades se expresan como potencia por unidad de área.

En esta sección se realiza un análisis bidimensional como el efectuado en la Secc. 2.5, es decir: que sus resultados serán válidos cuando $p_{gt} \approx p_g$. Además, se considera que las superficies especulares utilizadas son perfectas, es decir, tienen coeficiente de reflexión igual a 1 y cumplen exactamente la ley de reflexión (no hay dispersión); bajo estas condiciones identificamos al factor de concentración resultante con la denominación de "geométrico" (C_g), ya que sólo depende de la geometría y posición de CFEF (por ejemplo, de W/R , θ_a , etc.) y para diferenciarlo del que se obtiene considerando las propiedades físicas de los espejos utilizados.

Con las hipótesis enunciadas e imponiendo, además, la condición de que el ancho del receptor sea tal que en todo momento la totalidad de la radiación proveniente del concentrador incida sobre el receptor, la potencia por unidad de longitud (por ej. W/m) incidente en el receptor es:

$$F_r = I_s S_a (1 - p_g) . \quad (2.38)$$

La intensidad media en el receptor es

$$I_r = F_r / S_r , \quad (2.39)$$

donde S_r es la superficie del receptor por unidad de longitud, por lo que S_r resulta ser numéricamente igual al ancho del mismo. Para que se cumpla lo establecido más arriba, S_r debe ser, como mínimo, igual al máximo ancho de la imagen solar en el receptor:

$$S_{r-mín} = W + 4 R \operatorname{tg}(\alpha_s/2) , \quad (2.40)$$

donde $\alpha_s = 32'$ es la abertura angular del Sol. Si fuese $S_r < S_{r-mín}$, se producirían pérdidas adicionales de la energía solar reflejada por el concentrador y la expresión (2.38) no sería válida.

Por lo tanto, utilizando las (2.28) y (2.37-40) se obtiene:

$$C_g = 2 \operatorname{sen}(\theta_a/2) \operatorname{sen}(\phi) (1 - p_g) / (W/R + 4 \operatorname{tg}(\alpha_s/2)) . \quad (2.41)$$

De (2.41) se observa que C_g depende considerablemente de W/R y de θ_a y que, a través de ϕ y p_g , es función de la época del año y de la hora del día.

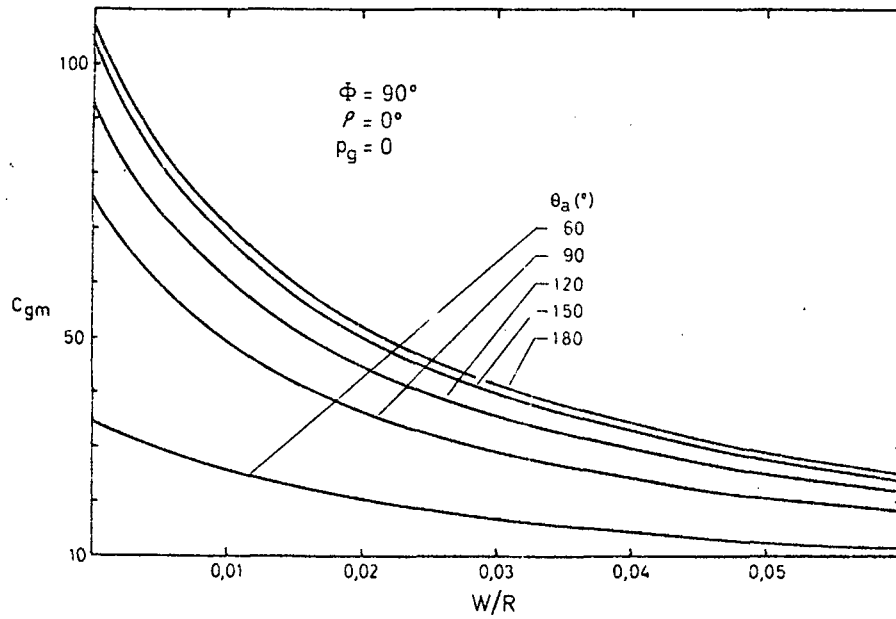


Fig. 2.17: Factor de concentración geométrica máximo C_{gm} ($\phi = 90^\circ$ y $\rho_g = 0$), en función de W/R , para distintos valores del ángulo de apertura θ_a . Se utilizó $C_{gm} = 2 \sin(\theta_a/2) / \{W/R + 4 \tan(\alpha_s/2)\}$ sin tener en cuenta si el valor de θ_a empleado corresponde exactamente al que se obtendría para el valor correspondiente de W/R .

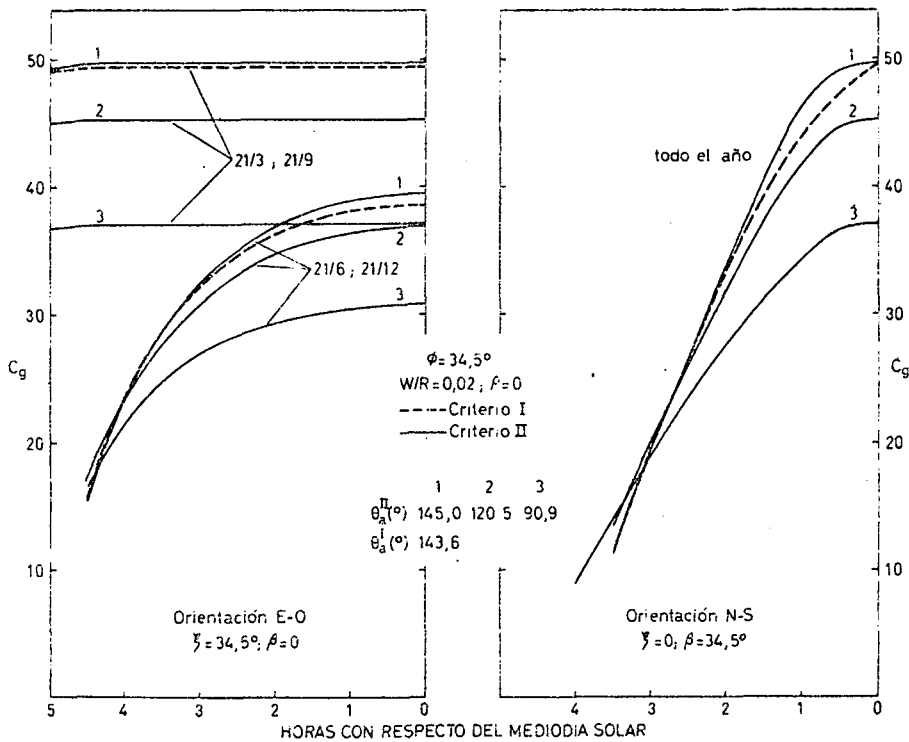


Fig. 2.18: Variación diaria del factor de concentración geométrica C_g de un CFEF ubicado a $34,5^\circ$ S.

En la Fig. 2.17 mostramos cómo varía el valor máximo de C_g , que se logra con $\phi = 90^\circ$ y $p_g = 0$ ($\rho = 0$), en función de W/R , para concentradores con distintos θ_a . En la Fig. 2.18 se muestra cómo varía C_g en función de la época del año para un CFEF con $W/R = 0,02$, $\rho = 0$ e inclinado con la latitud del lugar, orientado en las dos direcciones previamente mencionadas. Sólo para el mayor θ_a se grafican los resultados para ambos criterios ya que, como puede observarse en la Fig. 2.12, cuanto menor es el ángulo de abertura, menor es la diferencia entre p_g' y p_g'' . De la Fig. 2.18 se concluye, como era de esperar, que $C_g'' > C_g'$, debido a que $p_g' > p_g''$, como fue discutido en la Secc. 2.5; además, se observa que para la orientación E-O el valor máximo C_{gm} se obtiene, prácticamente durante todo el día, en los equinoccios (21/3 y 21/9) y que para la N-S se lo logra en todos los mediodías.

Aún conviene destacar que aumentando θ_a no necesariamente aumenta C_g , ya que también aumenta p_g , pudiendo llegar a ser este factor el preponderante.

Finalmente, destaquemos que un incremento del factor de concentración, para temperaturas fijas del fluido a la entrada y la salida del receptor-convertidor, implica un aumento en la eficiencia de conversión de energía solar a térmica. En nuestro caso interesa obtener una temperatura elevada ($\sim 450^\circ\text{C}$) del fluido a la salida del receptor, a fin de lograr una eficiencia razonable en los turbogeneradores convencionales. En el Apéndice 2.C mostramos con algún detalle que incrementar el valor del factor de concentración dentro del intervalo de valores obtenible con concentradores CFEF, lleva a un aumento importante de la eficiencia de conversión solar-térmica.

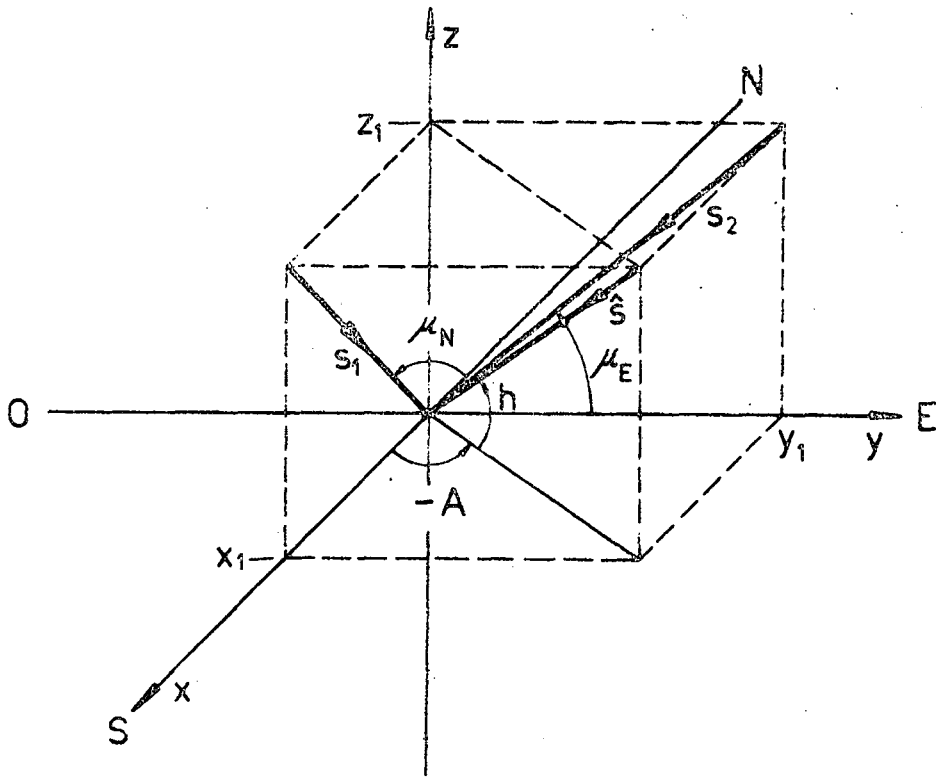


Fig. 2.19: La dirección del haz solar incidente, representada por $\vec{s}$, es proyectada sobre los planos (xz) e (yz) , donde quedan definidos los ángulos μ_N y μ_E .

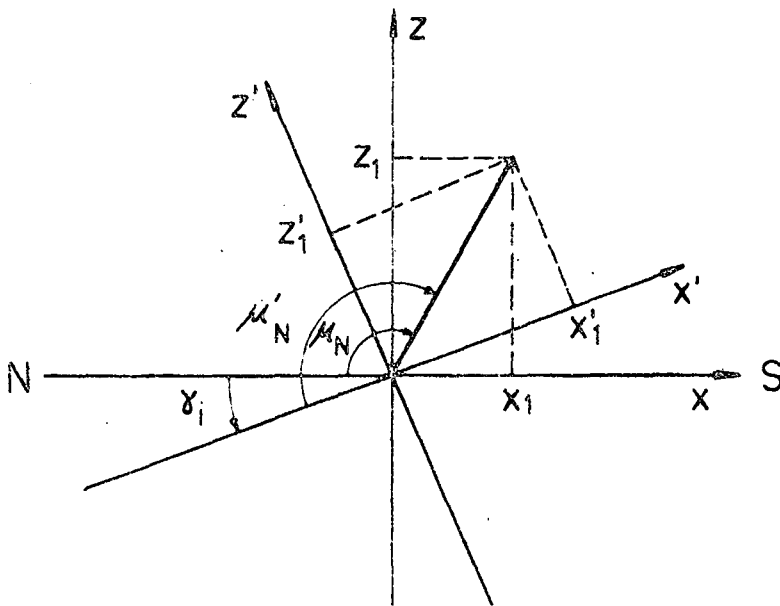


Fig. 2.20: Nuevas coordenadas en el plano xz al rotar el sistema en un ángulo γ_i alrededor del eje y (dirección E-0).

APENDICES

2.A. CALCULO DE ϕ y ψ

A fin de obtener las expresiones explícitas de ϕ y ψ en función de la latitud del lugar para cualquier época del año y hora del día, comen-
zamos por expresar la dirección de los rayos solares incidentes, versor $\hat{s}$
en la Fig. 2.19 en un sistema de coordenadas cuyo eje x está en dirección
norte-sur y cuyo eje z coincide con la vertical del lugar. El versor $\hat{s}$
está determinado por los ángulos A (ángulo azimutal solar) y h (altura so-
lar). Si se lo proyecta sobre los planos (xz) e (yz) , se determinan los
versores $\hat{s}_1$ y $\hat{s}_2$ respectivamente. El ángulo que forma $\hat{s}_1$ con el eje x ne-
gativo (dirección norte) lo denominamos $\mu_N = \arccos(-\hat{x} \cdot \hat{s}_1)$ y el que determi-
na $\hat{s}_2$ con el eje y positivo (dirección este), $\mu_E = \arccos(\hat{y} \cdot \hat{s}_2)$.

Los ángulos μ_N y μ_E permiten definir la dirección de los rayos
solares incidentes y son independientes del concentrador utilizado. De la
Fig. 2.19 resulta

$$\mu_N = \arctg(-z_1/x_1) \text{ y } \mu_E = \arctg(z_1/y_1), \quad (2.42)$$

donde

$$x_1 = \cos(h) \cos(A) \text{ , } y_1 = -\cos(h) \sin(A) \text{ , } z_1 = \sin(h). \quad (2.43)$$

Luego, reemplazando en (2.42):

$$\mu_N = \arctg(-\tan(h)/\cos(A)) \text{ y } \mu_E = \arctg(\tan(h)/\sin(A)). \quad (2.44)$$

Las expresiones de h y A en función de la época del año y de la hora del
día se obtienen de las Refs. 6 y 7:

$$h = \arcsen \{ \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(t) \}, \quad (2.45)$$

$$\sin(A) = \cos(\delta) \sin(t) / \cos(h) \text{ , } \quad (2.46)$$

$$\cos(A) = \{ \cos(\delta) \cos(t) - \sin(h) \cos(\phi) \} / \{ \cos(h) \sin(\phi) \}, \quad (2.47)$$

y

$$\begin{aligned} \delta = & 0,33281 - 22,984 \cos(\omega m) - 0,3499 \cos(2 \omega m) - 0,1398 \cos(3 \omega m) + \\ & + 3,7872 \sin(\omega m) + 0,03205 \sin(2 \omega m) + 0,071817 \sin(3 \omega m) \text{ , } \end{aligned} \quad (2.48)$$

donde

ϕ = latitud del lugar,

t = hora en grados respecto del mediodía solar,

δ = declinación solar en grados,

$\omega = 2\pi/365$,

m = número del día del año.

De las ecuaciones (2.44)-(2.48) pueden calcularse μ_N y μ_E . Si ahora se rota el sistema de coordenadas un ángulo γ_i , tomando como eje de giro el eje y , que es el caso que nos interesa, las variables en este nuevo sistema son (ver Fig. 2.20):

$$z'_1 = z_1 \cos(\gamma_i) - x_1 \sin(\gamma_i) \quad , \quad x'_1 = z_1 \sin(\gamma_i) + x_1 \cos(\gamma_i) \quad , \quad y'_1 = y_1 \quad (2.49)$$

y, utilizando (2.42),

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\mu'_N(\gamma_i)) &= \{-z_1 \cos(\gamma_i) + x_1 \sin(\gamma_i)\} / \{z_1 \sin(\gamma_i) + x_1 \cos(\gamma_i)\} = \\ &= \{\operatorname{tg}(\mu_N) + \operatorname{tg}(\gamma_i)\} / \{1 - \operatorname{tg}(\mu_N) \operatorname{tg}(\gamma_i)\} = \\ &= \operatorname{tg}(\mu_N + \gamma_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{y} \quad \operatorname{tg}(\mu'_E(\gamma_i)) &= \{z_1 \cos(\gamma_i) - x_1 \sin(\gamma_i)\} / y_1 = \\ &= \operatorname{tg}(\mu_E) \cos(\gamma_i) + \cotg(A) \sin(\gamma_i) ; \end{aligned}$$

por lo tanto

$$\mu'_N(\gamma_i) = \mu_N + \gamma_i \quad (2.50)$$

como era de esperar, y

$$\mu'_E(\gamma_i) = \operatorname{arctg}\{\operatorname{tg}(\mu_E) \cos(\gamma_i) + \cotg(A) \sin(\gamma_i)\}. \quad (2.51)$$

Considerando ahora la optimización del funcionamiento de un concentrador, se observa que es necesario inclinar su plano de abertura hacia el norte. Si la inclinación que se le da es γ_i , para orientación E-0 debe ser $\beta = 0$ y $\xi = \gamma_i$; por lo tanto, de las definiciones dadas en la Secc. 2.2, resulta $\phi = \mu'_N(\xi)$ y $\psi = \mu'_E(\xi)$. En cambio, para orientación N-S, debe ser $\xi = 0$ y $\beta = \gamma_i$, por lo que $\phi = \mu'_E(\beta)$ y $\psi = \mu'_N(\beta)$. De estas expresiones es evidente que para concentradores con la misma inclinación γ_i del plano de abertura, los valores de ϕ y ψ se intercambian cuando pasamos de una orientación a la otra.

2.B. PERDIDAS GEOMETRICAS

En este Apéndice completaremos lo discutido en la Secc. 2.5. En 2.B.1 desarrollamos explícitamente el cálculo de las pérdidas geométricas cuando se consideran los espejos ubicados según el criterio I y en 2.B.2 damos los procedimientos para evaluar los límites de las sumatorias que son necesarios para el cálculo.

2.B.1. Cálculo de p_g^I

El primer paso es expresar h_n^I . A partir de la fórmula general (2.25) se puede obtener la expresión de h_n^I con sólo cambiar los supraíndices II por I, pero, utilizando la condición (2.21), la misma se simplifica a

$$h_n^I = z_{n+1}^I (-W/2) - z_n^I (W/2)$$

para $0 \leq n < n_{M1}$, mientras que para $-n_{M2} < n < 0$ resulta

$$h_n^I = z_{n-1}^I (-W/2) - z_n^I (W/2).$$

A partir de la Fig. 2.21.a se deduce

$$d_n^I = h_n^I \cos(\Phi + \rho + \theta_n^I/2) \operatorname{sg}(n) / \sin(\Phi + \rho + \theta_n^I/4) \quad (2.52)$$

$$S_p^I = \sum_{n_i}^{n_s} \{ h_n^I \cos(\Phi + \rho) \operatorname{sg}(n) + d_n^I \sin(\Phi + \rho + \theta_n^I/2) \}. \quad (2.53)$$

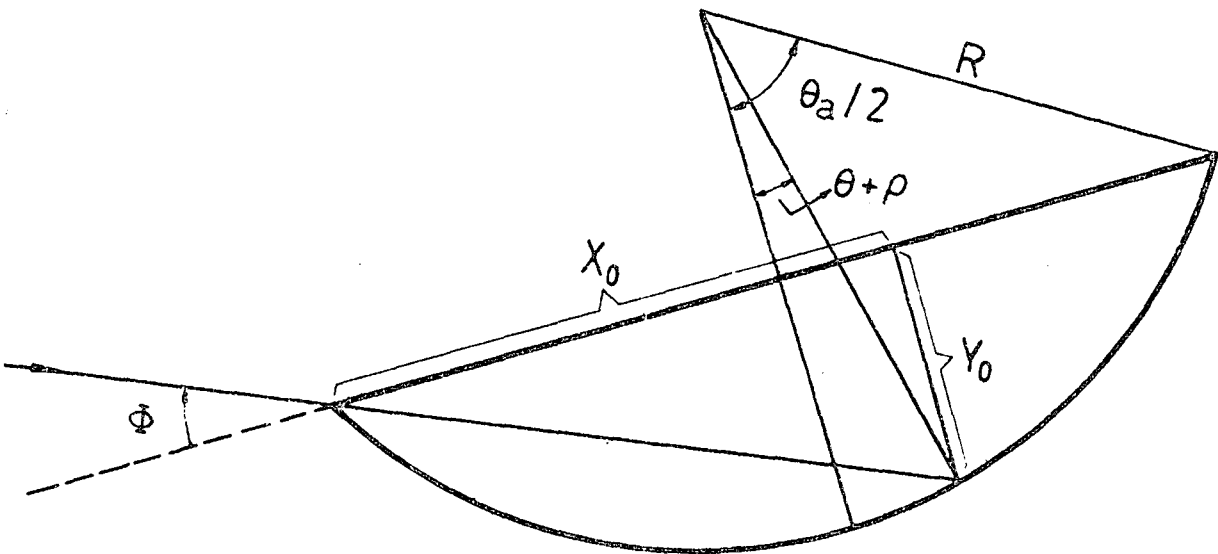
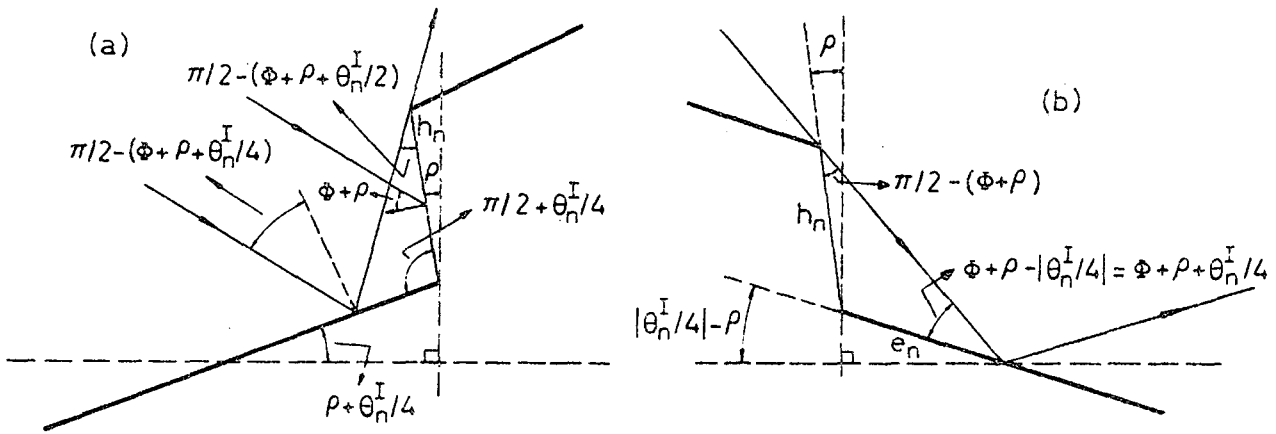
Los valores de n_i y n_s tienen, por supuesto, el mismo significado que el ya expuesto en la Secc. 2.5. Debemos considerar nuevamente que, si $d_n^I > W$ ($d_n^I < 0$) corresponde tomar $d_n^I = W$ ($d_n^I = 0$). Observemos que para este criterio los términos de (2.53) que contienen a h_n^I están siempre presentes, ya que, siendo todos los bordes paralelos, al incidir radiación sobre un h_n también incide sobre todos los demás a partir de ése.

Para el cálculo de p_g^I , utilizando la metodología alternativa propuesta por nosotros en la pág. 27, necesitamos conocer la expresión de e_n^I , que deducimos de la Fig. 2.21.b:

$$e_n^I = h_n^I \cos(\Phi + \rho) \operatorname{sg}(-n) / \sin(\Phi + \rho + \theta_n^I/4). \quad (2.54)$$

Recuérdese que, salvo para el E.T., e_n y d_n no pueden ser distintos de cero simultáneamente (ver Fig. 2.10); por lo tanto, si $\Phi < \pi/2 - \rho$ ($\Phi > \pi/2 - \rho$), es sólo necesario calcular e_n^I para $\theta_n \leq 0$ ($\theta_n \geq 0$) y d_n^I para $\theta_n \geq 0$ ($\theta_n \leq 0$).

Para el cálculo de S_u^I puede utilizarse la expresión (2.30) cambiando, obviamente, los supraíndices II por I.



2.8.2. Cálculo de los límites de las sumatorias

Evaluaremos los valores de Φ_1 , Φ_2 , Θ_i , Θ_s , Φ_1^* , Φ_2^* , Θ_i^* y Θ_s^* ; los cuatro primeros son necesarios para el cálculo de las pérdidas geométricas si se utiliza la metodología dada en la Ref. 5, y los cuatro segundos, si se utiliza la desarrollada en nuestro grupo.

En la Fig. 2.22 se observa que para $\Phi < \pi/2 - \rho$ vale

$$\operatorname{tg}(\Phi) = Y_0 / X_0 = (\cos(\Theta + \rho) - \cos(\Theta_a / 2)) / (\sin(\Theta + \rho) + \sin(\Theta_a / 2)), \quad (2.55)$$

ya que:

$$X_0 = R (\sin(\Theta_a / 2) + \sin(\Theta + \rho)) \quad \text{e} \quad Y_0 = R (\cos(\Theta + \rho) - \cos(\Theta_a / 2)).$$

Utilizando en (2.55) la relación

$$\operatorname{tg}\{(a \pm b) / 2\} = \{\cos(b) - \cos(a)\} / \{\sin(a) \mp \sin(b)\}$$

se obtiene

$$\operatorname{tg}(\Phi) = \operatorname{tg}\{(\Theta_a / 2 - \Theta - \rho) / 2\}$$

y

$$\Phi = (\Theta_a / 2 - \Theta - \rho) / 2. \quad (2.56)$$

De esta expresión pueden obtenerse Φ_1 y Φ_1^* si se considera $\Theta = 0$ y $\Theta = -\Theta_{M2} = -\Theta_a / 2 - \rho$, respectivamente:

$$\Phi_1 = \Theta_{M1} / 2 \quad \text{y} \quad \Phi_1^* = \Theta_a / 2. \quad (2.57)$$

Repitiendo el procedimiento para $\Phi > \pi/2 - \rho$ se llega a

$$\Phi = \pi - (\Theta_a / 2 + \Theta + \rho) / 2. \quad (2.58)$$

Si en (2.58) tomamos $\Theta = 0$ y $\Theta = \Theta_{M1}$, se obtiene respectivamente

$$\Phi_2 = \pi - \Theta_{M2} / 2 \quad \text{y} \quad \Phi_2^* = \pi - \Theta_a / 2. \quad (2.59)$$

Por lo tanto, de acuerdo con lo ya dicho en la Secc. 2.5, si $\Phi_1 \leq \Phi \leq \Phi_2$ resulta $\Theta_i = 0$, mientras que, si $\Phi < \Phi_1$ o $\Phi_2 < \Phi$, Θ_i se obtiene despejando Θ de (2.56) o (2.58), respectivamente:

$$\Theta_i = \Theta_a / 2 - \rho - 2\Phi, \quad \Phi < \Phi_1 \quad (2.60)$$

$$\Theta_i = \pi - \Theta_a / 2 - \rho - 2\Phi, \quad \Phi_2 < \Phi. \quad (2.61)$$

Estas últimas expresiones también se utilizan para el cálculo de Θ_i^* , (2.60) para $\Phi < \Phi_1^*$ y (2.61) para $\Phi_2^* < \Phi$; en cambio para $\Phi_1^* \leq \Phi < \pi/2 - \rho$ ($\pi/2 - \rho < \Phi \leq \Phi_2^*$) es $\Theta_i^* = \Theta_{-n_{M2}+1}$ ($\Theta_i^* = \Theta_{n_{M1}-1}$).

Recordemos que para $\Phi < \pi/2 - \rho$, $\theta_s = \theta_s^* = \theta_{M1}$ y para $\Phi > \pi/2 - \rho$, $\theta_s = \theta_s^* = -\theta_{M2}$.

2.C. EFICIENCIA DE CONVERSION TERMICA EN EL RECEPTOR

Hacemos aquí un análisis de la eficiencia de conversión de la energía solar en térmica en el receptor. Esta eficiencia, η_t , es principalmente función del factor de concentración C , de la temperatura T en el receptor y de las propiedades ópticas del receptor; estas últimas son la absorbancia α (cociente entre la energía total absorbida y la energía incidente) y la emitancia térmica ϵ (cociente entre la radiación total emitida por la superficie y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura).

Consideramos al receptor como un caño de longitud L y sección rectangular de ancho A_r y altura b ; además, suponemos que la cara inferior, sobre la que incide la radiación, tiene absorbancia α y emitancia térmica ϵ . La temperatura del fluido que circula dentro de un receptor-convertidor solar de este tipo, y por lo tanto las pérdidas por radiación, varían a lo largo del mismo.

Hemos calculado una eficiencia para el sistema en estado estacionario introduciendo las siguientes hipótesis:

- a) las pérdidas por conducción y convección son despreciables,
 - b) los efectos de la conducción térmica a lo largo del receptor son despreciables,
 - c) la temperatura en el receptor es sólo función de una coordenada longitudinal, o sea que es constante en toda sección transversal del receptor,
 - d) las pérdidas por radiación se producen por la cara inferior del receptor.
- Con estas hipótesis, haciendo un balance de energía para un diferencial de superficie dS que suponemos a una temperatura T , se obtiene

$$U dS = \{ \alpha I_r - \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \} dS, \quad (2.62)$$

donde U es la cantidad de energía, por unidad de área y de tiempo, disponible para calentar el fluido y T_a^+ es la temperatura equivalente de la atmósfera. El incremento de temperatura dT de un diferencial de volumen del

+ Es necesario definir una temperatura de cuerpo negro equivalente debido a que la atmósfera no se encuentra a temperatura uniforme y que, además, irradia sólo en algunas bandas del espectro. De la Ref. 8, $T_a = T_{eq} = 0,0552 (T_{aire})^{1,5}$.

fluido ($b \, dS = b \, A_r \, dL$) en un diferencial de tiempo dt , está dado por:

$$U \, A_r \, dL \, dt = C_e \, \delta \, b \, A_r \, dL \, dT, \quad (2.63)$$

donde C_e es el calor específico del fluido y δ su densidad. De (2.62) y (2.63), recordando que $l_r = l_s \, C$, se llega a

$$\frac{dt}{C_e \, \delta \, b} = \frac{dT}{\alpha \, l_s \, C - \epsilon \, \sigma (T^4 - T_a^4)}, \quad (2.64)$$

donde observamos que dt es inversamente proporcional a U . La ecuación (2.64) se puede escribir en la forma

$$\frac{\epsilon \, \sigma \, dt}{C_e \, \delta \, b} = \frac{dT}{\left(\frac{\alpha \, l_s \, C}{\epsilon \, \sigma} + T_a^4\right) - T^4}.$$

Definiendo

$$T_M = \left(\frac{\alpha \, l_s \, C}{\epsilon \, \sigma} + T_a^4\right)^{1/4} \quad (2.65)$$

se obtiene

$$\frac{\epsilon \, \sigma \, dt}{C_e \, \delta \, b} = \frac{dT}{T_M^4 - T^4}. \quad (2.66)$$

Integrando esta ecuación se obtiene el tiempo que debe tardar un diferencial de volumen del fluido en recorrer el receptor para que su temperatura varíe de T_e hasta T_s (temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del receptor respectivamente). Si en primera aproximación despreciamos la variación de α , ϵ , C_e y δ con T y, además, suponemos por simplicidad que l_r es constante durante el intervalo de integración, la ecuación (2.66) resulta fácilmente integrable en forma analítica:

$$\frac{\epsilon \, \sigma}{C_e \, \delta \, b} \int_0^{\Delta t} dt = \int_{T_e}^{T_s} \frac{dT}{T_M^4 - T^4}, \quad (2.67)$$

que lleva a

$$\begin{aligned} \Delta t = \frac{C_e \, \delta \, b}{2 \, T_M^3 \, \epsilon \, \sigma} & \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_M + T_s}{T_M - T_s} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{T_s}{T_M} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_M + T_e}{T_M - T_e} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{T_e}{T_M} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.68)$$

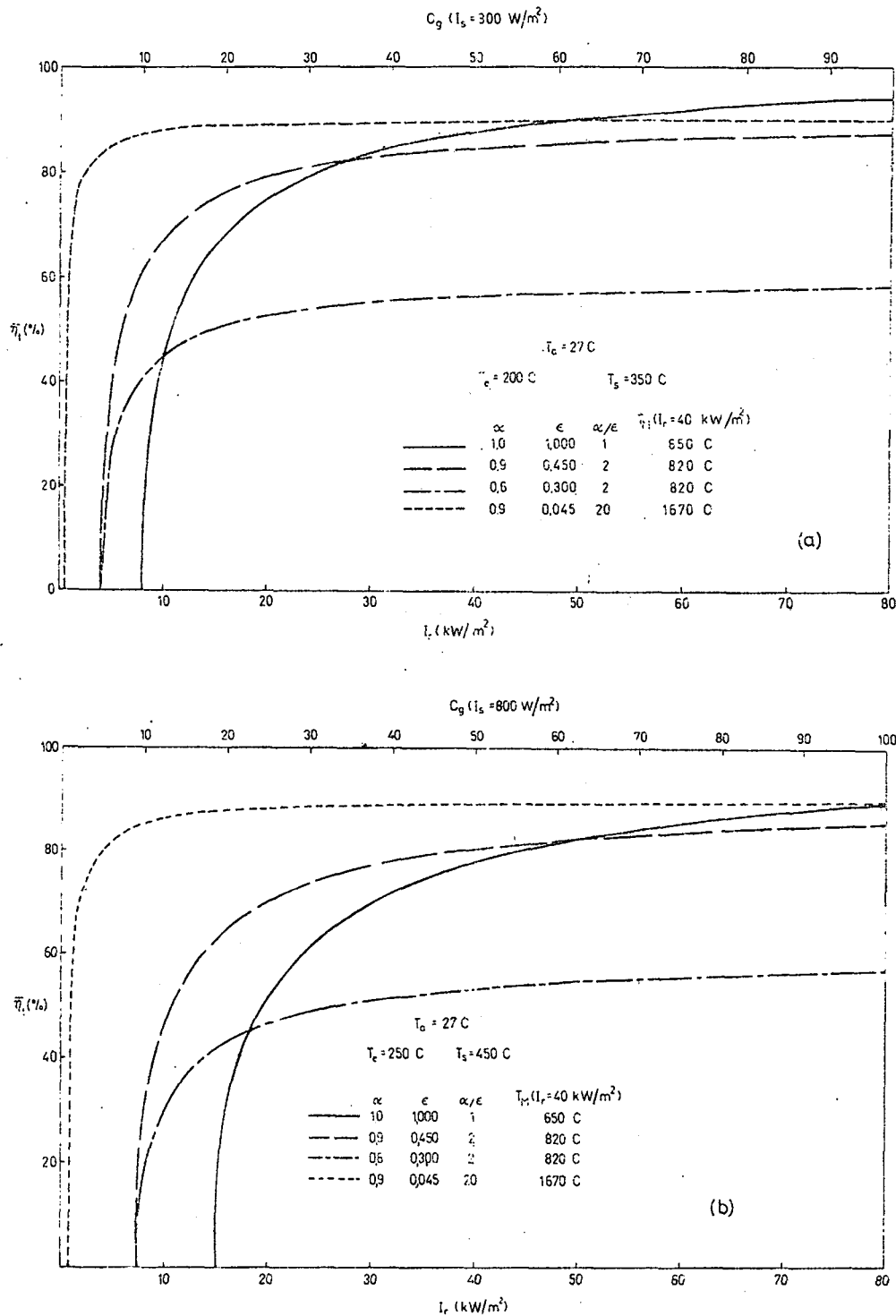


Fig. 2.23: Eficiencia media $\bar{\eta}_t$ en función de la intensidad incidente en el receptor para cuatro superficies con distintos valores de α y de ϵ . T_e y T_s son, respectivamente, las temperaturas del fluido a la entrada y salida del receptor. Se indican, además, las máximas temperaturas T_M alcanzables con dichas superficies para $I_r = 40 \text{ kW/m}^2$.

En la abscisa superior se indican los factores de concentración geométricos correspondientes a las I_r de la abscisa inferior, suponiendo $I_s = 800 \text{ W/m}^2$; este último valor constituye un promedio anual ilustrativo, razonable para Buenos Aires si se consideran solamente las 6 horas centradas alrededor del medio día solar.

Se observa que T_M es la máxima temperatura alcanzable y que corresponde al fluido en reposo ($\Delta t = \infty$). El valor de T_M también puede obtenerse igualando la energía incidente en la unidad de superficie a la emitida por la misma.

Por otra parte, el tiempo para elevar la temperatura de un diferencial de fluido en dT , si se aprovechara totalmente la energía incidente sobre el diferencial de superficie dS correspondiente, está dado por

$$dt_0 = dT \delta C_e b / I_r . \quad (2.69)$$

Por lo tanto, el tiempo necesario para elevar la temperatura del fluido desde T_e hasta T_s , en las mismas condiciones, es

$$\Delta t_0 = (T_s - T_e) \delta C_e b / I_r . \quad (2.70)$$

Si definimos $\bar{U}$ como el valor medio de U a lo largo del receptor,

$$\bar{U} A_r L = Q \delta C_e (T_s - T_e),$$

donde Q es el caudal. Reemplazando Q en función de Δt se obtiene:

$$\bar{U} = \frac{b \delta C_e (T_s - T_e)}{\Delta t} . \quad (2.71)$$

La eficiencia del receptor está dada entonces por:

$$\eta_t = \frac{\bar{U}}{I_r} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t} , \quad (2.72)$$

que se calcula utilizando (2.68) y (2.70) y que resulta ser independiente de las propiedades físicas C_e y δ del fluido, dentro de las razonables hipótesis simplificadoras enunciadas para estas magnitudes.

De (2.65) se concluye que la máxima temperatura alcanzable T_M depende fundamentalmente de $I_s C$ y del cociente α/ϵ . En cambio, según (2.62), la eficiencia η_t depende separadamente de $I_s C$, α , ϵ y T ; la misma ecuación muestra también que al aumentar $I_s C$ (es decir, la concentración) la eficiencia tiende al límite α . La eficiencia media $\bar{\eta}_t$ depende de los mismos parámetros si bien, en vez de T , intervienen T_e y T_s .

En la Fig. 2.23 graficamos $\bar{\eta}_t$ en función de I_r para dos pares de valores de T_e y T_s [†]. De la misma concluimos que, cuando se trabaja a baja concentración ($I_s C \leq 15 \text{ kW/m}^2$), es conveniente utilizar superficies receptoras con valores elevados de α/ϵ y, simultáneamente, α (curva ----). En cambio, para concentraciones más altas ($I_s C \geq 50 \text{ kW/m}^2$) el valor de α/ϵ no es importante, siendo suficiente que las superficies a emplear posean α elevada (curvas ----, — — y ———).

[†] Los valores de T_e y T_s utilizados son los que se consideran apropiados para obtener una eficiencia razonable de conversión en turbogeneradores convencionales.

Para concentradores del tipo CFEF aquí discutido, se obtiene $15 \text{ kW/m}^2 \leq I_s C \leq 40 \text{ kW/m}^2$. Dentro de este intervalo, las superficies caracterizadas por α elevada y cociente α/ϵ bajo, incrementan sensiblemente su eficiencia de conversión al aumentar I_r (curvas — — y ———). Por lo tanto, todo esfuerzo para acercarse al límite superior del intervalo o para excederlo es altamente provechoso. Tanto más es esto así si se tiene en cuenta que la alternativa de desarrollar superficies con α/ϵ elevado y que sean operables a $\sim 450^\circ \text{C}$ constituye un proceso complejo, y que las superficies resultantes seguramente serán costosas.

CAPITULO 3

**SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CFEF Y OPTIMIZACION
DE PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA PROTOTIPOS**

3. SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CFEF Y OPTIMIZACION DE PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA PROTOTIPOS

En este capítulo, sobre la base de los análisis efectuados en el precedente, estudiamos el funcionamiento de un CFEF a lo largo del año en condiciones dadas de insolación, y seleccionamos valores apropiados para los parámetros característicos de prototipos del sistema en desarrollo en la CNEA.

La optimización se refiere exclusivamente al concentrador en sí, sin considerar el comportamiento del receptor-convertidor ni comportamientos de los subsistemas de extracción de energía térmica y de turbogeneración convencional, todos los cuales dependen de la temperatura del fluido calentado en el CFEF y, por lo tanto, del factor de concentración lograble en éste. Si bien para el diseño global de un sistema de generación de electricidad basado sobre el empleo de uno o más CFEF esos comportamientos deben ser simulados, ello escapa al alcance del presente trabajo..

3.1. PROGRAMA DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCENTRADOR

De acuerdo con lo recién señalado, la simulación efectuada se restringe a la parte óptica del concentrador y, en esta etapa, no tiene en cuenta, por ejemplo, las pérdidas por radiación en el receptor. En este contexto, corresponde profundizar el análisis expuesto en el Apéndice 2.C para proveer una base que, junto con lo expuesto en este capítulo, permita efectuar una simulación del sistema concentrador-receptor que incluya la transformación de la energía solar en térmica.

A fin de poder simular el comportamiento del CFEF es necesario conocer la intensidad de radiación solar directa para las distintas horas del día a lo largo del año. Para calcularla, utilizamos un método propuesto por Dogniaux ⁷⁾, válido en condiciones de cielo despejado y que, para su empleo, requiere 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. Aplicamos este método volcándolo en un programa que denominamos ENETEM. Los valores obtenidos para Buenos Aires (utilizando valores medios mensuales del contenido de agua precipitable en la atmósfera) fueron comparados con los experimentales publicados en la Ref. 9, no observándose diferencias superiores al 15%, lo que se consideró satisfactorio para nuestros fines.

A partir de este programa y de los mencionados en el Capítulo 2, hemos confeccionado el programa de simulación denominado SIMUCFEF, que tiene como subrutinas a los programas FITE, PERTOT y ENETEM y que contiene las siguientes hipótesis simplificadoras:

- a) se considera que los espejos son de primera superficie y que no producen dispersión;
- b) se supone que la condición de cielo despejado se cumple los 365 días del año[†];
- c) se considera que el ancho del receptor es, como ya se dijo en la Secc. 2.7, el mínimo posible compatible con la condición de que no se introduzcan pérdidas adicionales a p_{gt} .

De este programa puede obtenerse la potencia por unidad de área que incide en el receptor (I_r) en función del tiempo y, mediante su integración numérica, determinar la energía por unidad de longitud que incide en el receptor anualmente, E_r^A , o en otros períodos de interés.

A partir del programa SIMUCFEF buscaremos optimizar los parámetros del CFEF, teniendo en cuenta nuestros requerimientos específicos, para luego utilizar los valores resultantes en el diseño de un prototipo. En este sentido recuérdese lo dicho (Secc. 2.7 y Ap. 2.C) en cuanto a la necesidad de obtener los más altos factores de concentración posibles. Como primer paso introducimos tres parámetros de importancia: a) la eficiencia del concentrador η_c , que definimos como el cociente entre la energía incidente sobre el receptor y la energía solar incidente sobre el plano de abertura del concentrador; b) el coeficiente v , definido como el cociente entre la diferencia de las eficiencias anuales de un CFEF con $L = \infty$ y otro con L cualquiera, y la primera de dichas eficiencias: $v = \{\eta_c^A(\infty) - \eta_c^A(L)\} / \eta_c^A(\infty)$; c) el cociente γ entre la energía que incide sobre el receptor en el período 21/5-20/7 y la que incide en el período 21/11-20/1 (salvo requerimientos de demanda muy especiales es conveniente tomar $\gamma \sim 1$).

[†] En la práctica esto significa que los resultados calculados sólo valen para días en que efectivamente se cumpla dicha condición. A pesar de ello, los promedios o las integrales sobre períodos más o menos extendidos constituyen buenas aproximaciones para la simulación del funcionamiento de centrales solares, ya que éstas deberán ser emplazadas en zonas de elevada insolación media.

3.2. OPTIMIZACION DE PARAMETROS

Según lo señalado en la Secc. 2.7, disminuir W/R implica aumentar C_g , resultando la variación más pronunciada a medida que disminuye W/R , razón por la cual conviene elegir el menor W/R compatible con los aspectos constructivos y económicos. En nuestro caso, para la construcción de los prototipos elegimos $W/R = 0,02$ (ver Cap. 4), elección que no afecta en absoluto los valores resultantes de la selección de los demás parámetros.

El segundo "parámetro" característico que fijamos fuera del programa SIMUCFEF es el criterio para la ubicación de los espejos, eligiendo el II, ya que, como discutimos en las Seccs. 2.5 y 2.7, dicho criterio produce menores pérdidas y un mayor factor de concentración. Sin embargo, esta elección no debe considerarse como definitiva porque aún es necesario efectuar una evaluación económica que compare esas ventajas con el hecho de que el uso de dicho criterio lleva a emplear un mayor número de espejos. En relación a esta cuestión, acá nos restringiremos a comparar las energías anuales incidentes en el receptor para los dos criterios, lo cual haremos una vez seleccionados los valores de los demás parámetros, todos los cuales son independientes del criterio adoptado.

De acá en adelante, el análisis se basa sobre el programa de simulación, utilizando los datos correspondientes a la ciudad de Buenos Aires. Por lo tanto, las conclusiones que se obtienen son sólo válidas para dicha ciudad y siempre dentro de las hipótesis simplificadoras introducidas; obviamente, la correspondiente a "cielo despejado" sólo se satisface algunos días, no obstante lo cual se estimó conveniente aplicar el programa para Buenos Aires ya que es en esta ciudad donde montaremos nuestros primeros prototipos de laboratorio. Además, para los cálculos se considera un coeficiente de reflexión del 85 % (ver Apéndice 4.A). Finalmente, para los cálculos energéticos se toma el radio del concentrador $R = 1$ m, mientras que los de las demás magnitudes consideradas (como C_g, η_c, v, γ e l_r) dependen sólo de parámetros adimensionales del concentrador.

Para los primeros cálculos de simulación damos a β o a ξ (según cuál sea la orientación del CFEF) el valor de la latitud del lugar, ya que, como era de esperar, los valores óptimos son próximos a ese valor (ver pág. 53). Asimismo, tomamos $p = 0$, lo que (ver pág. 23) permite considerar el mayor θ_a compatible con el valor de W/R y el criterio de ubicación de espejos adoptado. Si se optara por un $p \neq 0$, se tendría una reducción de $2p$ en θ_a , con lo cual

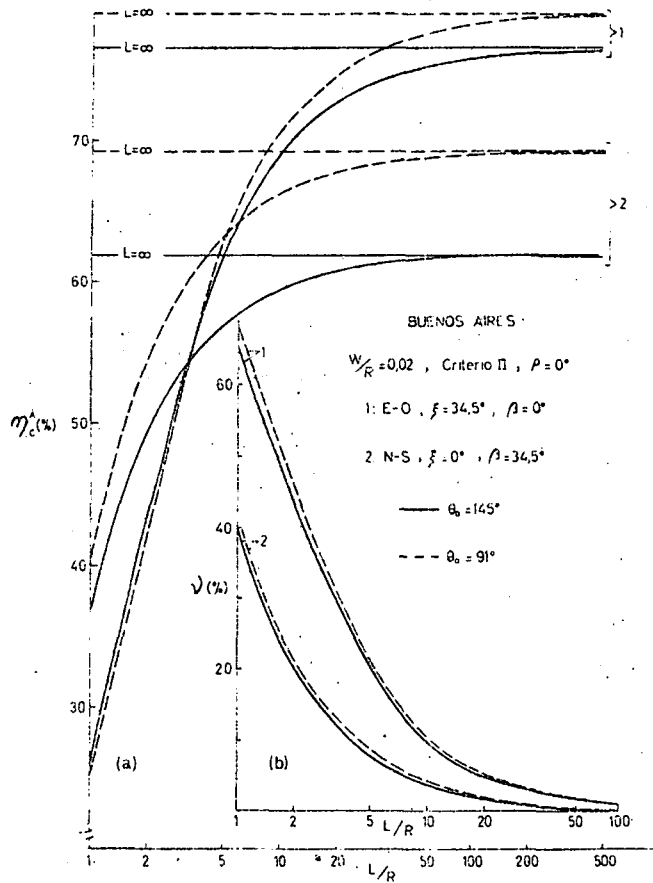


Fig. 3.1: Variación en función de L/R de a) la eficiencia anual η_c^A ; b) la pérdida relativa v . Las líneas horizontales indican las eficiencias límites, es decir, correspondientes a $L = \infty$.

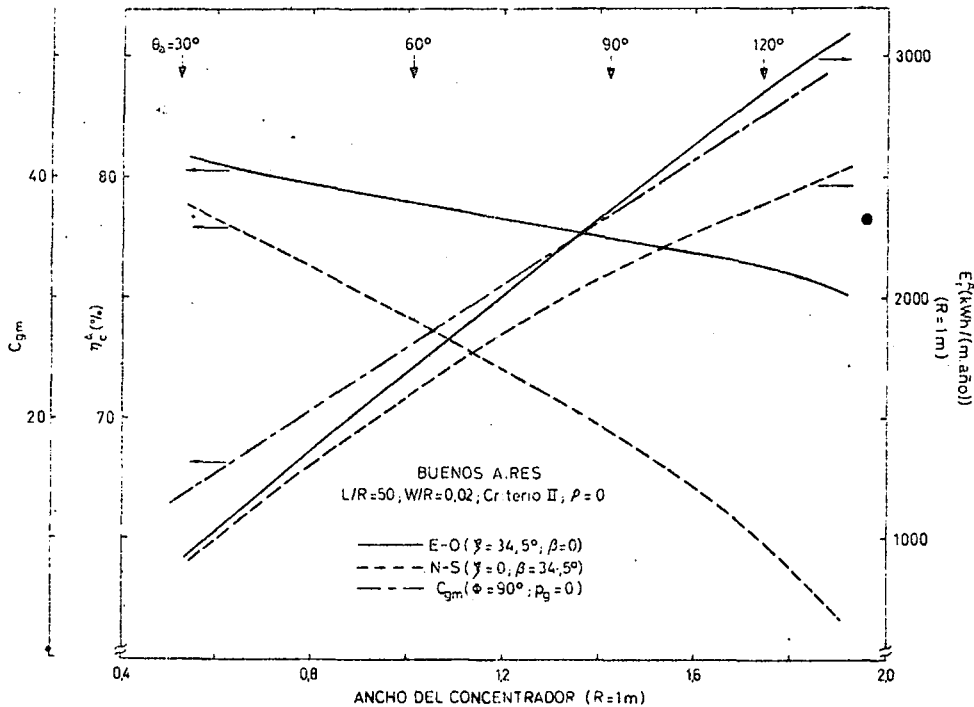


Fig. 3.2: Factor de concentración geométrica máximo C_{gm} ($\phi=90^\circ$ y $p_g=0$), eficiencia anual η_c^A y energía anual incidente en el receptor E_r^A , en función del ancho de un CFEF (los valores de E_r^A corresponden a $R=1$ m; en cambio, C_{gm} y η_c^A no dependen de R).

(ver Fig. 2.17) se reduciría C_g .[†]

En la Fig. 3.1 hemos graficado la variación de la eficiencia anual η_C^A y del coeficiente v para dos valores de θ_a y para las orientaciones E-0 y N-S; de ella se concluye que: a) para $L/R \geq 5$, si $\theta_a \sim 90^\circ$ y para $L/R \geq 3$, si $\theta_a = 145^\circ$, ya resulta más conveniente la orientación E-0 que la N-S; b) las eficiencias límite ($L = \infty$) son bastante más altas para la orientación E-0 que para la N-S, como ya observamos en la Secc. 2.5; c) η_C^A aumenta al disminuir θ_a , siendo más notable el aumento en la orientación N-S; y d) el parámetro v depende de la orientación y es prácticamente independiente de θ_a (como era lógico esperar, $v(N-S)$ es sensiblemente menor que $v(E-0)$). Si imponemos la condición de no perder más del 2 % de la η_C^A que se lograría con $L = \infty$, debe ser $v \leq 2\%$ y de la figura se concluye entonces que el L/R mínimo, es 50 para la orientación E-0, y 20 para la N-S. Por tal motivo, para los análisis siguientes, tomamos $L/R = 50$.

En la Fig. 3.2 mostramos las variaciones de la eficiencia anual η_C^A , la energía anual incidente en el receptor por unidad de longitud del mismo E_r^A y el factor de concentración geométrico máximo C_{gm} , en función del ancho A_c del concentrador (o, lo que es equivalente, del ángulo de abertura θ_a). Se confirma que: a) para toda θ_a la orientación E-0 es la más conveniente para un CFEF con $L/R = 50$ y b) el ángulo de abertura conveniente es el mayor compatible con el criterio de ubicación de espejos y el valor de W/R adoptados ya que la eficiencia disminuye poco, de 81 % a 75 % para θ_a entre 30° y 145° , mientras que C_{gm} aumenta considerablemente, de 13 a 49 en el mismo intervalo. El hecho de elegir el mayor θ_a posible (145°) implica, como ya señalamos, usar $\rho = 0$.

En la Fig. 3.3 graficamos E_r^A , η_C^A y γ en función del ángulo ξ para un concentrador con $\theta_a = 145^\circ$, y orientación E-0. Se concluye que el ξ más conveniente desde el punto de vista energético es de $\sim 30^\circ$, puesto que a ese valor corresponden las mayores E_r^A (3110 kWh/(m-año)) y η_C^A (75,4 %); en cambio el valor de γ resulta bastante pequeño (0,55). Parece razonable elegir entonces $\xi = 40^\circ$, ya que, mientras las correspondientes E_r^A y η_C^A disminuyen poco ($E_r^A = 3020$ kWh/(m-año) y $\eta_C^A = 74,3\%$), γ aumenta notablemente (0,88).

Resumiendo, los parámetros seleccionados son:

[†] Recuerdes, que ρ debe satisfacer la condición $\rho = (\theta_{M2} - \theta_{M1})/2$, por lo cual sólo puede tomar valores discretos.

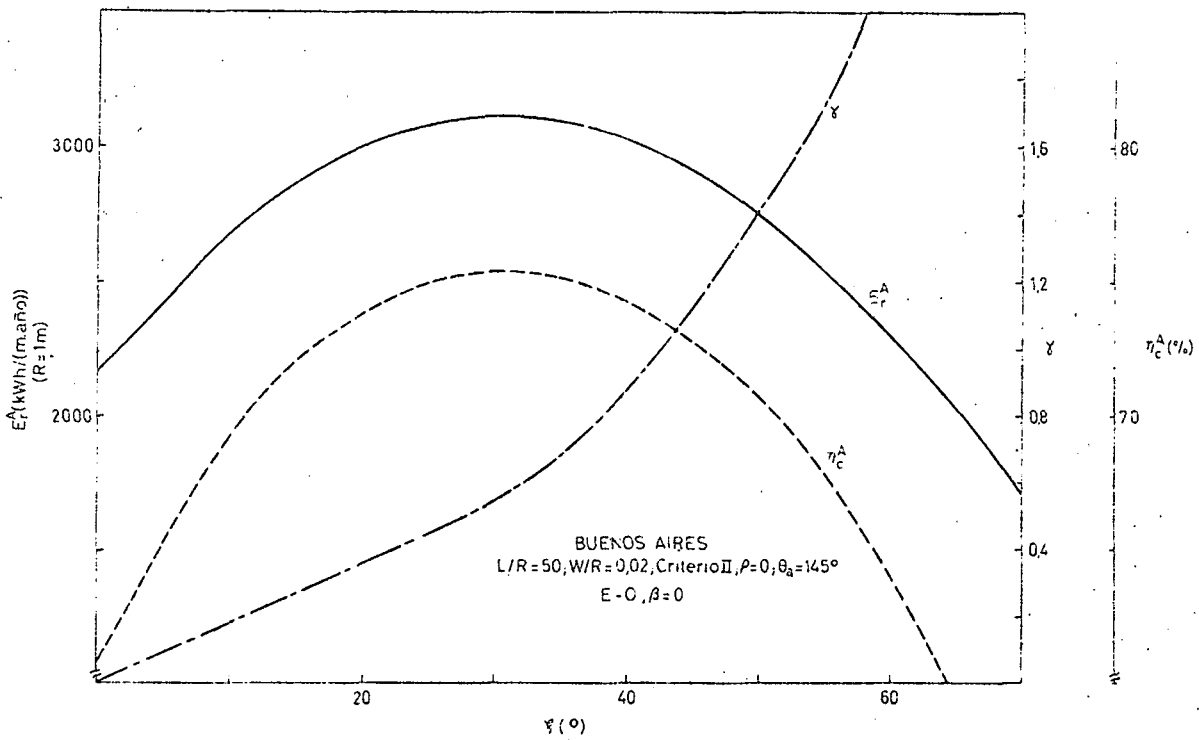


Fig. 3.3: Energía anual incidente en el receptor E_r^A ($R=1m$), eficiencia anual y relación γ entre las energías que inciden en los períodos 21/5-20/7 y 21/11-20/1, en función del ángulo ξ , para un concentrador con orientación E-0.

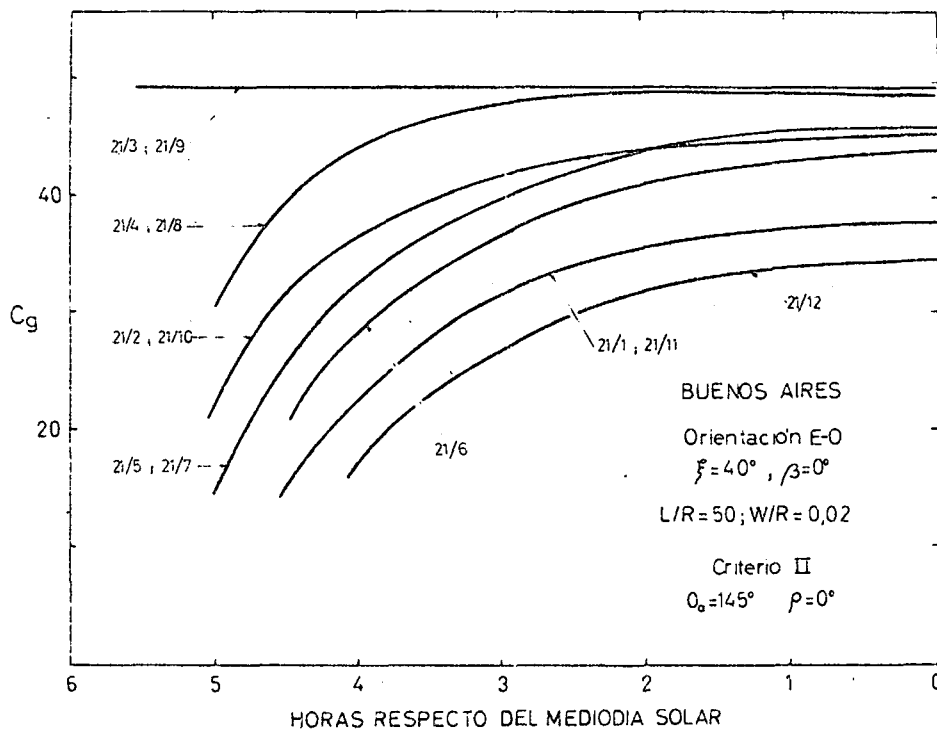


Fig. 3.4: Variación horaria del factor de concentración geométrico C_g para distintas épocas del año y para el CFEF elegido.

$$W/R = 0,02^\dagger$$

$$L/R = 50$$

$$\theta_a = 145^\circ (\rho=0)$$

criterio II

orientación E-0

$$\xi \approx 40^\circ$$

3.3. SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO CFEF OPTIMIZADO

En la Fig. 3.4 mostramos la variación de C_g para distintas épocas del año. Se observa que, en comparación a lo graficado en la Fig. 2.18 y debido a que el valor de ξ es mayor que la latitud, se han mejorado los valores de C_g para los meses alrededor del solsticio de invierno (mayo, junio, julio), a expensas de reducirlos para los meses alrededor del de verano (noviembre, diciembre, enero). Nótese que, para los mediodías, el máximo valor de C_g se obtiene en los equinoccios (49,6), consiguiéndose el 21/6 un $C_g = 43,9$ y el 21/12 un $C_g = 34,8$. Con esto se logra que la intensidad en el receptor, I_r , resulte aproximadamente la misma para los meses cercanos a dichos solsticios, lo que se puede comprobar en la Fig. 3.5, en la cual mostramos la variación diaria de I_r para distintas épocas del año; para los mediodías, el valor máximo de I_r se logra en los equinoccios ($\sim 41 \text{ kW/m}^2$), obteniéndose para el 21/6 y el 21/12 un valor de $\sim 29 \text{ kW/m}^2$.

En la Fig. 3.6 graficamos las variaciones de la energía diaria incidente en el receptor E_r^D y de la eficiencia diaria η_c^D . Observemos que el máximo de E_r^D se tiene el 21/9 (10,4 kWh/(m-día)) y el mínimo el 21/6 (6,2 kWh/(m-día)); en cambio, el máximo de η_c^D se obtiene en los equinoccios (82,8 %) y el mínimo el 21/12 (57,5 %), lográndose el 21/6 una eficiencia bastante mayor (74,1 %).

Por último, acotamos que, si se utilizara el criterio I ($\theta_a = 143,6^\circ$), la energía anual incidente en el receptor E_r^A se reduciría en 88 kWh por metro de longitud del sistema y la eficiencia anual disminuiría en un 1,9 %, pero el CFEF tendría 12 espejos menos.

$\dagger$ Valor elegido por razones constructivas.

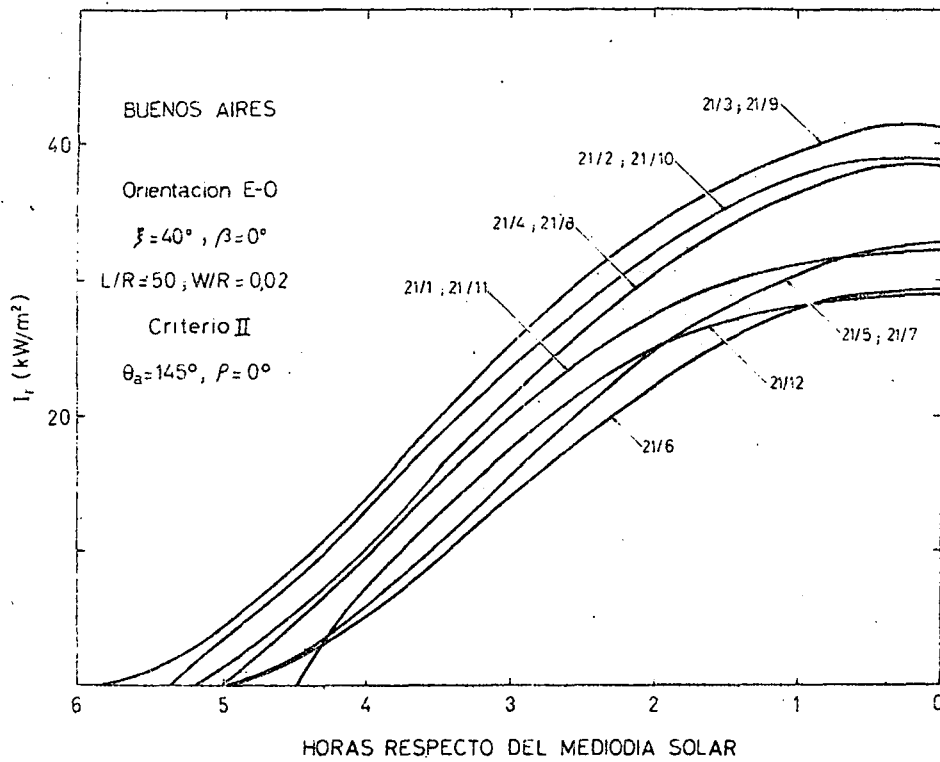


Fig. 3.5: Variación horaria de la intensidad incidente en el receptor, I_r , para distintas épocas del año y para el CFEF optimizado. (Para las curvas para las que se indican dos épocas del año, las I_r incidentes en ambas épocas no difieren en más de un 1 %, por lo que, para los fines prácticos y debido a la precisión de cálculo, se pueden considerar iguales).

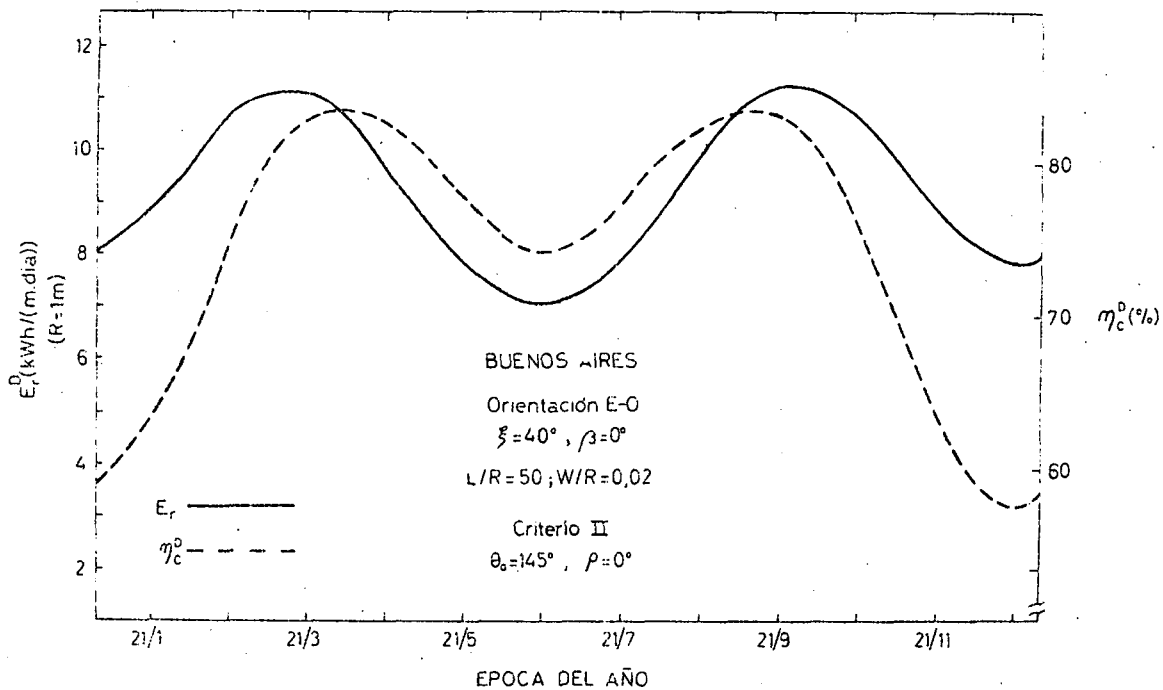


Fig. 3.6: Variación de la energía diaria incidente en el receptor E_r^D y de la eficiencia diaria η_c^D , en función de la época del año.

CAPITULO 4

DISEÑO Y MONTAJE DE PROTOTIPOS

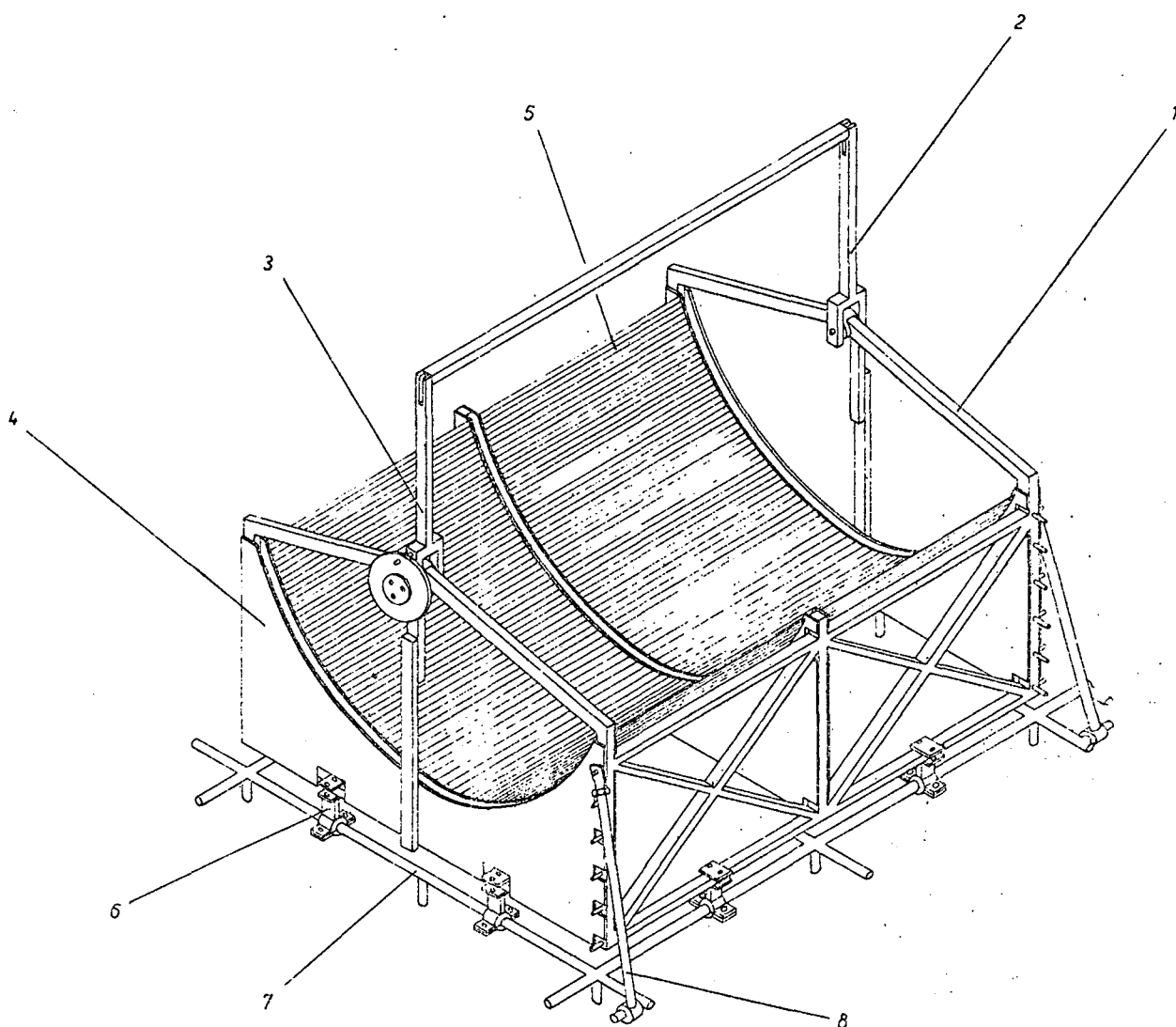


Fig. 4.1: Esquema del prototipo de CFEF en montaje en la CNEA: (1) soporte que fija el eje de giro del receptor; (2) y (3) brazos de giro del receptor; (4) soportes laterales de los espejos; (5) espejos; (6) sistema de giro que permite variar la inclinación del concentrador; (8) sistema telescópico. La longitud de cada concentrador es de 2,4 m, el radio es de 1 m y el ancho de cada espejo de 2 cm. El ángulo de abertura es variable hasta 145° (109 espejos).

4. DISEÑO Y MONTAJE DE PROTOTIPOS.

A partir de los resultados del análisis efectuado en los capítulos precedentes, encaramos el diseño y la construcción de dos prototipos similares de CFEF, destinados a verificar experimentalmente las propiedades del concentrador fijo a espejo facetado estudiadas teóricamente. En particular, a fin de efectuar un diseño ulterior lo más económico posible, interesa verificar las tolerancias máximas aceptables en la construcción de sus partes, compatibles con pérdidas de eficiencia admisibles.

Para analizar la posibilidad de utilizar espejos contruidos con vidrio nacional fabricado por estiramiento (sistema Pittsburgh), el que presenta el inconveniente de poseer ondulaciones y caras no paralelas, se decidió armar uno de los prototipos con dichos espejos (de 2,2 mm de espesor, que es el más delgado que se produce) y comparar sus propiedades con las del otro prototipo, armado con espejos contruidos con vidrio importado de ~ 1 mm fabricado por flotamiento. Ambos tipos de vidrio son espejados en segunda superficie mediante el mismo proceso. En el Apéndice 4.A consignamos las razones que llevaron a adoptar espejos de segunda superficie y los resultados de la evaluación de su calidad.

La utilización de espejos de segunda superficie produce una disminución del ancho útil de los espejos en relación con el correspondiente a espejos de primera superficie. Esto se debe al aumento de las pérdidas por sombra y apantallamiento, así como también a la aparición de pérdidas por efectos de borde. Por lo tanto, para evitar un aumento considerable de las pérdidas de radiación, impusimos la condición de que la relación entre el espesor y el ancho de los elementos especulares no supere ~ 0,1, con lo cual es válida, en primera aproximación, la hipótesis del programa SIMUCFEF que considera que los espejos son de primera superficie. De acuerdo con el límite mencionado, se tomó $W=2$ cm para todos los elementos de espejo. Además, se adoptó $R=1$ m para que W/R fuese lo suficientemente chico como para obtener factores de concentración razonables sin caer en prototipos excesivamente voluminosos.

Cada prototipo está caracterizado por $L/R=2,4$, ya que está formado por dos secciones de 1,18 m de largo (medida que resulta de las dimensiones de las planchas de vidrios). Está previsto el acople de ambos prototipos, con lo que se logrará un CFEF de $L/R=4,8$. El armazón de cada módulo (Fig. 4.1) está provisto de soportes telescópicos mediante los cuales se pueden variar los ángulos ξ (orientación E-O) y β (orientación N-S) entre

Tabla 4.1

Comportamiento teórico[†] de un CFEF

Ubicación: Buenos Aires

$W/R = 0,02$

$R = 1 \text{ m}$

Criterio II

$\theta_a = 145^\circ (\rho = 0)$

$\xi = 40^\circ$ y $\beta = 0$ (orientación E-0) o $\xi = 0$ y $\beta = 40^\circ$ (orientación N-S)

L/R		2,4		4,8	
Orientación		E - 0	N - S	E - 0	N - S
η_c^A (%)		48	50	61	56
E_r^A (MWh/m-año)		1,9	2,0	2,5	2,3
η_c^D (%)	MIN	42	35	50	46
	MAX	54	60	67	62
E_r^D (kWh/m día)	MIN	4,4	4,3	5,3	5,0
	MAX	6,0	7,4	8,0	7,6

† Se consideran las siguientes hipótesis simplificadoras:

- los espejos son de primera superficie y no producen dispersión,
- la condición de cielo despejado se cumple todo el año,
- el ancho del receptor es el mínimo compatible con la condición de que no se introduzcan pérdidas adicionales a p_{gt} .

Además, se considera un coeficiente de reflexión del 85 %.

0 y 60 grados. El intervalo de variación de β es suficiente para lograr que $p_{gt} \approx p_g$ en cualquier época del año (ver Secc. 2.6).

Los espejos se ubicaron según el criterio II, estando cada uno fijado sobre un soporte independiente que puede ser montado y retirado del armazón; por consiguiente, resulta simple variar θ_a hasta el máximo de 145° , abertura a la que corresponden 109 espejos. La posición angular de cada soporte respecto de la del espejo tangente se fija inicialmente en valores próximos a los resultantes del cálculo; hacerlo con suficiente precisión sin utilizar métodos ópticos es complicado debido a la existencia de pequeñas deformaciones en los soportes e imprecisiones en el fijado de los elementos especulares a éstos. El ajuste definitivo de los prototipos se efectuará mediante un equipo láser de baja potencia, para lo cual el diseño permite que los soportes se puedan girar individualmente mediante una palanca ad-hoc. El poder girar los soportes permite estudiar, asimismo, la precisión con que debe fijarse la posición angular de los elementos especulares en la construcción de los concentradores definitivos.

De lo precedente resulta que con los prototipos se pueden obtener los valores seleccionados previamente para los parámetros característicos del CFEF, salvo para L/R ; sin embargo, esto último no dificulta el cumplimiento de los objetivos fijados para esta primera etapa experimental. En la Tabla 4.1 listamos los valores que el programa SIMUCFEF predice para las magnitudes que caracterizan el funcionamiento de los prototipos (con las hipótesis simplificadoras inherentes a él; ver pág. 50). Como era de esperar, se observa que para $L/R=2,4$ es más conveniente la orientación N-S que la E-0 y que, para la primera, son mayores las variaciones a lo largo del año de la eficiencia diaria η_c^D y de la energía E_r^D incidente diariamente en el receptor. En cambio, para $L/R=4,8$, la orientación más conveniente es la E-0; en particular, respecto del caso anterior, la eficiencia sólo mejora 10% para la orientación N-S, mientras que lo hace en 30% para la E-0.

En la Fig. 4.2 se muestra el dispositivo para el ajuste y la fijación angulares, consistente, esencialmente, en una palanca de 20 cm de largo y una cuña metálica. En la Fig. 4.3 se muestra el estado de uno de los prototipos en etapa de montaje.

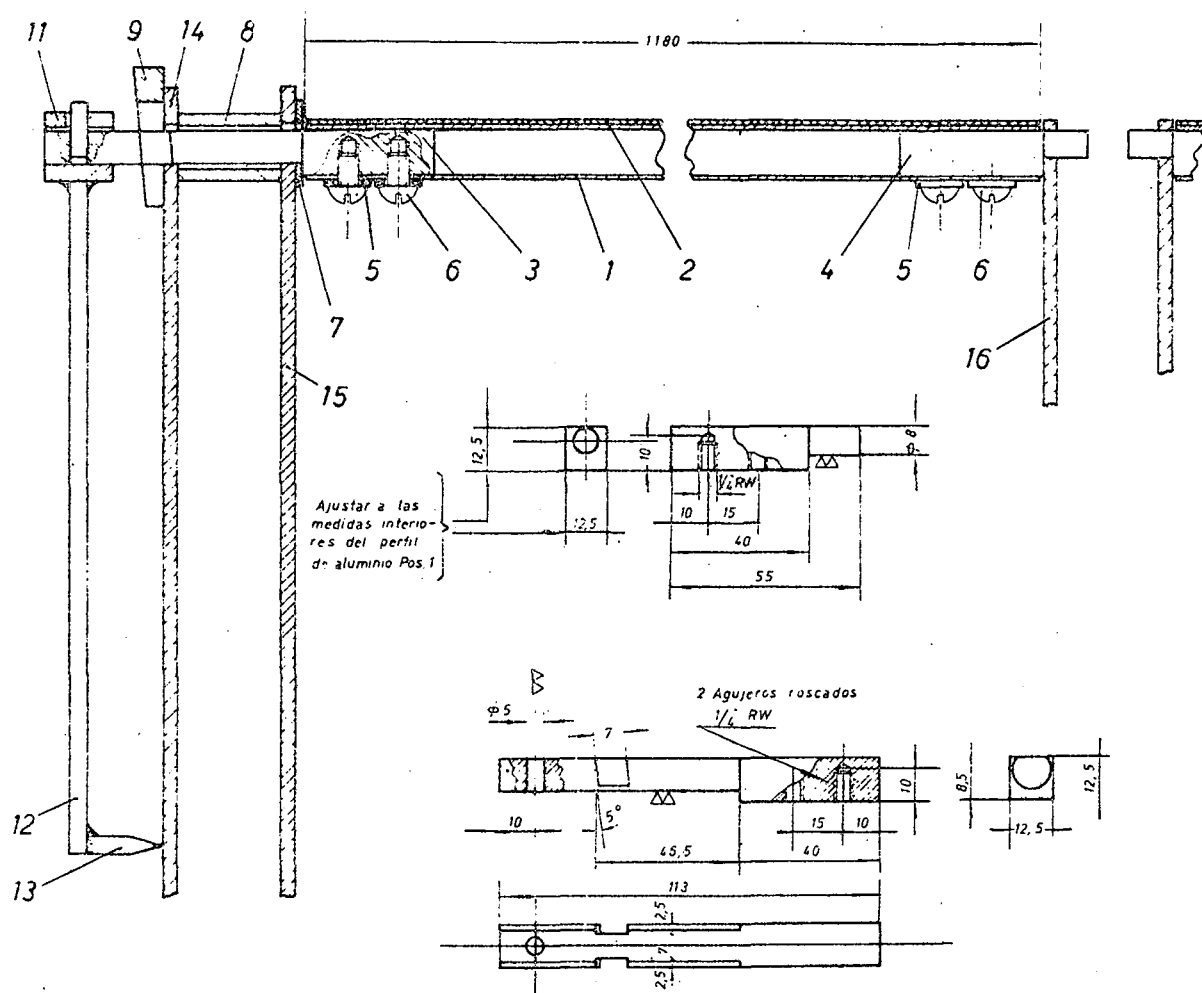


Fig. 4.2: Esquema del dispositivo de montaje y ajuste angular de los espejos.
 (1) Tubo cuadrado; (2) espejo; (3) eje frontal; (4) eje intermedio;
 (9) cuña de fijación; (12) palanca de ajuste; (14), (15) y (16) soportes laterales de los espejos.

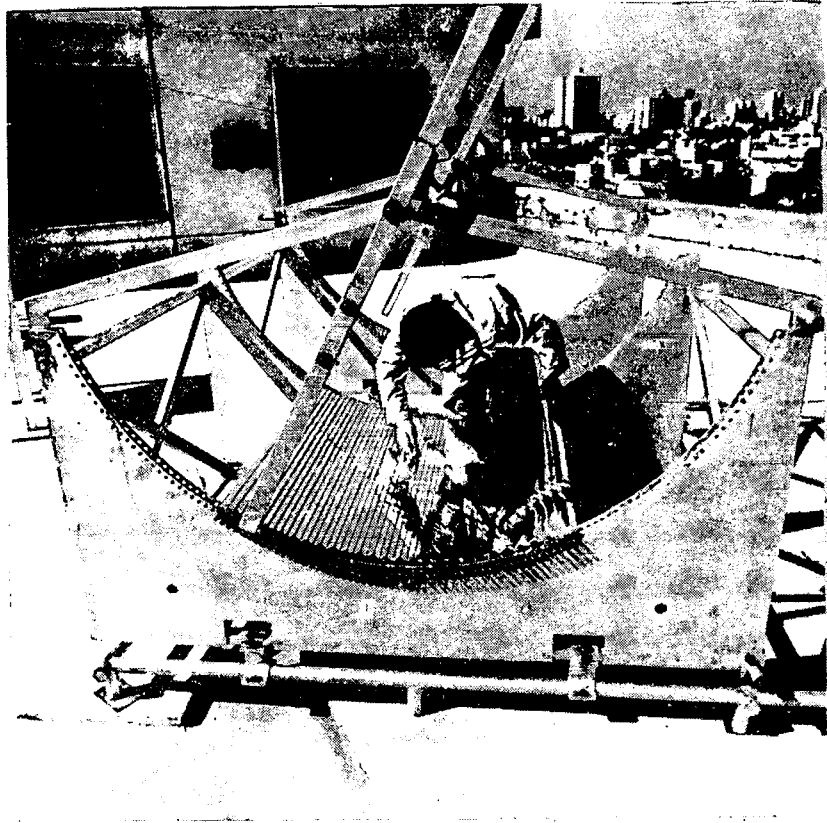
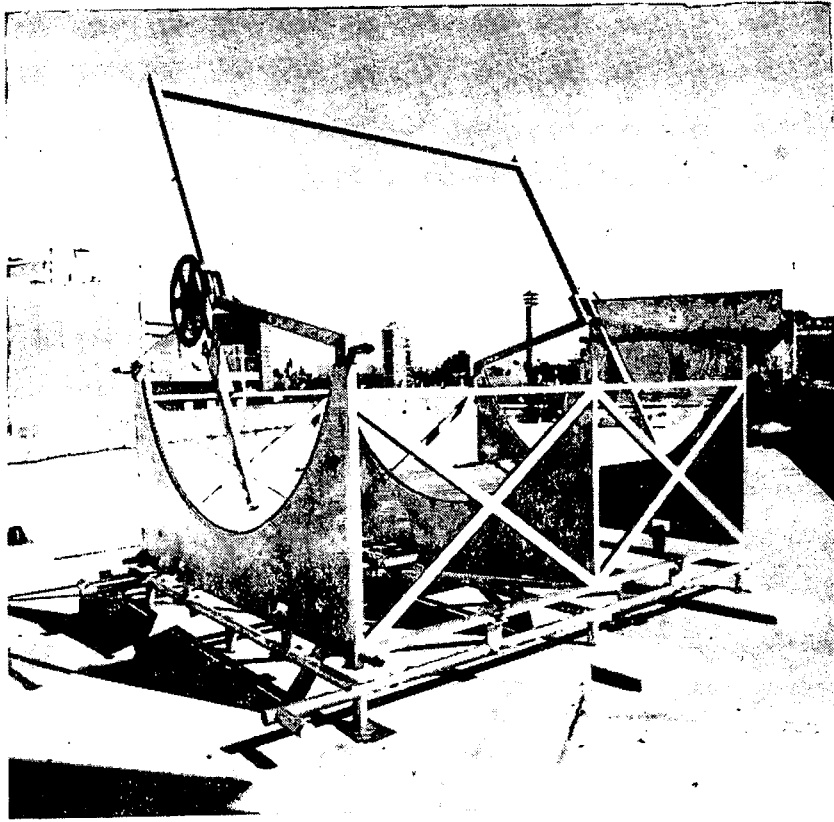


Fig. 4.3: Prototipo que se encuentra en etapa de montaje.

APENDICE

4.A. ESPEJOS: DISPONIBILIDAD EN PLAZA Y PROPIEDADES

La calidad óptica de las superficies especulares que se utilicen (en particular, el coeficiente de reflexión) y su durabilidad en condiciones de uso son factores importantes a tener en cuenta en la construcción de concentradores solares. Por supuesto, hay que evaluar la conveniencia de mejorar la calidad óptica de los espejos en relación con el aumento de costos que ello involucra. Como el CFEF presenta la ventaja de estar formado por espejos planos, se pueden usar los fabricados comercialmente, lo que representa un sustancial ahorro en los costos finales del sistema.

4.A.1. Disponibilidad en el mercado local

Con el fin de obtener información sobre la disponibilidad y las características de los espejos existentes en el mercado argentino, se tomó contacto con las principales industrias y comercios del ramo. Las informaciones más importantes obtenidas son:

a) No es posible contar con espejos de primera superficie que tengan coeficiente de reflexión alto y, además, duración razonable al ser usados a la intemperie. Por lo tanto, decidimos utilizar elementos especulares espejados en la segunda superficie de, por las razones dadas en la pág. 57, el menor espesor posible. La elección de espejos de éste tipo conduce al empleo de espejos de vidrio, ya que el espejado en segunda superficie de plásticos no ha dado, en general, buen resultado debido a la degradación de los mismos al ser usados a la intemperie y expuestos a la radiación solar.

b) El vidrio nacional es fabricado por estiramiento (sistema Pittsburgh) y presenta ondulaciones (el espesor puede variar en $\pm 0,3$ mm), lo que produce una dispersión bastante grande. Por otra parte, existe en plaza vidrio importado fabricado por flotamiento que no presenta las ondulaciones del vidrio nacional (ver 4.A.2).

c) En nuestro país sólo hay dos fábricas (Electroespejo EMSA y Petracca e Hijos) que producen espejos protegidos en su parte posterior con una pintura especial. Estas empresas son, además, las únicas automatizadas y, por lo tanto, por ahora sólo ellas podrían encarar una producción masiva. La elección del proveedor no ofreció alternativas debido a que, en el momento de la adquisición, una de las plantas mencionadas sufría problemas transitorios en su producción; en consecuencia, tanto el vidrio nacional como el importado, están espejados por la misma empresa.

4.A.2. Dirección de corte más conveniente

La experiencia para analizar la imagen producida por los distintos tipos de espejos consiste, esencialmente, en dirigir el haz de un láser de baja potencia en dirección del espejo considerado, de manera que la incidencia sea casi normal, y observar la imagen producida en una pantalla milimetrada colocada detrás del equipo láser.

En los espejos fabricados con vidrio importado sólo se observó un pequeño aumento de la imagen con respecto a la ideal. En cambio, en los espejos de vidrio nacional se observó que la imagen del haz circular del rayo láser está formada esencialmente por tres figuras de forma aproximadamente circular, lo cual se debe a que las caras del vidrio, como ya señalamos, no son exactamente paralelas. En todos los casos observados, las tres figuras se encuentran alineadas en dirección perpendicular a la de estiramiento del vidrio; debido a las ondulaciones que presentan las superficies, la distancia entre dichas figuras oscila según una coordenada paralela a dicha dirección. La máxima separación angular observada entre las figuras extremas fue de aproximadamente $30'$, lo que corresponde a un ángulo entre las tangentes a las caras del vidrio en dicho punto de $\sim 5'$.

En base a las experiencias citadas, y teniendo en cuenta que los espejos van a ser utilizados en un CFEF que tiene receptor lineal, se concluyó que la dirección de corte más conveniente es precisamente la perpendicular a la de estiramiento, de tal forma que las ondulaciones del vidrio queden en la dirección paralela al receptor con el fin de que la imagen se deforme en dicha dirección.

4.A.3. Coefficiente de reflexión

Hemos diseñado y construido un aparato para la medición de coeficientes de reflexión, destinado a determinar los valores iniciales de los coeficientes de reflexión de los espejos bajo análisis y sus variaciones en el transcurso del tiempo y en condiciones de uso en los CFEF. Para la construcción se utilizó un banco óptico con algunos de sus soportes, disponible en nuestro laboratorio.

En al Fig. 4.4 están esquematizadas las distintas partes del instrumento. Consta de un cabezal de iluminación (A), del sistema óptico principal (B) y de un cabezal detector (D), montado sobre el extremo de un brazo giratorio con eje vertical en C.

El sistema óptico principal B está formado por un objetivo acromático de distancia focal 20 cm y por dos diafragmas, uno rectangular, cuyos bordes verticales limitan el haz lateralmente, y otro en forma de cuña deslizable transversalmente; éste lleva una escala graduada entre 0 y 20, que indica

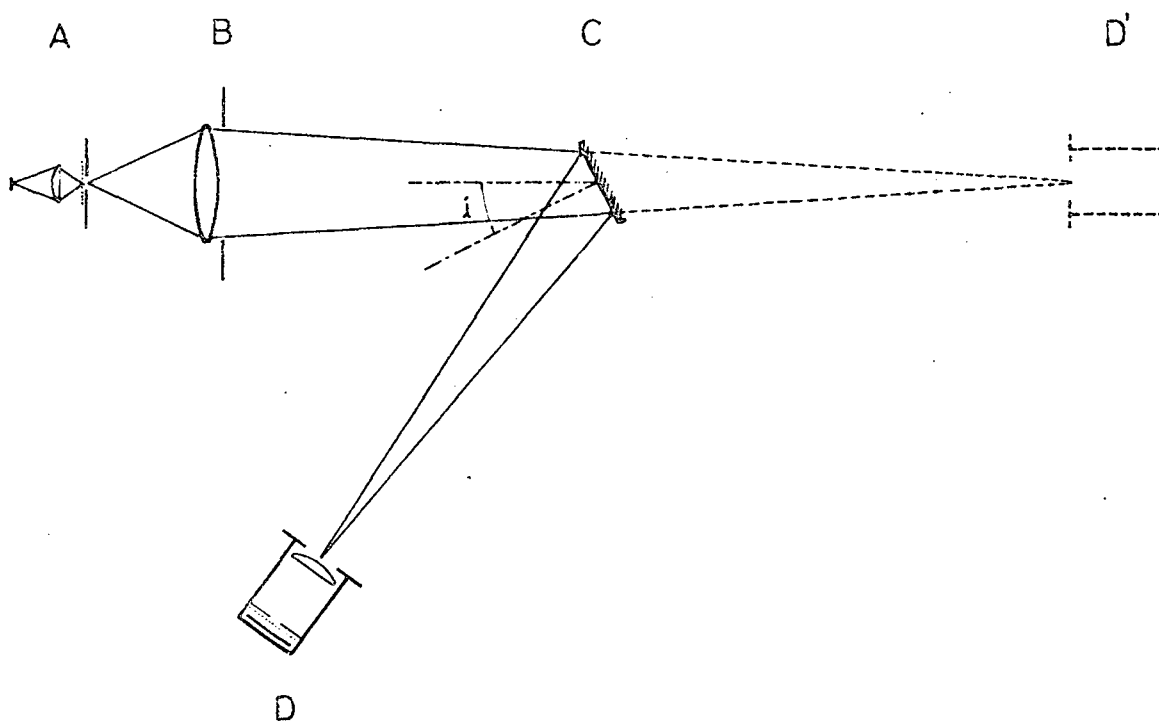


Fig. 4.4: Representación esquemática del aparato para la medición de coeficientes de reflexión. Consta de un cabezal de iluminación (A), del sistema óptico principal (B), de un brazo giratorio con su eje vertical en C y en cuyo extremo se encuentra el cabezal detector D.

directamente el porcentaje de disminución del área del haz emergente.

El cabezal de iluminación A está constituido por una fuente luminosa, una lente y un difusor sobre el cual apoya un diafragma. La lente forma imagen de la fuente sobre el difusor. El cono de luz emergente debe producir una iluminación constante y uniforme en los diafragmas de B.

El cabezal detector D consta de un diafragma de entrada, una lente, un segundo diafragma sobre el cual apoya un difusor, y un fotorresistor conectado a un multímetro como elemento sensible.

El espejo cuyas características se quieren determinar se coloca en C de modo que el eje de rotación del brazo giratorio se encuentre contenido en el plano de la superficie reflectante; el ajuste de la posición del espejo se logra con un tornillo ubicado en el soporte del mismo. Un disco graduado solidario con el mencionado eje de rotación permite determinar en cada caso el ángulo de reflexión.

El objetivo en B forma imagen del diafragma de A sobre el diafragma de entrada del cabezal detector D. La lente en D forma imagen del diafragma de B sobre el segundo diafragma del cabezal detector; el objeto de este segundo diafragma es evitar que llegue al elemento sensible luz que no haya pasado por el sistema óptico principal.

Para medir la reflectividad de un espejo se lo coloca en C con la orientación que se desee; se desplaza el diafragma en B a la posición cero de la escala, se mueve el brazo giratorio de modo de obtener la máxima intensidad en el detector, y se anota la lectura del multímetro. A continuación se retira el espejo, se gira el brazo de modo de obtener nuevamente intensidad máxima en el detector (posición D'), y se desliza el diafragma en cuña hasta repetir la lectura del multímetro. De la lectura de la escala graduada del diafragma en cuña se calcula la reflectividad. Para poder extender el rango de medición más allá del correspondiente a una disminución del 20 % en el haz, se construyeron tres diafragmas rectangulares de anchos decrecientes.[†]

Se dispone de lámparas de filamento, sodio, mercurio y cadmio. Cada vez que se cambia de lámpara hay que verificar la uniformidad de iluminación en B. En el futuro cercano se dispondrá de filtros pasabandas para medir la reflectividad en distintas zonas del espectro entre 0,40 y 0,65 μm .

Se estima en $\pm 1\%$ el error de medición debido a inestabilidades en las fuentes de alimentación de las lámparas mencionadas y en dificultades pa-

[†] Una vez finalizada la construcción del aparato descrito, se publicó (Ref. 10) un sistema basado en el mismo principio.

Tabla 4.2

Coefficientes de reflexión especular [†]

	Espejo N°	i (°)		
		5	30	60
R (%)	1	89,5	90,0	90,0
	2	89,0	89,0	89,0
	3	89,0	89,0	89,0
	4	93,0	93,0	93,0
	5	93,0	93,0	93,0
	6	93,0	92,5	92,5

[†] Valores obtenidos con lámpara de filamento con un error absoluto que se estima en $\pm 1\%$. Los espejos N° 1-3 son de vidrio nacional de 2,2 mm de espesor, fabricado por estiramiento; los N° 4-6 de vidrio belga de ~1 mm de espesor, fabricado por flotamiento. Todos fueron espejados en segunda superficie según idéntico procedimiento.

ra lograr una distribución uniforme del flujo de energía sobre el diafragma de entrada del sistema óptico principal B. En la Tabla 4.2 damos los primeros resultados obtenidos. Se observa que, dentro del error de medición, R es constante para incidencia entre 5 y 60 grados y que los espejos de 1 mm de espesor reflejan ~ 4 % más que los de 2,2 mm. Debe tenerse en consideración que estos valores no son directamente comparables con el de 85 % considerado como una aproximación razonable para el caso de un espectro de radiación solar directa y espejos en condiciones reales de uso (pág. 51).

Como desarrollo ulterior se puede encarar la extensión del intervalo de medición al infrarrojo cercano (0,7-2,5 μm), lo cual requiere disponer de un detector de buena sensibilidad en esa región.

ANEXO

PROGRAMA SIMUCFEF

```

PROGRAMA SIMUCFFF
CALCULO DE LA ENERGIA INCIDENTE EN EL RECEPTOR
DIMENSION FI(12,16),PSI(12,16),PS(12,16),EDIR(12),EDIC(12),
IPR(12,16),WH(12),FM(12),HOUR(16),PGT(12,16),CG(12,16),
2HOURATN(12),FTM2(12),EIR(12,16),ETAD(12),EETA(2,12),
3PRI(16,16),PR2(16,16),CG1(16,16),CG2(16,16),PGT1(16,16),PGT2(16,16)
REAL * 4 L,1AT
INTEGER * 2 MARCA1(6)
INTEGER * 2 MARCA2(6)
DATA MARCA1/'F','E','M','A','S','J'//
DATA MARCA2/'7','A','S','O','N','D'//
PI=3.1415926
RAO=57.29578
WRITE(6,6098)
READ(5,5000) NUMDAT
6098 FORMAT(1H1,57X,'PROGRAMA SIMUCFFF',////,23X,'LOS DATOS DE ENTRADA
1 DEL PRGRAMA SON(TODOS LOS ANGULOS DEBEN EXPRESARSE EN GRADOS):'
2,///,5X,'NUMDAT(15): NUMERO DE DATOS REFERIDOS AL LUGAR',///,5X,'LA
3T,GAMMAI,AP,H,BETA,REF,GRAF(8F10.5): LATITUD(NEGATIVA SI ES SUR),
4INCLINACION Y ANGULO AZIMUTAL DEL PLANO DE ABERTURA',///,1X,'ALTURA
5 DEL LUGAR EN KM,COEFICIENTES DE TURBIDEZ Y REFLEXION,PAPAMETRO QU
6F INDICA SI SE DESA QUE EL PROGRAMA GRAFIQUE(1) O NO(-1)',
7,///,5X,'WH(M=1,12)(12F5.2): PROMEDIOS MENSUALES DEL CONTENIDO DE
8 AGUA PRECIPITABLE EN LA ATMOSFERA',///,5X,'NUM,NUMLAR(215): NUMERO
9 DE DATOS REFERIDOS AL CONCENTRADOR Y A LA CANTIDAD DE LONGITUD
15 A CONSIDERAR',///,5X,'W,TITAM1,TITAM2,CRIT(4F10.5): ANCHO DE LOS
2ESPEJOS EN UNIDADES DEL RADIO,ANGULO TITA MAXIMO,MODULO DEL TITA M
3INIMO',///,1X,'CRITERIO DE UBICACION DE LOS ESPEJOS',///,5X,'L(F10.5
4): LONGITUD DEL SISTEMA EN UNIDADES DEL RADIO, CON L=-1 SE INDICA
5LARGO INFINITO',//////////)
WRITE(6,6097)
6097 FORMAT(////,48X,'LAS SIGUIENTES EXPRESIONES INDICAN:',///,5X,
1'HOPAIN: HORA RESPECTO DEL MEDIODIA SOLAR EN QUE SE FORMA EL FOCO'
2,///,5X,'SA,SR: SUPERFICIE POR UNIDAD DE LONGITUD DE LA ABERTURA D
3EL CONCENTRADOR Y DEL RECEPTOR',///,5X,'ETAD,ETAV,ETAI,ETAA: EFICIE
4NCIA DEL CONCENTRADOR DIARIA,EN LOS PERIODOS 21/11-20/1 Y 21/5-2
50/7 Y ANUAL',///,5X,'EDIR,EVIR,EIIR,EAIR: ENERGIA INCIDENTE EN EL R
6ECEPTOR POR UNIDAD DE LONGITUD DIARIAMENTE,EN LOS PERIODOS 21/11-2
70/1',///,1X,'Y 21/5-20/7 Y ANUALMENTE'
8,///,5X,'EIOC,EVIC,EIIC,EAIC: ENERGIA INCIDENTE EN EL CONCENTRADOR
9 POR UNIDAD DE LONGITUD DIARIAMENTE,EN LOS PERIODOS 21/11-20/5',
1,///,1X,'Y 21/5-20/7 Y ANUALMENTE',///,5X,'V/A=EVIR/EAIR',///,5X,'I/A=EI
2IR/EAIR',///,5X,'GAMA=FIIR/EVIR',//////////)
DO 9417 JJJ=1,NUMDAT
READ(5,5100) LAT,GAMMAI,AP,H,BETA,REF,GRAF
READ(5,5200)(WH(I),I=1,12)
CALL FITE(LAT,GAMMAI,FI,PSI,HOUR,DHO)
CALL ENFTEM(LAT,WH,H,BETA,GAMMAI,AP,PS,ETM2,ETAM2,EVIM2,EIIM2)
WRITE(6,6099)
READ(5,5000) NUM,NUMLAR
DO 30 KMM=1,NUM
READ(5,5100) W,TITAM1,TITAM2,CRIT
SR=W*0.009303*2.
DO 30 MNM=1,NUMLAR
NS=-1
READ(5,5100) L
25 EAIR=0.
EVIR=0.
EYIR=0.
TF(NS) 31,31,32
WRITE(6,6100)
31 GO TO 134
32 WRITE(6,6200)
33 WRITE(6,6300) LAT,GAMMAI,AP,BETA,H,REF
WRITE(6,7100)(K,WH(K),K=1,12)
WRITE(6,9101) L,CRIT
CALL PERROT(FI,PSI,TITAM1,TITAM2,W,L,NS,CRIT,PGT,SA,FIM1,FIM2)
RO=(TITAM1-TITAM2)/2.
WRITE(6,6400) W,TITAM1,TITAM2,RO,SA,SR
WRITE(6,6499)
DO 100 M=1,12
CGMI=0.
FM(M)=FLOAT(M)
FOIR(M)=0.
FOIC(M)=ETM2(M)*SA
16 DO 400 K=1,16

```

```

IF(L.GT.0.0001) GO TO 399
IF(NS) 34,35,35
34 CG(M,K)=(1.-PGT(M,K))*SA*SIN(FI(M,K))/SR
IF(FI(M,K).LT.FIM1.OP.FI(M,K).GT.FIM2) CG(M,K)=0.
GO TO 399
35 CG(M,K)=(1.-PGT(M,K))*SA/SR*SIN(PSI(M,K))
IF(PSI(M,K).LT.FIM1.OP.PSI(M,K).GT.FIM2) CG(M,K)=0.
399 FIR(M,K)=PS(M,K)*(1.-PGT(M,K))*SA*REF
IF(L.GT.0.0001) GO TO 400
PR(M,K)=FIR(M,K)/SR
400 CONTINUE
DO 300 K=1,15
IF(FIR(M,K).EQ.0..AND.FIR(M,K+1).GT.0.) GO TO 52
GO TO 300
52 PEND=(FIR(M,K+1)-FIR(M,K))/(4*HOUR(K+1)-HOUR(K+1))
B=FIR(M,K+1)-PEND*HOUR(K+1)
HORAIN(M)=-B/PEND
300 CONTINUE
DO 500 K=1,15
SUM=(FIR(M,K)+FIR(M,K+1))*DHD*RAD/15.
500 FDIR(M)=EDIR(M)+SUM
EDIR(M)=FDIR(M)/1000.
FAIR=FAIR+EDIR(M)*30.
IF(M.GE.5.AND.M.LE.7) GO TO 21
IF(M.GE.2.AND.M.LE.10) GO TO 22
EVIR=EDIR(M)*30.+EVIR
GO TO 22
21 FDIR=FDIR+EDIR(M)*30.
22 ETAD(M)=FDIR(M)*100./EDIC(M)
FETA(1,M)=EDIR(M)
FETA(2,M)=ETAD(M)/10.
100 CONTINUE
WRITE(6,6500) (M,HORAIN(M),EDIR(M),EDIC(M),ETAD(M),M=1,12)
FATC=FAIM2*SA
EVIC=EVIM2*SA
ETIC=ETIM2*SA
WRITE(6,6598)
WRITE(6,6600) (M,M=1,12)
WRITE(6,6700)
DO 601 K=1,16
601 WRITE(6,6801) HOUR(K),(PGT(M,K),M=1,12)
IF(L.GT.0.0001) GO TO 45
WRITE(6,6599)
DO 600 K=1,16
600 WRITE(6,6800) HOUR(K),(PR(M,K),M=1,12)
WRITE(6,6601)
DO 1000 K=1,16
1000 WRITE(6,6800) HOUR(K),(CG(M,K),M=1,12)
WRITE(6,9101) L,CRT.
45 IF(GRAF.LT.0) GO TO 44
DO 700 J=1,6
DO 700 K=1,16
PGT1(J,K)=PGT(J,K)*100.
700 PGT2(J,K)=PGT(J+5,K)*100.
IF(L.GT.0.0001) GO TO 46
IF(NS) 41,42,42
41 WRITE(6,6101)
GO TO 43
42 WRITE(6,6201)
43 WRITE(6,6599)
DO 701 J=1,6
DO 701 K=1,16
CG1(J,K)=CG(J,K)
CG2(J,K)=CG(J+5,K)
PR1(J,K)=PR(J,K)
701 PR2(J,K)=PR(J+5,K)
CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,60000.,HOUR,PR1,16,6,100,100,MARCA1)
CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,60000.,HOUR,PR2,16,6,100,100,MARCA2)
46 WRITE(6,6603)
CALL GRAFIC (.9,12.1,0.,15.,FM,EDETA,12,2,100,100,MARCA1)
WRITE(6,6598)
CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,70.,4*HOUR,PGT1,16,6,100,100,MARCA1)
CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,70.,4*HOUR,PGT2,16,6,100,100,MARCA2)
IF(L.GT.0.0001) GO TO 44
WRITE(6,6601)
CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,70.,4*HOUR,CG1,16,6,100,100,MARCA1)

```

```

44 CALL GRAFIC (-7.50,0.1,0.,70.,400,CG2,16,6,100,100,MARCA2)
   ETAA=FAIR/FAIC*100.
   ETAT=FIIR/FIIC*100.
   ETAV=EVIR/EVIC*100.
   PORVA=EVIR/FAIR*100.
   PORTA=FIIR/FAIR*100.
   GAMA=FIIR/EVIR*100.
   WRITE(6,6505)
   WRITE(6,6900) (FAIC,FAIR,EVIC,FVIR,FIIC,FIIR,ETAA,ETAV,FAIR,PORVA,
1  PORIA,GAMA)
   WRITE(6,7000)
   IF(RD.GT.0.0001) GO TO 30
   IF(NS.LT.0) GO TO 27
   GO TO 30
27  NS=1
   GO TO 25
30  CONTINUE
9417 CONTINUE
   STOP
5200 FORMAT(5I5)
5100 FORMAT(8F10.5)
5200 FORMAT(12F5.2)
6099 FORMAT(///,42X,'PARA EL CALCULO ENERGETICO SE CONSIDERA R=1 METRO'
1,///)
6100 FORMAT(///,38X,'ENERGIA INCIDENTE EN EL RECEPTOR PARA ORIENTACIO
IN ESTE-OESTE',///)
6101 FORMAT(///,55X,'ORIENTACION ESTE-OESTE')
6201 FORMAT(///,55X,'ORIENTACION NORTE-SUR')
6200 FORMAT(///,38X,'ENERGIA INCIDENTE EN EL RECEPTOR PARA ORIENTACIO
IN NORTE-SUR',///)
6300 FORMAT(/,17X,'LATITUD=',F6.2,5X,'GAMMAI=',F6.2,5X,'AP=',F6.2,5
1X,5X,'BETA=',F5.3,5X,'H=',F7.2,5X,'COEF DE REF=',F5.3,///)
6400 FORMAT(/,23X,'W=',F6.4,5X,'TITAM1=',F6.2,5X,'TITAM2=',F6.2,5X,'RD
1=',F6.2,5X,'SA=',F5.3,5X,'SR=',F6.4,///)
6499 FORMAT(/,63X,'KWH/M',9X,'KWH/M',/)
6500 FORMAT(/,30X,'DIA 21/',12,3X,'HORAIN=',F6.2,5X,'EDIF=',
1F6.2,3X,'EDIC=',F6.2,4X,'ETAD=',F6.2,1' %')
6598 FORMAT(///,51X,'PERDIDAS GEOMETRICAS TOTALES',/)
6599 FORMAT(///,41X,'POTENCIA POR UNIDAD DE AREA EN EL RECEPTOR(W/M2)
2,///)
6600 FORMAT(7X,'DIA',12(2X,'21/',12,3X))
6601 FORMAT(///,53X,'FACTOR DE CONCENTRACION',/)
6602 FORMAT(///,19X,'ENERGIA INCIDENTE (KWH/M) EN EL RECEPTOR DIAR
1AMENTE(EI Y EFICIENCIA DIARIA(%) DIVIDIDA 10(F)',/)
6605 FORMAT(///,50X,'LAS ENERGIAS ESTAN EXPRESADAS EN KWH/M',///)
6700 FORMAT(2X,'HORA',///)
6800 FORMAT(2X,F5.2,3X,12(F7.1,3X))
6801 FORMAT(2X,F5.2,3X,12(F7.4,3X))
6900 FORMAT(/,7X,'FAIC=',F8.2,9X,'FAIR=',F8.2,9X,'EVIC=',F8.2,9X,'EVIR=
1',F8.2,9X,'FIIC=',F8.2,9X,'FIIR=',F8.2,7//,7X,'ETAA=',F6.2,1' %',42X,
2,'ETAV=',F6.2,1' %',42X,'ETAT=',F6.2,1' %',//,8X,'V/A=',F6.2,1' %',43
3X,'I/A=',F6.2,1' %',42X,'GAMA=',F7.2,1' %',///)
7000 FORMAT(/,20X,'*****')
1*****
7100 FORMAT(/,6(9X,'WH(1,12,1)=',F5.2),/)
9101 FORMAT(///,50X,'LAGO=',F7.2,10X,'CRIT=',F5.2,///)
   STOP
   END

```

SUBROUTINE PERTOT(FIM,PSIM,TITAM1,TITAM2,W,L,NS,CRIT,PGT,SA,FIM1,F2IM2)

```

REAL *4 L
DIMENSION TITA(120),E(120),D(120),H(120),FI(16),T(120),PSI(16),
*PGT(12,16),FIM(12,16),PSIM(12,16),HOR(16)
Z1(TI,R,W)=R*(1.-COS(TI))+W/2.*SIN(TI/4.)
Z2(TI,R,W)=R*(1.-COS(TI))-W/2.*SIN(TI/4.)
Y1(TI,R,W)=R*(SIN(TI))+W/2.*COS(TI/4.)
Y2(TI,R,W)=R*(SIN(TI))-W/2.*COS(TI/4.)

```

```

H(1)=0.
R=1.
RAD=57.29578
PI=3.141593
TITAI(1)=0.

```

```

C      TITAAR=(TITAM1+TITAM2)/RAD
      RO=(TITAM2-TITAM1)/(2.*RAD)
C
59     DO 100 K=7,120
      X=TITA(K-1)+W
      IF(CRIT.LT.1.5) GO TO 1
      IF(X.GE.PI/3.) X=X+0.5*W/R
      XTI=PI/2.+TITA(K-1)/4.
      IF(TITA(K-1).LT.0.0001) XTI=PI/2.+0.0001
1      DO 200 KAN=1,200
      IF(CRIT.LT.1.5) GO TO 3
      SINTI=((Z2(X,R,W)-Z1(TITA(K-1),R,W))/TAN(XTI)
      *Y1(TITA(K-1),R,W)+W/2.*COS(X/4.))/R
      GO TO 2
3      SINTI=SIN(TITA(K-1))+(COS(TITA (K-1)/4.)+COS(X/4.))*W/2.
2      IF(SINTI-1.) 21,70,70
21     TITA(K)=ARCSIN(SINTI)
      ERROR=ABS(TITA(K)-X)
      IF(ERROR-0.0001) 10,10,20
20     X=TITA(K)
200    CONTINUE
      WRITE(6,9100) K,ERROR
10     IF(TITA(K)-TITAAR/2.+RO) 40,40,50
40     NM1=K
      GO TO 100
50     IF(TITA(K)-TITAAR/2.-RO) 60,60,70
60     NM2=K
100    CONTINUE
70     IF(RO-0.001) 71,71,72
71     NM2=NM1
72     NESD=NM1+NM2-1
      NM2M=NM2+1
      NEP=NESD-1
      DO 300 LL=NM2M,NESP
300    TITA(LL)=TITA(LL-NM2+1)
      DO 301 LL=1,NM2
301    T(LL)=TITA(LL)
      DO 400 LL=1,NM2
400    TITA(LL)=-T(NM2+1-LL)
      H(NESP)=0
      DO 500 N=2,NM2
      IF(CRIT.LT.1.5) GO TO 499
      H(N)=SQRT((Z2(TITA(N),R,W)-Z1(TITA(N-1),R,W))**2+
      *(Y2(TITA(N),R,W)-Y1(TITA(N-1),R,W))**2)
      GO TO 500
499    H(N)=-COS(TITA(N-1))+COS(TITA(N))-W/2.*ABS(SIN(TITA(N)/4.)+
      2SIN(TITA(N-1)/4.))
500    CONTINUE
      DO 501 N=NM2M,NEP
501    H(N)=H(2*NM2-N)
      TM1=ATAN2(SIN(TITA(NESP))+W/2.*COS(TITA(NESP)/4.),
      *COS(TITA(NESP))-W/2.*SIN(TITA(NESP)/4.))
      TM2=ATAN2(-SIN(TITA(1))+W/2.*COS(TITA(1)/4.),
      *COS(TITA(1))+W/2.*SIN(TITA(1)/4.))
      PO=(TM2-TM1)/2.
      TITAAR=(TM1+TM2)
      SA=[SIN(TITA(NESP))-SIN(TITA(1))+W/2.*[COS(TITA(NESP)/4.)
      *COS(TITA(1)/4.)]/COS(RO)
      FIM1=TITAAR/4.-3.*RO/2.
      TITAM1=TM1*PAD
      TITAM2=TM2*PAD
      FIM2=PI-TITAAR/4.-3.*RO/2.
      DO 702 M=1,12
      DO 699 J=1,16
      GO TO 699
503    FI(J)=PSI(M,J)
      PSI(J)=FIM(M,J)
      GO TO 699
502    FI(J)=FIM(M,J)
      PSI(J)=PSI(M,J)
699    CONTINUE
15     DO 700 J=1,16
      IF(ABS(FI(J)+RO-PI/2.).LT.0.0001) FI(J)=PI/2.-RO+0.0001
      IF(PSI(J).LT.0.00001.OR.ABS(PSI(J)-PI).LT.0.00001) PSI(J)=0
      *.0001

```

```

IF(FI(J).EQ.0.) FI(J)=0.000001
SUMSU=0.
SUMSU=0.
SU=0.
SUI=0.
IF(FI(J)-FIM1) 77, 77, 77
77 IF(FI(J)-FIM2) 80, 80, 700
80 IF (FI(J)-TITAAR/2.) 90, 90, 110
110 IF(PI-FI(J)-TITAAR/2.) 430, 430, 450
450 IF(FI(J)-PI/2.+RO) 451, 451, 452
451 TITAI=-PI
SGN=1.
GO TO 470
452 TITAI=PI
SGN=-1.
GO TO 470
90 TITAI=TITAAR/2.-RO-2.*FI(J)
SGN=1.
GO TO 470
430 TITAI=2.*(PI-FI(J))-RO-TITAAR/2.
SGN=-1.
470 GO 800 K=1, NESP
F(K)=1000000.
D(K)=1000000.
IF(K.NE.1.OR.K.NE.NESP) GO TO 129
F(K)=0.
D(K)=0.
GO TO 270
129 IF(SGN*(TITA(K)-TITAI)) 800, 130, 130
130 IF(SGN*TITA(K)) 140, 150, 160
150 DME=1.
F(K)=H(K)/TAN(FI(J)+RO)*SGN
D(K)=F(K)
GO TO 170
16 F(K)=0.
DME=-1.
IF(CRIT.LT.1.5) GO TO 159
D(K)=H(K)/TAN(FI(J)+RO+TITA(K)/4.)*SGN
IF((SGN*(FI(J)+RO+TITA(K)/4.-PI/2.)).GT.0.) D(K)=-D(K)
GO TO 170
159 D(K)=H(K)*COS(FI(J)+RO+TITA(K)/2.)/SIN(FI(J)+RO+TITA(K)/4.)*SGN
GO TO 170
140 D(K)=0.
DME=-1.
IF(CRIT.LT.1.5) GO TO 169
F(K)=H(K)/TAN(FI(J)+RO+TITA(K)/4.)*SGN
GO TO 170
169 F(K)=H(K)*COS(FI(J)+RO)/SIN(FI(J)+RO+TITA(K)/4.)*SGN
170 IF(D(K)) 180, 190, 190
180 D(K)=0.
GO TO 210
190 IF(D(K)-W) 210, 210, 220
220 D(K)=W
210 IF(E(K)) 230, 240, 240
230 F(K)=0.
GO TO 250
240 IF(E(K)-W) 250, 260, 260
260 F(K)=W
250 IF(DME) 270, 270, 280
280 IF(D(K)+F(K)-W) 270, 270, 290
290 D(K)=W-F(K)
270 SUI=(W-D(K)-F(K))*SIN(FI(J)+RO+TITA(K)/4.)
IF(SUI.LT.0.) SUI=0.
IF(L.LT.0.) GO TO 279
IF(ABS(PSI(J)-PI/2.).LT.0.00001) GO TO 281
DN=(COS(TITA(K)+RO)-COS(3.*RO+2*FI(J)))/ABS(TAN(PSI(J)))
IF(DN.LT.0.) DN=0.
GO TO 282
281 DN=0.
282 IF(DN.GT.L) DN=L
C=RO+TITA(K)/4.
273 SU=(W-D(K)-E(K))*(L-DN)*SIN(C+FI(J))
IF(SU.LT.0.) SU=0.
SUMSU=SUMSU+SU
SUMSU=SUMSU+SU
800 CONTINUE

```

```

IF(L) 274,275,275
274 PGT(M,J)=1.-SUMSU/((SA*SIN(FI(J)))
GO TO 695
275 AREA=SA*L*SIN(FI(J))
IF (AREA.LT.0.0001) AREA=0.0001
PGT(M,J)=1.-SUMSU/AREA
IF(PGT(M,J).LT.0.) PGT(M,J)=0.
700 CONTINUE
702 CONTINUE
RETURN
9100 FORMAT(///,48X,'TITA(',I3,') NO CONVERGE ERROR=',F7.3,///)
END

```

```

SUBROUTINE GRAFIC(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,X,Y,N,NVAR,IM,JM,MARCA)
DIMENSION X(200),Y(96),MARCA(5),LINEA(116),LINY(116),EJEY(12),J(6)
1) INTEGER*2 LINEA,LINY,MARCA,FONDO,MARCX,MARCC,SUP,MARCY
INTEGER DI
DATA FONDO/1H /,MARCX/1H /,MARCC/1H+/,SUP/1H*/,MARCY/1H-/
LU2=6
JU=JM+1
EX=IM/(XMAX-XMIN)
EY=JM/(YMAX-YMIN)
DO 25 I=1,JM
25 LINY(I)=MARCY
EJEY(I)=YMIN
I=1
DO 30 L=1,JM,I
I=I+1
EJEY(I)=EJEY(I-1)+10./EY
LINY(L)=MARCC
30 CONTINUE
WRITE(LU2,2000) (EJEY(L),L=1,I)
WRITE(LU2,2010) MARCC,(LINY(L),L=1,JM)
LINEA(1)=MARCX
LINEA(JM+1)=MARCX
DO 40 L=2,JM
40 LINEA(L)=FONDO
XANT=XMIN-1./EX
K=0
DO 10 I=1,N
IF(X(I)-XMAX) 45,45,110
45 DI=(X(I)-XANT)*EX-0.5
IF(DI) 90,60,50
50 DO 55 NUMERO=1,DI
WRITE(LU2,2010) (LINEA(LI),LI=1,JU)
55 CONTINUE
60 DO 80 IR=1,NVAR
J(IR)=2
JA=K+IR
IF(Y(JA)-YMIN) 80,65,65
65 IF(YMAX-Y(JA)) 80,70,70
70 J(IR)=(Y(JA)-YMIN)*EY+1.5
IF(LINEA(J(IR)).NE.FONDO.AND.LINEA(J(IR)).NE.MARCX) GO TO 75
LINEA(J(IR))=MARCA(IR)
GO TO 80
75 LINEA(J(IR))=SUP
80 CONTINUE
WRITE(LU2,2030) X(I),(LINEA(LI),LI=1,JU)
DO 85 L=1,NVAR
85 LINEA(J(L))=FONDO
LINEA(1)=MARCX
LINEA(JU)=MARCX
XANT=X(I)
K=K+NVAR
100 CONTINUE
110 WRITE(LU2,2010) MARCC,(LINY(L),L=1,JM)
RETURN
2000 FORMAT(' ',10X,12(F8.2,2X))
2010 FORMAT(' ',14X,110A1)
2030 FORMAT(' ',2X,F10.4,2X,110A1)
END

```

```

SUBROUTINE FITE(LAT,GAMMAI,MUN,MUE,HOJR,DHO)
DIMENSION MUN(12,16),MUE(12,16),HOJR(16),AO(12,16)
REAL * 4 LAT,LATR,MUE,MUN
PI=3.141593
RAD=57.29578
DHO=PI/24.
OMEGA=2.*PI/365.
LATR=LAT/RAD
GAMMAIR=GAMMAI/RAD
DO 100 J=174,354,30
HORA=-7.5*15./RAD
M=J/30+1
TEMP=OMEGA*FLOAT(J)
DELTA=(.33281-22.984*COS(TEMP)+0.3499*(-COS(2.*TEMP))-0.1398*COS
2(3.*TEMP)+3.7872*SIN(TEMP)+0.03205*SIN(2.*TEMP)+0.07187*SIN(3.*
3TEMP))/RAD
HORAIN=ARCCOS(-TAN(DELTA)*TAN(LATR))
DO 200 K=1,16
MUN(M,K)=1000.
MUE(M,K)=1000.
AO(M,K)=1000000.
IF(HORA+HORAIN) 199,14,14
IF(HORA-HORAIN) 16,16,199
14 IF(HORA.EQ.0.) HORA=0.000001
16 ASR=ARCSIN(SIN(LATR)*SIN(DELTA)+COS(LATR)*COS(DELTA)*COS(HORA))
SENA=COS(DELTA)*SIN(HORA)/COS(ASR)
COSA=(COS(DELTA)*COS(HORA)-SIN(ASR)*COS(LATR))/COS(ASR)/SIN(LATR)
AO(M,K)=ATAN2(SENA,COSA)
MUN(M,K)=ATAN2(TAN(ASR),-COSA)
MUE(M,K)=ATAN2(TAN(ASR),-SENA)
199 HOJR(K)=HORA*RAD/15.
200 HOJA=HORA+DHO
100 CONTINUE
DO 300 M=1,5
DO 300 K=1,16
MUN(M,K)=MUN(12-M,K)
MUE(M,K)=MUE(12-M,K)
300 AO(M,K)=AO(12-M,K)
IF(ABS(GAMMAI)-0.00001) 22,22,18
18 DO 400 M=1,12
DO 400 K=1,16
IF(MUN(M,K).GT.PI) GO TO 400
MUN(M,K)=MUN(M,K)+GAMMAIR
IF(MUN(M,K).GT.PI) MUN(M,K)=1000.
IF(MUN(M,K).GT.PI) GO TO 400
IF(ABS(PI/2.-MUE(M,K)).LE.0.00001) MUE(M,K)=PI/2.+0.00001
IF(ABS(PI/2.-AO(M,K)).LE.0.00001) AO(M,K)=PI/2.+0.00001
AUX=TAN(MUE(M,K))/TAN(GAMMAIR)+1./TAN(AO(M,K))
MUE(M,K)=ATAN2(SIN(GAMMAIR),1./AUX)
400 CONTINUE
22 RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ENETEM (LAT,W,H,BETA,GAMMAI,AP,PS,ET,EAI,EVI,EII)
DIMENSION W(12),MFS(12),PS(12,16),ET(12)
REAL * 4 LAT,LATR
INCL=-1
PI=3.141593
RAD=57.29578
OMEGA=2.*PI/365.
LATR=LAT/RAD
DHO=PI/24.
GAMMAIR=GAMMAI/RAD
APR=AP/RAD
EAI=0.
EVI=0.
EII=0.
DO 100 J=24,354,30
HORA=-7.5*15./RAD
M=J/30+1
MFS(M)=M
ET(M)=0.
TEMP=OMEGA*FLOAT(J)
EO=13.83+45.326*COS(TEMP)+0.84018*COS(2.*TEMP)-0.00461*COS(TEMP*3.
2)+1.8037*SIN(TEMP)+0.09746*SIN(2.*TEMP)+0.18412*SIN(3.*TEMP)

```

```

DELTA=(0.33281-22.984*COS(TEMP)+0.3499*(-COS(2.*TEMP))-4.1398*COS
2(3.*TEMP)+3.7872*SIN(TEMP)+0.03205*SIN(2.*TEMP)+0.07187*SIN(3.*
3TEMP))/RAD
HOPAIN=ACOS(-TAN(DELTA)*TAN(LATR))
DO 2 K=1,16
PS(M,K)=0.
IF(HORA+HOPAIN) 200,19,19
IF(HORA-HOPAIN) 21,21,200
21 ASR=ASIN(SIN(LATR)*SIN(DELTA)+COS(LATR)*COS(DELTA)*COS(HOPA))
AS=AS*PAD
IF(INCL) 11,12,13
11 SENA=COS(DELTA)*SIN(HORA)/COS(ASR)
COSA=(COS(DELTA)*COS(HOPA)-SIN(ASR)*COS(LATR))/(COS(ASR)*
1 SIN(LATR))
AO=ATAN2(SENA,COSA)
FS=COS(GAMAIR)*SIN(ASR)+SIN(GAMAIR)*COS(ASR)*COS(AO-APR)
IF(FS.(1.0.)) FS=0.
GO TO 15
12 FS=1.
GO TO 15
13 FS=SIN(ASR)
15 A=150.343+(AS-40.)/1.821
B=-10.034+(AS-24.5)/A
C=-1.217+(AS-11.)/B
FMEH=10.01+(AS-5.)/C
FME=FMEH*(1.-0.1*H)
AE=1.4899-2.1099*COS(ASR)+0.6332*COS(2.*ASR)+0.052*COS(ASR*3.)-
21.0022*SIN(ASR)+1.0077*SIN(2.*ASR)-0.25*6*SIN(3.*ASR)
T=((AS+85.)/(39.5*EXP(-W(MES(M)))+47.4)+0.01)+(16.+0.22*W(MES(M)))
2*BETA
PS(M,K)=FO*FS*EXP(-T*AE*FME)
200 HORA=HOPA+DHO
DO 3 K=1,15
300 FT(M)=ET(M)+(PS(M,K)+PS(M,K+1))*DHO*RAD/15.
ET(M)=ETIM/1000.
EAT=EAT+ET(M)*30.
IF(M.GE.5.AND.M.LE.7) GO TO 31
IF(M.GE.2.AND.M.LE.10) GO TO 100
EVI=EVI+ET(M)*30.
GO TO 100
31 EII=EII+ET(M)*30.
100 CONTINUE
RETURN
END

```

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.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).
- 3) 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).
- 4) Boletín Mensual, Secretaría de Estado de Energía, Buenos Aires (diciembre de 1976).
- 5) B.J.Csik, H.M.Marrero y H.Sarraillet, "Análisis Electroenergético Argentino". Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (1974).
- 6) N.Robinson, "Solar Radiation" (Elsevier Publishing Co., Amsterdam/London/New York) (1966).
- 7) R.Dogniaux, "Programme de Calcul pour la Prédétermination Précise des Eclairéments Energétiques et Lumineux en Relation avec l'Utilization de l'Energie Solaire", presentado en el "Colloque International sur l'Electricité Solaire", Toulouse, Francia (1976).
- 8) J.A.Duffie y W.A.Beckman, "Solar Energy Thermal Processes" (Wiley and Sons, New York) (1975).
- 9) Servicio Meteorológico Nacional, "Datos de Radiación Solar del Período 1º de julio de 1957 al 31 de diciembre de 1958", Buenos Aires (1962).
- 10) R.B.Pettit, Solar Energy 19, pág. 733 (1977).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Prof. A. Díaz Romero su preocupación por asegurar la correcta marcha de los programas de computación y la buena voluntad con que colaboró en solucionar los problemas que se han presentado en los mismos.

Las figuras fueron realizadas por los Sres.J.Altamirano y J.Prieto y el original fue mecanografiado por la Srta. M.B.Carrizo en su mayor parte, colaborando con el resto la Sra. C.Franke. A todos ellos les expresamos nuestro reconocimiento.

NOTACION

- A : ángulo azimutal solar.
- A_r : ancho del receptor.
- C, C_g, C_{gm} : factor de concentración, factor de concentración geométrico y factor de concentración geométrico máximo.
- C_e : calor específico.
- d_n : parte del espejo n caracterizada porque la radiación reflejada desde ella es interceptada antes de llegar al receptor.
- e_n : parte del espejo n a la cual no llegan rayos incidentes.
- E_r^A, E_r^D : energía incidente en el receptor, por año y por día.
- h : altura solar.
- h_n : distancia entre los bordes de dos espejos sucesivos
- I_r : intensidad incidente en el receptor.
- I_s : intensidad solar incidente en el concentrador (radiación directa).
- L : longitud del sistema concentrador-receptor.
- P_g, P_{gt} : pérdidas geométricas y pérdidas geométricas totales.
- $P_{\perp}$: plano perpendicular al eje de simetría longitudinal del cilindro directriz del concentrador.
- R : radio del concentrador.
- R : coeficiente de reflexión especular.
- S_a, S_p, S_u : superficies de abertura, no aprovechada y útil del concentrador, proyectadas sobre un plano perpendicular a la dirección de los rayos incidentes.
- T_e, T_s : temperaturas de entrada y salida del fluido en el receptor.
- T_M : máxima temperatura alcanzable por el fluido en el receptor.
- W : ancho de los espejos.
- α : absorbancia.
- α_s : abertura angular del Sol.
- β : ángulo formado por el eje de simetría longitudinal del cilindro directriz y el plano horizontal.
- γ : cociente entre las energías incidentes en el receptor en los períodos 21/5 - 20/7 y 21/11 - 20/1.
- δ : declinación solar - densidad.
- ϵ : emitancia térmica.

- η_c^A, η_c^D : eficiencia del concentrador, anual y diaria.
- η_t : eficiencia de conversión de la energía incidente en el receptor en energía térmica.
- θ_a : abertura angular del concentrador.
- θ_n, θ_f : posición angular del espejo n y del foco.
- θ_{M1}, θ_{M2} : valor máximo de θ_n y módulo del valor mínimo de θ_n .
- ξ : ángulo entre dos planos que contienen al eje de simetría longitudinal del cilindro directriz, conteniendo, además, uno a la vertical del lugar y el otro a la bisectriz del ángulo θ_a .
- ρ : ángulo entre dos planos que contienen al eje de simetría longitudinal del cilindro directriz, conteniendo, además, uno a la bisectriz del ángulo θ_a y el otro al eje de simetría longitudinal del espejo tangente.
- σ : constante de Stefan - Boltzmann.
- ϕ : latitud del lugar.
- Φ : ángulo determinado por la proyección de los rayos incidentes en el plano $P_\perp$ y el plano de abertura.
- Ψ : ángulo determinado por el eje de simetría longitudinal del cilindro directriz y la proyección de los rayos incidentes sobre el plano que contiene a dicho eje y a la bisectriz del ángulo θ_a .

