

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1980

CNEA - NT. 22/80

REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

CONVERSION FOTOTERMICA DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

Jaime A. Moragues
Departamento de Fisica
Gerencia de Investigaciones

BUENOS AIRES

1980

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

CONVERSION FOTOTERMICA
DE
ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

Jaime A. Moragues
Departamento de Fisica
Gerencia de Investigaciones

BUENOS AIRES

1980

CONVERSION FOTOTERMICA DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

Jaime A. Moragues*

R E S U M E N

Se describen someramente los métodos de conversión de radiación solar en energía eléctrica haciéndose una breve comparación entre fototérmica y fotovoltaica dado que, dentro de los métodos de aprovechamiento directo, son actualmente los más desarrollados.

Se analizan los diferentes sistemas de conversión fototérmica dando las características del conjunto de dispositivos que permiten la colección de la energía solar, su conversión en energía térmica y su transporte hasta un turbogenerador. Asimismo se discuten los diferentes ciclos termodinámicos y el almacenaje de energía, así como algunas características técnicas y económicas globales.

Se hace una breve reseña de los antecedentes y programas en marcha tanto a nivel mundial cuanto en la República Argentina.

*) Miembro de la Carrera de Investigación del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

I N D I C E

	Pág.
1.- INTRODUCCION	1
2.- BREVE COMPARACION ENTRE CONVERSION FOTOTERMICA Y FOTOVOLTAICA ..	3
3.- DIFERENTES SISTEMAS DE CONVERSION FOTOTERMICA	4
a) Pozas solares	5
b) Estanques solares playos	6
c) Colectores planos	6
d) Colectores fijos de concentración moderada	7
e) Concentradores cilíndricos-parabólicos	8
f) Concentradores fijos a espejo facetado	9
g) Concentradores de espejos múltiples cóncavo-giratorios	10
h) Lentes de Fresnel	11
i) Concentradores paraboloídes de revolución	11
j) Concentradores semiesféricos fijos	12
k) Sistemas a receptor central con foco lineal	12
l) Sistemas a receptor central con foco puntual	13
4.- CICLOS TERMODINAMICOS	14
5.- TRANSPORTE DE ENERGIA	14
6.- ALMACENAJE	15
7.- ALGUNAS CARACTERISTICAS TECNICAS Y ECONOMICAS GLOBALES	16
8.- ANTECEDENTES Y PROGRAMAS A NIVEL MUNDIAL	18
9.- PROGRAMAS EN DESARROLLO EN LA REPUBLICA ARGENTINA	22
TABLAS Y FIGURAS	26
REFERENCIAS	41

1.- Introducción

El estado actual de los conocimientos permite afirmar que la factibilidad de la conversión de energía solar en electricidad a través de diferentes procesos está demostrada y que para su utilización en gran escala sólo se requieren desarrollos que permitan reducir los costos de los sistemas de conversión y acumulación; por lo tanto, los factores que determinarán si la energía solar se utilizará en el futuro para la producción masiva de electricidad serán de orden económico, político y ecológico. Es de destacar también que la tecnología requerida no es compleja, sobre todo se la compara con las fuentes de combustibles nucleares, estando al alcance de países con un grado de desarrollo tecnológico medio.

La energía solar puede convertirse en electricidad mediante una gran variedad de procedimientos¹). Por una parte, la radiación solar incidente sobre la Tierra se convierte a través de procesos naturales en otras formas de energía que, con mayor o menor eficiencia, pueden ser utilizadas como intermedias para la generación de electricidad. El proceso de fotosíntesis da origen a, por ejemplo, combustibles tradicionales como la madera o, en una aplicación menos convencional, al crecimiento intensivo de algas especialmente seleccionadas para optimizar la obtención de metano a partir de ellas; además, en una evolución, muchas veces secular, formó nuestras presentes reservas de combustibles fósiles. La absorción de la radiación solar en la atmósfera genera energía mecánica en forma de desplazamientos de grandes masas de aire (energía eólica) mientras que la absorción de la misma en los mares produce un significativo y aprove-

chable gradiente de temperatura en las capas oceánicas de algunas regiones. Además, la evaporación del agua de mares y lagos genera energía potencial al acumular aquélla en alturas apropiadas para su posterior utilización en centrales hidroeléctricas.

Por otra parte, desarrollando dispositivos y sistemas adecuados, es posible convertir la radiación solar en energía eléctrica antes de que el sistema Tierra-atmósfera la transforme. De acuerdo con el proceso interviniente, podemos definir dos grandes grupos de conversores: directos e indirectos. En el primer grupo figuran la conversión termoiónica, que consiste en calentar un cátodo que emite electrones, y la conversión termoeléctrica, en la cual se calienta una de las junturas de un par metálico, empleándose en ambos casos la energía solar como fuente de calor. También agrupamos allí la conversión fotovoltaica, en la cual los fotones entregan energía a los electrones de valencia de un semiconductor para llevarlos a la banda de conducción, generando así una corriente eléctrica. En el segundo grupo incluimos los sistemas fototérmicos, en los que la energía solar es convertida en térmica y entregada a un fluido que acciona una turbina. La conversión termofotovoltaica, donde la radiación solar concentrada se utiliza para calentar un cuerpo cuya radiación, desplazada en longitud de onda respecto a la solar, es recibida por una célula fotovoltaica, puede también incluirse en este último grupo.

Finalmente, una alternativa interesante es la producción de hidrógeno mediante energía solar, por ejemplo por disociación del agua, ya que dicho gas puede ser utilizado en celdas de combustible para generar directamente electricidad o como combustible en centrales térmicas convencionales.

Cada uno de los caminos no convencionales precedentemente mencionados como factibles para la conversión de energía solar en electricidad presenta aspectos suficientemente amplios como para ser objeto de un análisis específico. Algunos de ellos son discutidos en otras ponencias de este Simposio. En el presente trabajo sólo consideraremos con algún detalle los sistemas de conversión fototérmica acoplados a turbogeneradores, agregando una breve comparación del mismo con la conversión fotovoltaica puesto que ambos, dentro de los métodos de aprovechamiento directo de la radiación solar para la generación de electricidad, son actualmente los más desarrollados.

2.- Breve comparación entre conversión fototérmica y fotovoltaica

Sin pretender ser exhaustivos, destacaremos a continuación algunas diferencias existentes entre los sistemas de conversión fototérmico y fotovoltaico:

a) Como ya mencionamos, el sistema fotovoltaico convierte directamente la energía solar en electricidad, mientras que el fototérmico pasa por una etapa intermedia de energía térmica; sin embargo, para interconexión a redes existentes el sistema fotovoltaico requiere un convertidor de corriente continua en alterna;

b) en el sistema fototérmico se aprovecha prácticamente la totalidad de la energía contenida en la radiación solar; en el fotovoltaico sólo una fracción cuya magnitud depende del tipo de células utilizadas;

c) las centrales fototérmicas que se presentan como más convenientes desde el punto de vista económico utilizan concentradores, por lo cual sólo aprovechan la componente directa de la radiación solar; además, para tener una mayor eficiencia del sistema turbogenerador, es conveniente que trabajen a temperatura elevada, lo cual requiere sistemas de enfriamiento que en zonas desérticas pueden llegar a ser sumamente costosos; los sistemas fotovoltaicos, en caso de operar sin concentración, aprovechan tanto la radiación directa cuanto la difusa y no requieren sistema de enfriamiento;

d) por la existencia de un significativo factor de escala en el costo de los turbogeneradores, los sistemas fototérmicos de generación de electricidad son particularmente adecuados para su empleo en centrales de potencia; los sistemas fotovoltaicos, en cambio, pueden ser empleados indistintamente en viviendas individuales, pequeñas o grandes comunidades o en centrales de potencia, pues prácticamente carecen de factor de escala;

e) los sistemas fototérmicos siempre poseen partes móviles que requieren de un adecuado mantenimiento para su correcto funcionamiento; los fotovoltaicos, si se alcanza el nivel de costos necesarios sin el empleo de concentradores, prácticamente carecen de partes móviles.

Las características precedentemente señaladas y otras atinentes, por ejemplo, a las diversas posibilidades de acumulación de la energía producida, pueden, según las condiciones regionales existentes y considerando el tipo de aplicación prevista, llevar a que uno de los sistemas de conversión presente ventajas técnico-económicas sobre el otro.

3.- Diferentes sistemas de conversión fototérmica

El método de generación de electricidad por conversión fototérmica de la energía solar se basa en el empleo de la energía térmica obtenida para producir un fluido apto para accionar una turbina convencional. Por lo tanto, podemos dividir el sistema generador en dos partes: el conjunto de dispositivos que permiten la colección de la energía solar, su conversión a energía térmica y su transporte hasta un turbogenerador, los cuales constituyen el subsistema "específicamente solar" y los turbogeneradores que, con ligeras modificaciones para adaptarlos al concepto solar, constituyen el "subsistema convencional". En el presente trabajo describiremos brevemente los diferentes sistemas propuestos para el subsistema específicamente solar dando algunas de sus características más sobresalientes, mencionaremos los ciclos térmicos en consideración y los sistemas de almacenaje de energía posibles.

Vamos a dividir los sistemas de conversión de energía solar en térmica en dos grupos según que el sistema colector esté constituido por un gran número de unidades en cada una de las cuales se realiza la conversión (conversión distribuida) o que la energía solar sea colectada en una gran superficie y concentrada en un único receptor central (conversión centralizada). Dentro de cada uno de estos grupos clasificaremos a los colectores según posean ningún, uno o dos grados de movimiento. En la Tabla I se resumen los distintos tipos de colectores convertidores propuestos.

Antes de entrar en la descripción en detalle de los mismos discutiremos algunas de sus características generales. Los sistemas sin concentración hacen uso de la radiación global, teniendo la ventaja de que pueden trabajar en días nublados. Los demás sistemas sólo aprovechan la radiación directa o, en el caso de los concentradores fijos, tipo Winston, además, una parte de la difusa. Esta diferencia lleva aparejada cierto grado de complejidad creciente en cuanto al sistema de movimiento de los colectores.

Los sistemas de conversión distribuida, como ya dijimos, convierten la energía solar en térmica en la ubicación que cada uno de los colectores ocupa en el campo de colección, debiéndose transportar dicha energía térmica hasta un receptáculo cercano al turbogenerador. Esto requiere sistemas de transporte con alto grado de aislación térmica. Los sistemas de conversión centralizada, en cambio, colectan la radiación solar y la transmiten por medios ópticos (la reflejan) hasta un punto cercano al turbogenerador, donde se

convierte en energía térmica.

La temperatura alcanzable con los distintos sistemas es importante por el hecho de que la eficiencia de los turbogeneradores crece con el aumento de la diferencia de temperatura del ciclo térmico, y ésta será mayor cuanto mayor sea la temperatura inicial. Para los sistemas sin concentración, aún usando los colectores planos con superficies selectivas, el límite alcanzable es de aproximadamente 180°C. Para los sistemas con concentración las temperaturas alcanzables dependen del factor de concentración (C_F). Para sistemas con foco lineal el valor teórico de C_F está dado por $1/\sin(\delta/2)$, donde δ es el ángulo de aceptación, o sea el ángulo dentro del cual todo rayo que incide sobre el concentrador, al reflejarse, llega al receptor. El menor ángulo de aceptación es el del ángulo del disco solar (32 minutos) con lo cual el C_F teórico máximo es de 215. Con estos sistemas se pueden obtener temperaturas entre 300 y 400 °C con buena eficiencia de conversión de energía solar a térmica (alrededor de 65%). Para el caso de sistemas con foco puntual (movimiento en dos direcciones) el valor teórico está dado por $C_F = 1/\sin^2(\delta/2)$, siendo el máximo teórico de 46.000. Con estos concentradores se pueden lograr temperaturas elevadas (900 a 1000 °C) con buena eficiencia (entre 65 y 70%).

Vamos a describir ahora los diferentes colectores propuestos, de acuerdo con la Tabla I.

a) Pozas solares

Consisten ²⁾ en reservorios de 1 m o más de profundidad que contienen agua cuyo grado de salinidad crece con la profundidad. La radiación solar se absorbe en el fondo negro de la poza, calentándose así las capas de agua cercana a él. El gradiente de densidad es suficientemente elevado como para impedir la convección de estas capas calientes hacia la superficie. A su vez, las capas estacionarias superiores constituyen una buena aislación térmica para las más profundas. La energía térmica almacenada en las capas inferiores es extraída, por ejemplo, mediante un fluido secundario de trabajo que circula dentro de las tuberías sumergidas en ellas. Las pozas pueden estar cubiertas por un material plástico transparente a fin de evitar que el viento agite su superficie produciendo mezcla de las distintas capas y, además, que caiga suciedad a la poza. Es necesario reemplazar periódicamente las diferentes capas a fin de mantener el gradiente salino adecuado.

Este sistema presenta la ventaja de que a un colector de bajo costo se agrega intrínsecamente un acumulador de energía térmica para períodos lar-

cos. Durante el lapso inicial hasta que la poza alcanza la estabilidad (que puede llegar a un año) la temperatura va subiendo gradualmente. Después de este período la temperatura se estabiliza en el intervalo de 70 a 80 C, independientemente de la variación diaria de insolación; se han medido ³⁾ temperaturas de hasta 90 C.

b) *Estanques (pozas) solares playos*

Cada unidad consiste en un estanque playo (de ~5 cm de profundidad), formado por una bolsa de material plástico con fondo negro y capa superior transparente. Esta última evita la evaporación del agua al calentarse. Sobre el estanque se coloca un invernadero el cual puede ser de material plástico flexible o rígido. En la Fig. 1 se muestran esquemáticamente los distintos sistemas. Los mismos fueron propuestos ⁶⁾ por un grupo del Lawrence Livermore Laboratory en 1974. El agua fluye lentamente, recirculando en forma continua entre los colectores y un tanque térmicamente aislado. Durante las horas sin sol, el agua es acumulada en el tanque. En este último se produce el intercambio de calor con el fluido de trabajo (por ej. Fluor 11) cuyos vapores accionan la turbina. Los sistemas de estanques solares playos sólo permiten alcanzar temperaturas entre 60 y 80 C, por lo cual la eficiencia total del sistema (conversión de energía solar en electricidad), al igual que en el caso de las pozas solares, es muy baja (menos del 3%). Para aumentar la eficiencia de colección de los estanques se ha propuesto ⁵⁾ colocar un reflector orientado de E a O y mirando al norte o al sur según el hemisferio en que se encuentre (ver Fig. 1.c.). De esta manera se simula una inclinación del colector, con lo cual se incrementa el área útil del mismo.

c) *Colectores planos*

Cada módulo de colector plano consiste en una superficie metálica (Al o Cu) ennegrecida, sobre la cual incide la radiación solar y se convierte en energía térmica. Acoplados a esta superficie mediante un buen contacto térmico (en algunos casos formando parte de la misma) se colocan tubos metálicos a través de los cuales circula el fluido de trabajo. Todo el conjunto está cerrado en una caja que tiene sus laterales y piso térmicamente aislado y su parte superior cubierta por una lámina de vidrio que produce efecto invernadero. Colocando varias capas de vidrio el efecto se multiplica. Al encontrarse el

convertidor encerrado en una caja, también disminuyen las pérdidas por convección directa al exterior, subsistiendo pérdidas por convección interna. Las pérdidas por conducción son despreciables ⁴⁾ para una distancia de la superficie metálica al vidrio mayor que 3 cm. En la Fig. 2 se esquematiza el sistema descripto. Cada módulo se instala inclinado en un ángulo cercano a la latitud del lugar, orientado de acuerdo con el hemisferio; se puede realizar, además, un ajuste estacional de la inclinación.

Para disminuir las pérdidas de energía térmica del convertidor por radiación y convección interna, se utilizan superficies selectivas ⁸⁾ y estructuras antirradiantes ⁹⁾.

La eficiencia de este sistema para la generación de electricidad, si bien superior a la de los casos antes mencionados, es muy baja. En la Fig. 2 se muestran por separado la eficiencia ⁷⁾ del subsistema de colección y conversión de energía solar en térmica y la del ciclo térmico (generación de vapor y turbina). Ambas eficiencias dependen de las temperaturas del fluido de transporte tanto a la entrada cuanto a la salida del colector. Combinando ambas curvas se obtiene un valor óptimo para la eficiencia total del sistema de conversión de energía solar en electricidad. Dicho valor es de 3,5% y corresponde a una temperatura del fluido a la salida del colector de 125 C y a la entrada del mismo de 100 C.

d) *Collectores fijos de concentración moderada*

Hay una variedad ^{10, 11)} de concentradores fijos de ajuste estacional o diario que permiten obtener factores de concentración C_F que van desde algo más que 1 hasta un máximo de 10. Los más simples están formados por un par de espejos en forma de V con los cuales se logra un factor de concentración máximo de ~2. El mayor C_F se obtiene con el concentrador parabólico compuesto (CPC) o concentrador Winston ¹²⁾. Valores intermedios se logran con concentradores multifacéticos planos o curvos. En la Fig. 3 se muestran los perfiles de algunos de ellos y se dan los parámetros que los caracterizan.

Para el caso particular del CPC, el factor de concentración está dado por $C_F = 1/\sin \frac{\delta}{2}$ donde δ es el ángulo de aceptación (Fig. 3). Cuanto mayor es C_F (menor ángulo de aceptación), menor es la radiación difusa aprovechada y, además, se hace necesario modificar la inclinación del plano de abertura más frecuentemente. Por otro lado, el área del reflector por unidad de abertura reque-

rida también aumenta al aumentar C_F , lo cual influye desde el punto de vista práctico y económico. Normalmente se usa el denominado CPC truncado con el cual, sin perder demasiado en C_F , se tienen tamaños de reflector más prácticos. En la Fig. 3 se muestran los valores de C_F en función de la relación entre el largo de los reflectores y la abertura, para diferentes valores de $\delta/2$. En la Fig. 4 se muestra un conjunto de concentradores CPC formando un colector fijo acanalado con concentración moderada. Los receptores pueden ser planos o en forma de cavidad, con o sin superficie selectiva.

Como ejemplo, citamos el sistema desarrollado por Argonne National Laboratory de EE.UU. de N.A. ¹⁴), el cual tiene un $C_F = 5$ y un semiángulo de aceptación de $\delta/2 = 8,5^\circ$. El receptor está cubierto con superficie selectiva y encerrado en un tubo de vidrio cubierto en su parte superior con una superficie antirreflectante. Con orientación E-0 se debe modificar su inclinación 12 veces en el año. La eficiencia promedio anual del colector (conversión de energía solar en térmica) es del 50 %, con lo cual se espera satisfacer el requerimiento de temperatura de 230 C que se necesita para el programa de energía total que está en marcha en Sandia Laboratories, Albuquerque, EE.UU. de N.A.

e) Concentradores cilíndricos-parabólicos

El sistema está formado por un conjunto de módulos con sección parabólica, cada uno de los cuales concentra en su eje focal la energía solar que incide sobre una superficie de varios metros cuadrados (Fig. 5). A lo largo del eje focal se encuentra el receptor; la energía térmica generada en éste es colectada por un fluido con el cual se puede accionar directamente las turbinas o transportar dicha energía hasta un intercambiador donde se la transfiere a un fluido secundario de trabajo.

A fin de que cada módulo tenga un foco bien definido, es necesario que en todo momento los rayos que inciden sobre él sean paralelos al plano de simetría del concentrador. Esto sólo se puede lograr rotando el cilindro alrededor de un eje paralelo al eje focal a medida que el Sol se desplaza. Según la orientación del eje de movimiento podemos distinguir tres casos: (a) eje de movimiento orientado en la dirección N-S e inclinado respecto de la horizontal en un ángulo próximo a la latitud del lugar (orientación polar), (b) eje de movimiento en dirección N-S en posición horizontal, (c) eje de movimiento en dirección E-0

y posición horizontal.

Se puede calcular ¹⁶⁾ el valor medio del factor de concentración teórico, promediado a lo ancho de un receptor plano para una abertura dada. Para incidencia normal de la radiación y un ángulo de abertura del concentrador de 140° , tomando un ancho del receptor para el cual se aprovecha el 97% de la radiación concentrada que llega a él, se obtiene $C_F = 113$; para una abertura de 90° y un 98% de la radiación concentrada que llega al receptor, C_F es de 135.

Los factores de concentración que se han publicado ¹⁷⁾ están en el intervalo de 13 a 60, con los cuales se alcanzan temperaturas de 150 a 340 C. El orden de magnitud de las eficiencias para la conversión de radiación solar en energía térmica (vapor a 315 C) obtenible con estos concentradores, es ilustrado por los valores dados en la Ref. 18: 45%, 40% y 35% para, respectivamente, las orientaciones polar, N-S y E-O. Para una eficiencia del subsistema turbina-generador del orden del 33%, las eficiencias totales de conversión de energía solar en electricidad son de 15%, 13% y 11% respectivamente para cada una de las orientaciones.

f) *Concentradores fijos a espejo facetado*

Consideraremos dos versiones del concentrador fijo a espejo facetado (CFEF): (a) el constituido por un conjunto de espejos planos, angostos y largos ^{19, 20)}, dispuestos de manera que sus ejes longitudinales de simetría estén sobre un cilindro imaginario de referencia o directriz. Uno de los elementos especulares es tangente a dicho cilindro y los demás forman ángulos prefijados respecto del espejo tangente; (b) el constituido por un conjunto de espejos cilíndricos, angostos y largos ²¹⁾ dispuestos también con sus ejes longitudinales de simetría sobre un cilindro de referencia. El espejo central es tangente al cilindro directriz en su punto medio; el resto de los espejos tienen una inclinación determinada respecto del central.

En la Fig. 6 se muestran secciones de ambos concentradores. Es posible demostrar que, para cualquier dirección de un haz paralelo de rayos incidentes, ambos sistemas poseen un foco lineal localizado sobre el cilindro de referencia y que las sucesivas posiciones de éste, debidas al movimiento aparente del Sol, están también ubicadas sobre el mismo cilindro. Por lo tanto, el receptor de la energía concentrada puede estar constituido por un tubo so-

portado por brazos cuyo centro de giro se halle sobre el eje de simetría del cilindro directriz. La orientación más conveniente para los CFEF es la E-0. Para que las pérdidas en los extremos del receptor sean despreciables, la relación ²⁰⁾ entre el largo del concentrador y su radio debe ser superior a 50.

El factor de concentración es función de la relación existente entre el ancho de los espejos y el radio del cilindro directriz (W/R) y también del ángulo de incidencia de la radiación. En el caso de elementos ópticos planos ²⁰⁾, para una relación $W/R=0,02$ y un ángulo de abertura de 150° , el C_F varía entre 35, para ángulo de incidencia de $\pm 40^\circ$, a 65 para incidencia normal, considerando pérdidas en el receptor menores que el 5%. El factor de concentración máximo teórico, para $W/R \rightarrow 0$, es ~ 100 . En casos prácticos los factores de concentración para el sistema con espejos curvos son aproximadamente 1,5 veces mayor ²¹⁾ que para el de espejos planos. En el caso límite $W/R \rightarrow 0$ ambos factores coinciden. Es posible incrementar estos factores de concentración colocando en el receptor un segundo concentrador, por ejemplo del tipo Winston.

De acuerdo con la Ref. 22, usando un segundo concentrador y superficie selectiva en el receptor, es posible diseñar un CFEF con elementos ópticos planos que permita obtener temperaturas del orden de los 540 C, lo cual permite generar eficientemente vapor en las condiciones de trabajo de las centrales modernas.

g) *Concentradores de espejos múltiples cóncavo-giratorios*

Cada concentrador está formado por un conjunto de espejos cilíndricos cóncavos que rotan alrededor de sus generatrices centrales, las cuales están ubicadas sobre un plano^{23,24)} o sobre un cilindro²⁵⁾ de referencia fijo. Los espejos están orientados de manera que rayos paralelos reflejados en sus centros se corten en una línea fija paralela al eje del cilindro (Fig. 7); al variar el ángulo de incidencia todos los espejos deben rotar un mismo ángulo.

Para el caso de Ref. 24, C_F para incidencia normal es ¹⁶⁾ ≈ 65 . La temperatura del fluido a la entrada del receptor es de 245 C y a la salida de 310 C. La eficiencia de conversión de energía solar en térmica es de $\sim 70\%$. El sistema descrito en Ref. 23 tiene $C_F = 35-40$, siendo la temperatura de salida del fluido de 315 C y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica del 50 %. Para concentradores con los ejes de los espejos montados sobre un soporte cilíndrico²⁵⁾ pueden lograrse factores de concentración medio ideales entre 80 y 140 para ángulos de incidencia de 40 a 90° , reduciéndose para igual C_F el número de espejos requeridos para soporte plano.

h)

Cada unidad concentradora está constituida por una lente de Fresnel con foco lineal, con sus facetas ubicadas hacia el receptor (Fig. 8). Las lentes, del orden de 7 - 10 mm de espesor, suelen ser de acrílico ²⁶⁾ a fin de mantener su costo lo más bajo posible; su base puede ser plana o curva ²⁷⁾. El conjunto lente-receptor gira alrededor de su foco lineal a fin de seguir el movimiento aparente del Sol.

La transmisión de las lentes de Fresnel de acrílico es del orden de 85%. Experiencias hechas con chapas de acrílico muestran ²⁶⁾ que la transmisión disminuye sólo en un 11% después de estar expuestas a la condición atmosférica de trabajo por 17 años. Para el factor de concentración se han publicado ^{27, 28)} valores entre 65 y 70. Para estos C_F y una temperatura a la salida del receptor de 260 C la eficiencia de conversión ²⁸⁾ de energía solar en térmica es de 34%.

i) *Concentradores paraboloïdes de revolución*

El sistema consiste en un conjunto de paraboloïdes de revolución, cada uno de los cuales concentra la radiación solar que incide sobre una superficie de varios metros cuadrados en una pequeña zona (foco de paraboloïde), donde se convierte en energía térmica (Fig. 9). Esta energía producida en forma distribuida es luego colectada y transmitida a un receptáculo central. Como para tener un foco nítido los rayos solares deben incidir en forma paralela al eje de simetría de cada paraboloïde, es necesario poder rotar a éstos según dos grados de libertad. El receptor tiene la forma de una cavidad.

Dado el elevado factor de concentración que se logra con estos concentradores (puede llegar a valores ³⁾ del orden de varios miles), es posible alcanzar temperaturas elevadas (900 a 1000 C) con buena eficiencia (60 - 70%). Para el caso discutido en la Ref. 18, la eficiencia total del sistema para acumular energía térmica en un receptáculo común (vapor a 430 C) es del 51%, valor que se obtiene considerando las pérdidas tanto en el colector (reflectividad del espejo, exactitud óptica, sombra entre espejos), cuanto en el receptor (reflexión de la radiación solar, pérdidas térmicas), así como también las pérdidas en la colección y el transporte de la energía

térmica. Considerando para el turbogenerador una eficiencia del 34%, la del sistema resulta ser 17%.

j) *Concentradores semiesféricos fijos*

Básicamente, cada concentrador semiesférico fijo, o de foco distribuido, está constituido ²⁹⁾ por una sección de esfera fija, con su eje de simetría inclinado en un ángulo que depende de la ubicación. Como puede verse en la Fig. 10 a, la región focal es distribuida y, dado el tamaño finito del Sol, tiene forma cónica, siendo el ángulo del cono igual al que subtiende el disco solar ($32'$). Todo rayo que incide en el concentrador, después de reflejarse una o dos veces, llega a la región del receptor comprendida entre R y $R/2$, donde R es el radio de la esfera (ver Fig. 10 a). Por razones prácticas (por ejemplo, imperfecciones del espejo) el cono se construye con un ángulo igual al doble del que subtiende el disco solar. El receptor cónico se mueve a lo largo del día de forma tal que su eje de simetría siempre se encuentre sobre la línea determinada por el centro de Sol y el centro de curvatura de la sección de esfera. La forma de la región focal es independiente de la hora del día a pesar de que a lo largo de éste se utilicen distintas secciones de la semiesfera; sin embargo, esto último produce una disminución de la concentración en algunas partes de dicha región focal, particularmente para las horas extremas del día. En la Fig. 10 b se muestra esquemáticamente el concentrador semiesférico fijo.

Para incidencia paralela al eje de simetría el factor de concentración varía ²⁹⁾ a lo largo de la región focal desde un valor máximo de 600, para una distancia al centro de la esfera de $0,53 R$, a un valor mínimo de 50, para una distancia de $0,9 R$, habiendo una serie de picos de concentración para distancias mayores que $0,92 R$.

El sistema propuesto en la Ref. 29 tiene un diámetro de 60 m formado por una sección de esfera de 120° . La temperatura de salida del fluido es de 480°C y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica, incluyendo las pérdidas de transporte de energía térmica hasta la turbina, de 31.3%.

k) *Sistema a receptor central con foco lineal*

Como mencionamos anteriormente, la idea básica del sistema de conversión centralizada es la de concentrar por medios ópticos en una zona relativa-

mente pequeña (pocos metros cuadrados) la energía solar incidente sobre una gran superficie de la Tierra ($1-2 \text{ km}^2$). En el caso del sistema a receptor central con foco lineal, esto se realiza ³⁰⁾ mediante un conjunto de filas de espejos cuyos ejes longitudinales de rotación están orientados en la dirección E-O; el receptor central lineal tiene la forma de cavidad cilíndrica y está soportado por una serie de torres (Fig. 11). En los casos estudiados el receptor está ubicado en la línea central del campo de espejos o en uno de los extremos (hacia el norte o hacia el sur según el hemisferio considerado). En este último caso el campo de espejos puede estar sobre una terraza inclinada con un espaciado parabólico de las filas de espejos. Para el sistema propuesto en la Ref. 30 el factor de concentración es del orden de 100, siendo la temperatura del vapor sobrecalentado producido de 480 C, a 99 atmósferas de presión.

1) Sistema a receptor central con foco puntual

En el sistema a receptor central con foco puntual, denominado también sistema de torre central, la concentración se realiza mediante un conjunto de espejos planos o curvos, convenientemente distribuidos, que reflejan la radiación solar hacia un receptor ubicado en la cúspide de una torre. La radiación así concentrada puede ser convertida en energía térmica en ese mismo lugar o retransmitida por medios ópticos a otro punto ubicado a nivel de tierra. Los espejos están montados sobre heliostatos. La torre, al igual que en el caso anterior, puede estar montada en el centro del campo de espejos o en uno de los extremos; en este último caso el campo de espejos puede, además, estar montado sobre una terraza inclinada. En la Fig. 12 se muestran dos esquemas del sistema descrito. El receptor-convertidor-caldera, ubicado en la cúspide de la torre, ha sido propuesto con forma de cavidad que tiene la propiedad de actuar casi como un cuerpo negro.

El sistema a torre central permite lograr factores de concentración elevados (varios miles), por lo cual se pueden alcanzar temperaturas altas con buena eficiencia. Para fijar las ideas, en la Ref. 32 se consigna un valor de 61% para la eficiencia de un sistema destinado a convertir la energía solar en vapor de agua a temperatura de 510 C y 80 atmósferas. Para el sistema de turbina, en esas condiciones, se tiene una eficiencia del 35%, con lo cual la eficiencia global de la central es de 21%.

4. Ciclos termodinámicos

Para el subsistema que denominamos convencional, se consideran ³⁾ tres posibles ciclos termodinámicos: Rankine, Brayton y Stirling.

El ciclo de Rankine es el más estudiado y se emplea normalmente en los sistemas convencionales en los que se produce un cambio de fase del fluido de trabajo (agua-vapor). Se han propuesto ³⁾ sistemas a 530 C y 69 atm. de presión. Como las centrales solares de potencia estarán ubicadas en regiones áridas, es conveniente utilizar ciclos térmicos con fluidos de trabajo gaseosos y enfriamiento por aire. La elevada temperatura de operación inherente a los ciclos térmicos a gases de Brayton y de Stirling y, por lo tanto, su mayor eficiencia sugieren que estos sistemas presentarán ventajas económicas al permitir menores áreas de colección. Se ha propuesto ³³⁾ un ciclo cerrado de helio, siendo la temperatura del fluido a la entrada de la turbina de 815 C con una presión de 34 atm., utilizándose una torre de enfriamiento seco. Igualmente se está estudiando ³³⁾ un ciclo abierto de aire a temperatura de 980-1065 C y 9 atm. de presión. El aire es expulsado directamente a la atmósfera no requiriendo torre de enfriamiento.

Estos sistemas de temperatura alta someten a una elevada exigencia a los materiales usados en el receptor. Además, la naturaleza intermitente de la radiación solar presenta problemas técnicos, en particular de materiales, dado que durante los 30 años de vida útil de una central el receptor está sometido a más de 10.000 ciclos debido a la variación día-noche y otro tanto debido al pasaje de nubes durante el día.

5. Transporte de energía

En los sistemas distribuidos, el transporte de energía desde cada una de las unidades colectoras de energía solar y convertidoras en energía térmica a un punto central se puede realizar de tres formas distintas. Para el caso en que se utiliza un solo sistema turbogenerador, se puede transportar directamente la energía térmica hasta este (transporte térmico) o emplear esta energía térmica para producir una reacción química (por ejemplo disociación de un gas), transportando los productos y recuperando la energía entregada mediante la recombinación de los mismos (transporte químico). En aquellos casos en los que se produce energía eléctrica en cada unidad, se transporta ésta hasta un punto

central desde donde se distribuye (transporte eléctrico). En cada caso hay que estudiar en conjunto todo el sistema para seleccionar la forma más conveniente de transporte.

6. Almacenaje de energía

Para proveer electricidad en las horas sin sol será necesario acumular energía en las horas con sol. Este requisito se mantiene aún en los casos en que se genere electricidad únicamente durante las horas del día, dado que existen lapsos variables durante los cuales el cielo se cubre de nubes. Desde el punto de vista económico es, sin embargo, discutible ³⁴⁾ si para compensar las horas sin insolación es más conveniente efectuar almacenaje de energía o usar una central convencional auxiliar.

Mencionaremos solamente los diferentes métodos propuestos en Ref. 34 para el almacenaje de energía, clasificándolos en dos grandes grupos:

- 1) Sistemas que pueden ser utilizados haciendo uso directo de la energía térmica:
 - (a) almacenaje de un fluido caliente en tanques aislados;
 - (b) agua caliente a presión en depósitos naturales;
 - (c) cambio de fase de sales eutécticas;
 - (d) cambio de fase de metales;
 - (e) cambio de fase de compuestos metálicos;
- 2) sistemas que antes del almacenaje requieren una transformación de la energía térmica en otra forma de energía:
 - (f) hidrógeno en hidruros;
 - (g) hidrógeno líquido;
 - (h) volantes;
 - (i) baterías (sales fundidas);
 - (j) imanes superconductores;
 - (k) aire comprimido;
 - (l) centrales de bombeo.

7. Algunas características técnicas y económicas globales

Si se desea efectuar una evaluación de los distintos sistemas descritos para realizar un estudio comparativo del costo del kW_eh en los bornes de salida de las centrales, se deberá analizar todos los sistemas usando el

mismo criterio. Hasta el presente los estudios han sido efectuados por separado por cada grupo que propone un sistema de generación de electricidad. The Aerospace Corporation¹⁸⁾ ha realizado un análisis comparativo, que si bien no está actualizado y no considera todos los casos antes presentados, da un panorama global del problema. Utilizaremos este estudio para dar idea en conjunto de las características técnicas y económicas de estos sistemas. Por otra parte, el Solar Energy Research Institute, los Battelle Pacific Northwest Laboratories y el Jet Propulsion Laboratory han iniciado³⁾ en paralelo un análisis comparativo de los sistemas de generación fototérmica para centrales de baja potencia, de 1 a 10 MW_e, por contrato del Departamento de Energía de los EE.UU. de N.A.

Para el análisis de las características técnicas de las centrales se deben tener en cuenta varios factores, a saber:

- (a) intensidad de la radiación solar en la ubicación de la central (valores promedios mensuales y anuales);
- (b) eficiencia total de la central (eficiencia del subsistema solar y del subsistema convencional);
- (c) potencia de la central;
- (d) modo de operación de la central (base, seguimiento de carga (o semibase o semipunta) y punta);
- (e) que la central sea únicamente solar (para lo cual requiere una cierta capacidad de almacenaje de energía cuyo tamaño depende del modo de operación) o trabaje en forma híbrida (durante las horas sin sol se use un sistema convencional para la producción de la energía térmica o directamente una central convencional).

El segundo punto es una característica que depende del sistema de colección y conversión que se considere. En función de él y de las condiciones impuestas en los demás puntos, queda determinada el área a cubrir para co-lectar la energía necesaria que satisface las mismas. Para que la central aporte energía eléctrica en las horas con y sin sol, dadas una eficiencia y una intensidad de radiación, se debe co-lectar y acumular energía en exceso durante las horas de sol, lo cual equivale a disponer de mayor área de co-lección. Además, cabe destacar que el área de terreno a ser utilizada es aproximadamente el doble de la cubierta por colectores, ya que es necesario dejar espacios libres entre éstos para evitar problemas de sombras y apantallamientos, así

como para caminos de circulación destinados a la ejecución de tareas de mantenimiento.

Como ejemplo ilustrativo consideramos ¹⁸⁾ una central a torre central de 100 MW_e de potencia, ubicada en una zona donde la intensidad promedio de la radiación solar es de 6 kWh/m² dfa o 250 W/m². La temperatura del fluido de trabajo a la entrada del turbogenerador es de 480 C, la eficiencia del subsistema solar, 53% y la del subsistema convencional, del 36%, lo cual da una eficiencia total del 19%. En el mismo trabajo ¹⁸⁾ se propone un sistema modular con un área de 0,5 km² cubierta con 15.400 espejos de 33 m² cada uno y una torre de 250 m de altura. En esas condiciones se requerirán tres módulos para operar la central en el modo de base (con doce horas de almacenaje), 2 módulos para operarla en el modo de seguimiento (con 6 horas de almacenaje) y 1 módulo para el modo de punta (con 0,5 h de almacenaje).

Si bien aún no hay suficiente comprobación experimental del comportamiento de las futuras centrales ("proof-of-concept") que permita realizar, sobre bases concretas, una estimación de los costos de las mismas, se ha realizado una serie de estimaciones que sirven como indicativas para determinar sobre qué componentes es necesario concretar los esfuerzos de reducción de costos. Vamos a dar algunos resultados ilustrativos que permiten ubicar económicamente los sistemas de conversión fototérmica dentro del contexto de sistemas convencionales de generación de electricidad.

Cabe destacar que en todas las consideraciones que siguen los costos han sido calculados usando como costos de los componentes de las centrales solares los que se estiman lograr mediante su producción masiva; se supone que esta etapa se alcanzará aproximadamente en 1990. Los cálculos fueron obtenidos para las primeras centrales a ser puestas en marcha; a medida que se avance por la curva de aprendizaje los costos de inversión disminuirán, pudiendo esperarse una reducción del 20% para la cuarta central. Los sistemas convencionales están basados sobre precios del carbón y el uranio vigentes en 1973-1974, estando todos los costos expresados en U\$S de los años 1972-1974, dado que así fueron calculados en los trabajos de los cuales se extrajo la información.

En la Tabla II damos la distribución porcentual de las inversiones totales requeridas para algunos de los sistemas de conversión distribuida y centralizada que hemos considerado. Es claro que la mayor inversión de capi-

tal se destina a los colectores. En los casos en que la conversión a energía térmica se hace en forma distribuida, la conducción de la misma hasta un receptáculo cercano a los turbogeneradores requiere también una gran inversión de capital, así como, en el caso centralizado, la torre.

En la Tabla III se comparan las inversiones de capital inicial requeridas para un tipo de central solar (a receptor central, pura e híbrida) con las requeridas para centrales convencionales. Como es evidente, las centrales solares presentan el inconveniente de una mayor inversión inicial de capital si bien ulteriormente no hay inversión en combustible.

En cuanto al costo del kW_eh en los bornes de salida de las centrales solares sólo señalaremos que, en términos generales, todas las estimaciones realizadas para diferentes potencias de las centrales y distintos modos de su operación, indican ¹⁾ que para 1990 dicho costo sería del mismo orden de magnitud que el correspondiente al kW_eh producido por centrales convencionales. Como ya dijimos, todos estos cálculos están basados sobre costos de colectores y sistemas de almacenaje que sólo se obtendrán mediante producción masiva de sus componentes.

8. Antecedentes y programas a nivel mundial

De acuerdo con nuestra información, el primer sistema especialmente concebido para la conversión de energía solar en térmica a fin de generar electricidad fue el construido por el Prof. Francia, que funciona⁹⁾ desde 1968 en St. Ilario-Nervi, Génova, Italia. Es un sistema de torre central, formado por 120 espejos de ~ 60 cm de diámetro cada uno, cubriendo una superficie de $\sim 35 \text{ m}^2$. La caldera original, en forma de cavidad, estaba a 3 m de altura sobre el campo de espejos y el sistema producía vapor a 600 C y 150 atm, con una potencia de 160 kW_t ; recientemente ha sido modernizado mediante la instalación de una nueva caldera, también diseñada por el Prof. Francia. En 1975, cerca de Hiroshima, Japón, fue instalado³⁶⁾ un sistema similar con una potencia térmica de 10 kW_t y recientemente uno de 40 kW_t . A fines de 1977 se completó la instalación³⁸⁾ de una planta de generación de vapor, similar a la del Prof. Francia, en el Georgia Institute of Technology, Georgia, EE.UU. de N.A., con una potencia de 400 kW_t . El campo de espejos está formado por 550 elementos de 110 cm de diámetro cada uno; el factor de concentración es de 2200, produciendo 317 kg/h de vapor a 600 C y 150 atm de presión. La torre tiene 25 m de altura

En Francia³⁷⁾, durante 1977, se adicionó un receptor en forma de cavidad al horno solar que desde 1970 está funcionado en Odeillo, en los Pirineos, cerca del límite de ese país con España. El sistema, haciendo uso de un circuito primario de aceite, permite generar una potencia eléctrica de 64 kW_e utilizando un ciclo agua-vapor en un circuito secundario de trabajo. El sistema está conectado a la red y si bien no representa una contribución que aporte información económica a la tecnología de centrales solares, provee la primera experiencia operativa con un sistema completo de este tipo.

Con la puesta en operación³⁹⁾ durante 1979 de la central piloto de 150 kW_e en EinBokek, Israel, sobre el Mar Muerto, quedó demostrado la factibilidad del sistema de pozas solares para la generación de electricidad. El área de la poza es de 7.500 m².

Con el fin de proveer energía eléctrica para sistemas de bombeo de agua han sido instaladas varias unidades en el mundo, de las cuales podemos citar:

(1) La compañía francesa Sofretes⁴⁰⁾ ha instalado, usando colectores planos, varias centrales de las cuales sólo mencionaremos las de mayor potencia. En el año 1975 se instaló en San Luis de Potosí, Estado de Guanajuato, México, una central de 25 kW_e con un campo de colectores de 1.500 m². En 1978 un sistema similar fue instalado en Dire, Mali, con una potencia de 75 kW_e y un área de colectores de 3.200 m². Asimismo, en 1979, fue instalado en Bakel, Senegal, un sistema de bombeo con una potencia de 32 kW_e y un área de colectores de 1.879 m².

(2) En 1977 se instaló⁴¹⁾ en Gila Bend, Arizona, EE.UU. de N.A. una unidad de 36 kW_e con un campo de colectores cilíndricos-parabólicos que cubren un área de 550 m². Los concentradores fueron construidos por la firma Hexcel.

(3) Recientemente⁴²⁾ se ha instalado en Coolidge, Arizona, EE.UU. de N.A., una unidad de 150 kW_e con concentradores cilíndricos-parabólicos. Los mismos, construidos por la compañía Acurex Corporation, cubren un área de 2.137 m².

Para la conversión térmica de la energía solar en electricidad, los programas y proyectos a nivel mundial sobre los que tenemos información son los siguientes:

(1) En EE.UU. de N.A. se están desarrollando dos programas. El primero se refiere a sistemas pequeños, y contiene: a) Sistemas de energía total⁴³⁾, proyecto en el cual se estudian conjuntos capaces de generar energía térmica a baja y alta temperatura para proveer tanto agua caliente y calefacción cuanto energía mecánica y eléctrica. Este programa se desarrolla en el Sandia Laboratory, Albur-

querque, New Mexico, donde se analizan varios de los sistemas distribuidos mencionados en la Sección 3; b) Sistemas de Baja Potencia, cuyo objetivo es fomentar y desarrollar la comercialización de centrales fototérmicas en el intervalo de potencia de 1 a 10 MW_e. El Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, tiene la responsabilidad del manejo técnico y de los desarrollos de este último programa. Para identificar las mejores opciones se realizó un estudio comparativo³⁾ entre todos los sistemas descritos en la Sección 3. El segundo se refiere a centrales de alta potencia y está focalizado en el sistema a torre central.

Se ha decidido la construcción de una central de 10 MW_e en Barstow, California, cuya entrada en operación está prevista para 1981. El costo estimado del programa es de 120 millones de dólares. Para la prueba de las componentes de dicha central se ha construido^{4,3)} en Albuquerque, New Mexico, una Planta de Ensayos con una potencia de 5 MW_t. Está constituida por 222 heliostatos de 37 m² cada uno, formados por 25 espejos de 1,2 m x 1,2 m, diseñados por la Martin-Marietta Co.. La torre tiene 60 m de altura; en el tope de la misma irá el receptor, existiendo la posibilidad de probar receptores en otros tres lugares de la torre.

(2) En Targasone, Pirineos franceses, será montado³⁷⁾ un prototipo a torre central (proyecto THEMIS) de 2 MW_e de potencia. Los heliostatos han sido diseñados y construidos por la compañía francesa CETHEL.

(3) La Comisión Atómica Francesa está desarrollando una central de 100 kW_e a ser instalada en Córcega, usando concentradores fijos a espejo facetado. Cada módulo tiene un área de 72 m². El área total es de 1.200 m². La temperatura del fluido de trabajo es de 250 C y la eficiencia total del 13 %.

(4) La compañía italiana Ansaldo está construyendo⁴⁵⁾ en Australia una central de 35 kW_e con concentradores cilíndricos-parabólicos de dos grados de movimiento. El sistema está formado por 10 colectores de 46,8 m² cada uno.

(5) Con el patrocinio de la Comunidad Económica Europea se está desarrollando³⁷⁾ un programa en conjunto con la participación de Francia (CETHEL), la República Federal Alemana (MBB) e Italia (CENEL y ANSALDO) para construir en Adrano, Sicilia, Italia, un sistema a torre central de 1 MW_e de potencia. Se proyecta⁴⁵⁾ que la central entre en operación a fines de 1980.

(6) El programa japonés^{36,37)} para sistemas de conversión térmica incluye una planta de 1 MW_e, la cual deberá estar en operación durante 1980. Para su emplazamiento se ha seleccionado una pequeña isla cercana a la costa sudeste de Honshu. Están en estudio dos posibles diseños, uno de torre central realizado

por las Mitsubishi Heavy Industries y otro que consiste en un sistema híbrido formado por un concentrador cilíndrico parabólico fijo y un heliostato plano móvil desarrollado por los Hitachi Research Laboratories.

(7) La Agencia Internacional de Energía tiene en marcha un proyecto de "Sistemas Fototérmicos de Baja Potencia". En él están involucrados Austria, Bélgica, EE.UU. de N.A., España, Grecia, Italia, Reino Unido, República Federal Alemana, Suecia y Suiza. Hay acuerdo general sobre que la central debe ser de aproximadamente 500 kW_e de potencia y que se deben estudiar tanto los sistemas distribuidos cuanto los centralizados. Una idea preliminar es diseñar y construir una central optimizada del tipo distribuido y una del tipo centralizado a fin de comparar en las mismas condiciones las características de funcionamiento de ambas. Las centrales serán erigidas en Almería, España.

(8) La participación de especialistas españoles en el proyecto de la AIE ha llevado al Gobierno Español a iniciar³⁶⁾ un proyecto de diseño conceptual con miras a la construcción de un sistema de torre central de 1,5 MW_e en el sur de España.

(9) La Compañía Ormat de Israel está desarrollando un programa de una central de 5 MW_e con pozas solares, el cual tiene a 1981 como fecha programada de entrada en operación. El mismo será el primer módulo de un sistema que se proyecta para aprovechar toda la capacidad del Mar Muerto, con el cual se podría producir hasta 2.000 MW_e.

(10) En Shenandoah, Georgia, EE.UU. de N.A., se está instalando un sistema de energía total para una fábrica textil. El campo de colectores está formado por 192 concentradores parabólicos de revolución, de 7 m de diámetro cada uno, diseñados y construidos por la General Electric. El sistema provee 400 kW_e (el 33 % de la energía eléctrica que necesita la planta) así como el 60 % del vapor requerido y el 89 % de la energía para aire acondicionado. La fecha estimada de entrada en operación es 1982.

(11) De acuerdo con la Ref. 37, la Unión Soviética está trabajando en el diseño de una central de potencia de 1 MW_t que puede ser usada para proveer energía térmica para diversas aplicaciones, incluyendo la producción de electricidad o una combinación de energía térmica y eléctrica. Se ha propuesto que el sistema experimental sea construido en la península de Crimea.

Según informaciones periodísticas la energía solar va a ser ampliamente usada en las Repúblicas del Asia Central. Se está trabajando⁴⁶⁾ en la prime-

ra central solar de potencia de la República de Kazakhstan, la cual se espera que tenga una potencia del orden de 2 MW_e . Asimismo, en Bukhara, República de Uzbek, estaría en construcción⁴⁷⁾ una central que se espera entre en operación en 1981.

9. Programas en desarrollo en la República Argentina

(1) La División Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica está ejecutando un programa de desarrollo e investigación para la conversión de energía solar en mecánica y eléctrica mediante el uso de concentradores. El mismo está dividido en tres etapas.

La primera que abarca hasta fines de 1982, tiene como objetivo la producción industrial de sistemas de generación de electricidad en el rango de potencias de 10 a 100 kW_e . Estos sistemas tienen aplicación en toda región a la cual no llega la red de distribución normal y los costos de generación por métodos alternativos superen a los de la generación solar-eléctrica (establecimientos agropecuarios, industrias, pueblos, etc, en emplazamientos seleccionados). Asimismo, tienen aplicaciones adicionales como ser en industrias con requerimiento de vapor, en instalaciones de refrigeración para la conservación de alimentos u otros productos, en explotaciones agropecuarias necesitadas de sistemas de extracción de agua (para consumo o riego) y en viviendas o edificios comerciales en los que se requieran refrigeración.

Las etapas segunda y tercera están programadas para que en la última década del siglo exista en el país suficiente experiencia para construir centrales con potencias en el orden de los 100 MW_e . La segunda etapa (1983-1986) incluye la construcción de una planta piloto de demostración de 1 MW_e y la tercera (1986-1990) la construcción de una planta piloto de potencia a determinar.

El programa fue iniciado en 1975 con un estudio de evaluación destinado¹⁾ a determinar el estado de desarrollo de la tecnología de conversión de energía solar en electricidad a nivel mundial tanto por conversión fototérmica cuanto fotovoltaica. Sobre la base de sus conclusiones fue decidida la iniciación del programa de conversión fototérmica antes mencionado, seleccionándose para la primera etapa, de entre los diferentes sistemas distribuidos, el basado en concentradores fijos a espejo facetado (CFEF) propuesto por J.L.Russell¹⁹⁾. Partiendo del análisis teórico del funcionamiento del CFEF, simulando su comportamiento con computadora mediante metodología desarrollada²⁰⁾ en la CNEA, fue

diseñado un prototipo de laboratorio y construidos⁴⁸⁾ dos módulos que difieren en el tipo de vidrio utilizado en sus espejos. Cada módulo está compuesto por dos secciones de 1,18 m de largo con un radio de 1 m, siendo el ancho de cada espejo de 2 cm. Es posible variar el ángulo de abertura entre 60 y 150°. El conjunto puede girar sobre su eje de simetría y también variar el ángulo de inclinación de dicho eje. El sistema trabaja con un circuito cerrado de extracción de la energía térmica generada en el receptor, el cual incluye un intercambiador de calor, empleando aceite Therminol 66 de Monsanto como fluido de trabajo, estable hasta 370 C a presión atmosférica. Recientemente han comenzado a trabajar en el diseño de un "prototipo industrial", de 50 a 100 m² de área espejada, para lo cual han realizado un estudio teórico⁴⁹⁾ sobre la influencia del error en la posición del plano receptor, sobre los efectos de agregar en el receptor un segundo concentrador y sobre posibles variantes en la ubicación relativa de los espejos. Por otra parte, han entrado en contacto con diversas industrias del país para el análisis de las distintas variantes de construcción del mismo.

Simultáneamente con la construcción del "prototipo de laboratorio" la División de Energía Solar de la CNEA ha realizado²¹⁾ el estudio teórico de una modificación al CFEF en la que se reemplazan los elementos especulares planos por curvos, con lo cual se logra un incremento del factor de concentración de 1,5. Además, realizaron²⁵⁾ el análisis teórico de un concentrador formado por espejos cilíndricos cóncavos cuyos ejes de rotación están dispuestos sobre un cilindro de referencia fijo. Asimismo, desarrollaron un análisis óptico bidimensional⁵⁰⁾ generalizado de concentradores con simetría cilíndrica, válido para cualquier ángulo de incidencia de los rayos solares. Extendieron el mismo al caso de concentradores no perfectos⁵¹⁾ teniendo en cuenta apartamientos de la orientación de las superficies especulares respecto del caso ideal, aplicando el cálculo a cinco tipos de concentradores, a saber: cilíndrico-parabólico; fijo a espejo facetado; con espejos planos y cóncavos, a espejos cóncavos giratorios sobre soporte plano y curvo.

(2) El Departamento de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta, junto con el Instituto de Matemática y Física de la Universidad Nacional de Jujuy y la Compañía Nueva Pompeya, ha realizado un estudio⁵²⁾ general del potencial de generación de energía eléctrica mediante el uso de pozas solares en la Argentina. A través del mismo, han identificado dos regiones de interés potencial: las zonas de la cordillera y precordillera del

noroeste argentino que poseen lagunas y la zona que, comenzando en Mar Chiquita, Córdoba, se extiende hacia el norte por Santiago del Estero. Han escogido la cuenca de la laguna de Guayatayoc en la provincia de Jujuy para realizar la primera evaluación en detalle. Los aspectos favorables de esta laguna son: alta insolación, existencia de cantidades suficientes de sal en la zona (las "Salinas Grandes", a 20 km de la laguna), cercanía de centros poblados (Abra Pampa a 70 km, unido con la red eléctrica de la Quebrada de Humahuaca). Con un espejo de agua de 100 km² se tiene una capacidad de generación de base de aproximadamente 600 MW_e. Actualmente se está estudiando la disponibilidad de agua a largo plazo, pues el régimen es variable, dependiendo fuertemente de las precipitaciones en la cuenca.

Cabe destacar que el Grupo de Energía Solar de la Universidad de Salta ha adquirido considerable experiencia en pozas solares a través de estudios⁵³) realizados a lo largo de varios años con un prototipo de laboratorio de 16 m² de superficie; actualmente están implementando, junto con la Compañía Nueva Pompeya, una poza de 400 m² para ser usada en el proceso industrial⁵⁴) de producción de sulfato de sodio.

(3) En relación al desarrollo de concentradores, si bien para otros usos, se puede mencionar los siguientes proyectos:

- (a) El Centro de Investigaciones y Asistencia Técnica de Mendoza ha construido un concentrador fijo a espejo facetado de 1 m de radio y 10 m de largo, siendo el ancho de cada espejo de 3 cm y la abertura de 120°. Ha sido pensado fundamentalmente para accionar una bomba también en desarrollo en dicho centro.
- (b) El grupo de la Universidad de San Luis ha estado trabajando en concentradores parabólicos compuestos, con la finalidad de desarrollar un colector solar adecuado para climatizar viviendas unifamiliares.
- (c) El Instituto de Energía Mecánica y el Departamento de Ciencias Exactas de la Universidad de San Juan han construido dos modelos de concentradores parabólicos compuestos con el objeto de ser usados en la generación de energía mecánica.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Walter Scheuer y al Licenciado Julio César Durán el haber leído el manuscrito con espíritu crítico, contribuyendo a clarificar su contenido.

Tabla I

Sistemas de colección y conversión de energía solar en térmica

Tipo de conversión	Sistema de movimiento	Tipo de colector
Distribuida	Fijo o de ajuste estacional	- Poza solar - Estanque solar playo - Colector plano - Concentrador fijo; zona de concentración lineal
	Movimiento alrededor de un eje	- Concentrador cilíndrico parabólico; foco lineal (se mueve el concentrador junto con el receptor o alrededor del mismo) - Concentrador fijo a espejo facetado; foco lineal (concentrador fijo; receptor móvil). - Concentrador de múltiples espejos cóncavos giratorios; foco lineal (conjunto de espejos móviles; receptor fijo) - Lente de Fresnel; foco lineal (se mueve la lente junto con el receptor o alrededor del mismo)
	Movimiento alrededor de dos ejes	- Concentrador paraboloide de revolución; foco puntual (se mueven el concentrador y el receptor solidariamente) - Concentrador fijo semiesférico; foco distribuido (concentrador fijo; receptor móvil)
	Movimiento alrededor de un eje	- Sistema receptor central; foco lineal (conjunto de espejos móviles; receptor fijo)
Centralizada	Movimiento alrededor de dos ejes	- Sistema receptor central o torre central; foco puntual (conjunto de espejos móviles; receptor fijo)

Tabla II

Distribución porcentual del costo de las partes constitutivas de distintos sistemas de conversión solar a)

Partes constitutivas	Costos % del total		
	Cilíndrico-parabólico N-S	Parab. revol.	Torre central
Terreno	0,2	0,2	0,3
Edificio, construcción medios de transporte	3,8	3,9	6,7
Colector, espejos, heliostatos	57	56	45,2
Torre, receptor, intercambiador de calor, transporte de energía	20	20	15
Almacenaje	9,3	10	14
Turbina y anexos	6,2	6,4	12
Generadores y anexos	1,6	1,6	3,2
Equipos varios	0,3	0,3	0,6
Torre de enfriamiento	1,6	1,6	3,0

a) Centrales de 100 MW_e de potencia operando en el modo de seguimiento de carga. De Ref. 18.

Tabla III

a)

Estimaciones de inversiones iniciales para distintos tipos de centrales

Tipo de central (Potencia MW _e)		Modo de operación	Inversión inicial (U\$S/kW _e)
Solar Receptor central (100)	Pura	Base	1825
		Seguimiento	1360
		Punta	950
	Híbrida	Seguimiento	1129
Nuclear PWR (1000)		Base	744
Carbón (1000)		Base	614
Ciclo combinado (400)		Seguimiento	342
Turbina a gas (100)		Punta	219

a) Costo total al año de iniciación de operación comercial de la central (dólares de 1990). Datos de Ref. 18.

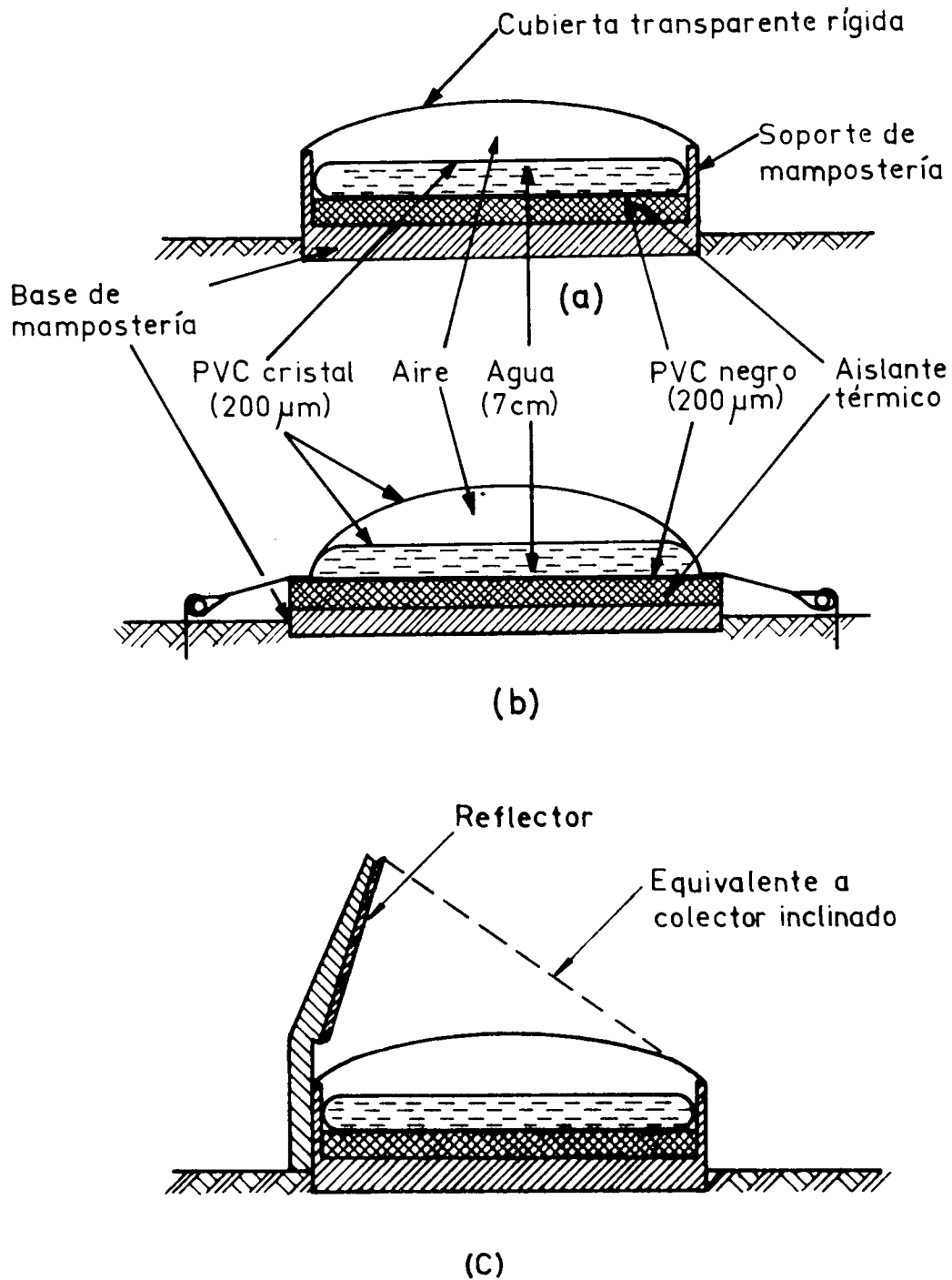


Fig. 1: Modelos de estanques solares playos: (a) y (b) con cubierta transparente rígida y flexible respectivamente (de Ref. 4); (c) reflector orientado E-0, mirando al norte en la Rep. Argentina, el cual simula una inclinación del colector. De Ref. 5.

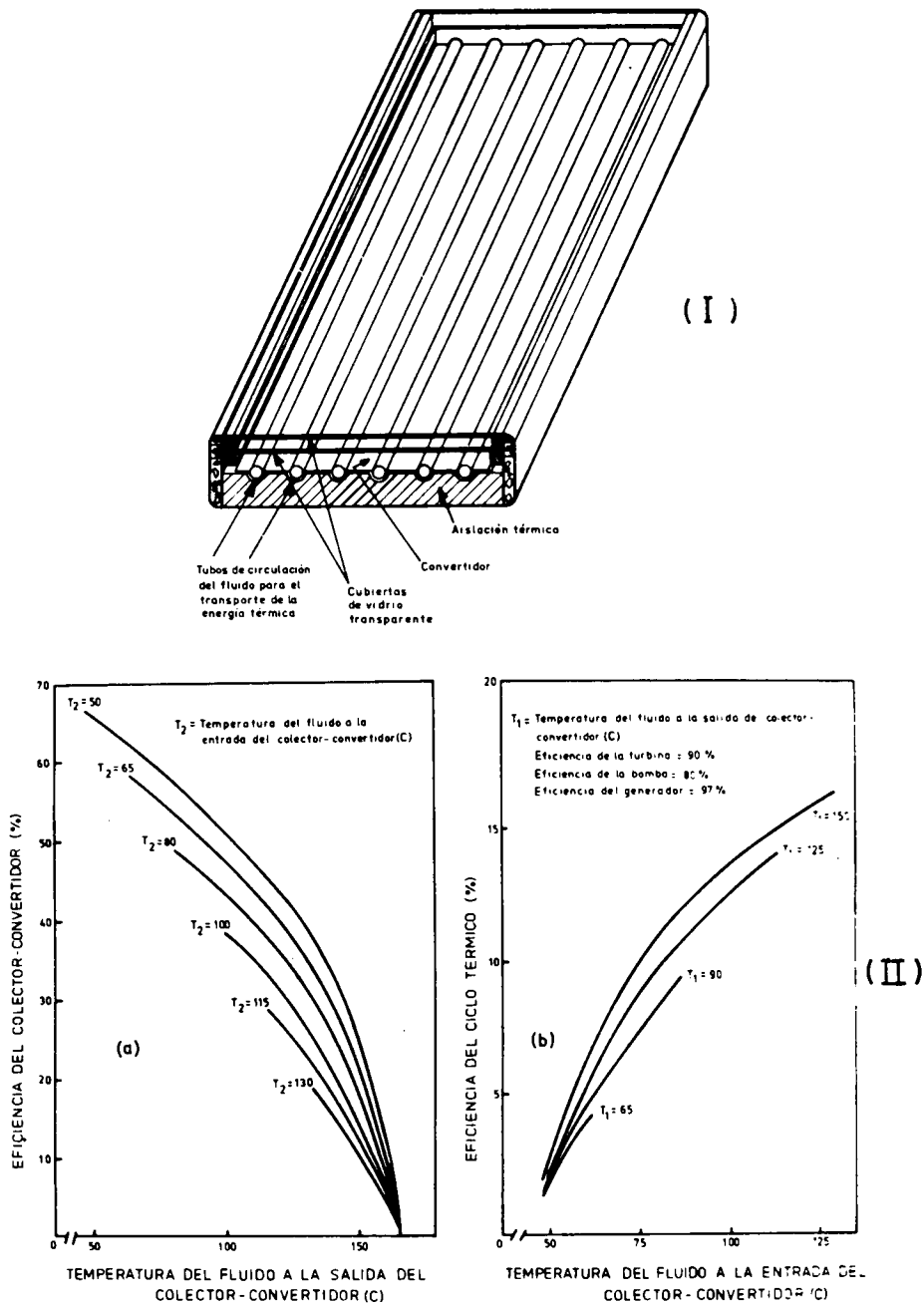


Fig. 2: I) Colector plano. El tipo de contacto entre la superficie convertidora y los tubos por los que circula el fluido para la colección y transporte de la energía térmica puede ser muy variado.

II) Eficiencia de un sistema con colector plano;

(a) eficiencia térmica de los colectores en función de la temperatura del fluido a la salida de los mismos, para varios valores de la temperatura de entrada,

(b) eficiencia del ciclo térmico, usando fluor 11 como fluido de trabajo de la turbina, en función de la temperatura del fluido que transporta la energía térmica a la entrada del colector, para varios valores de temperatura de salida del mismo. De Ref. 7.

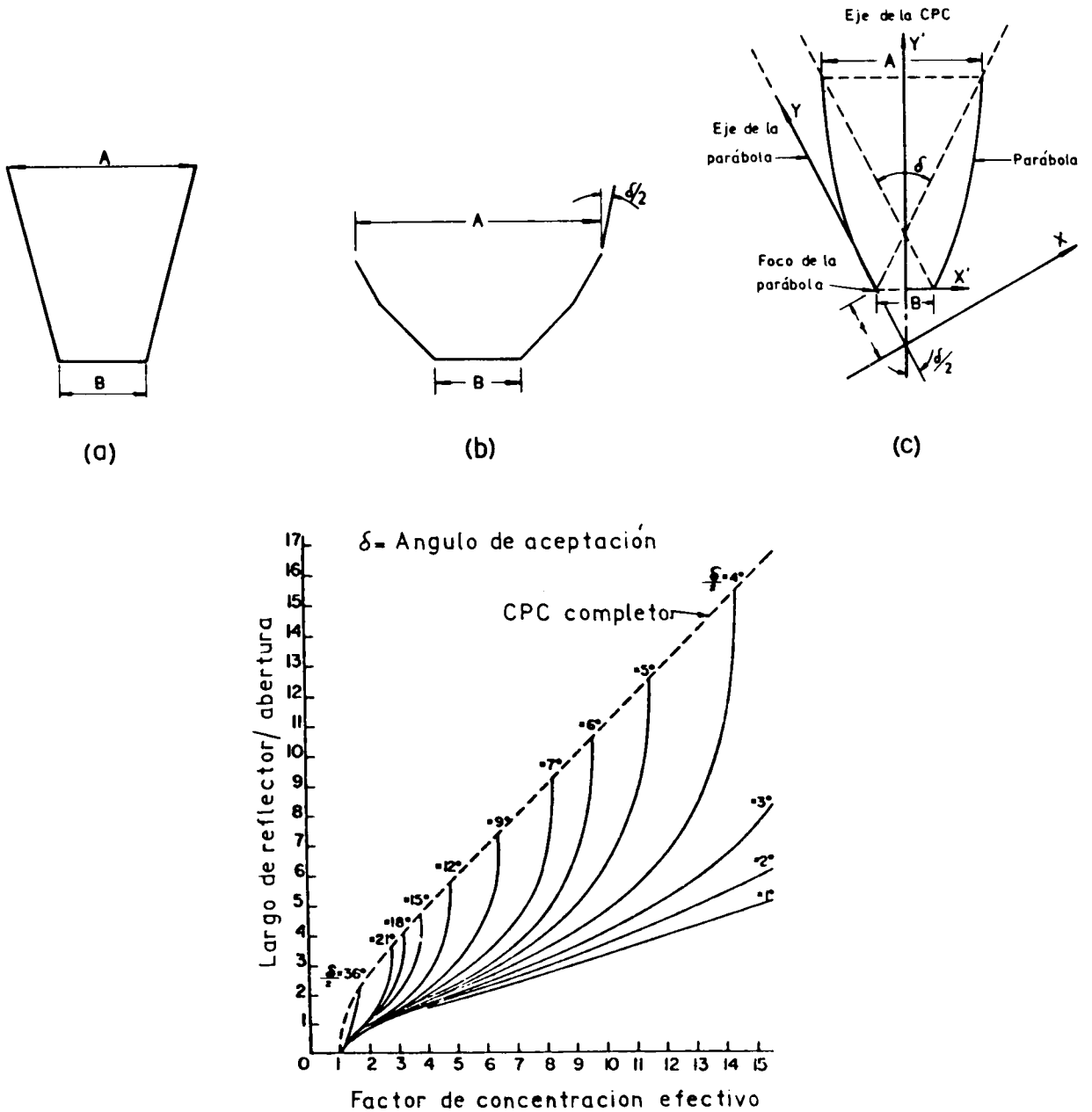


Fig. 3: Parte superior. Perfiles de concentradores fijos: (a) en forma de V; (b) plano con dos facetas; (c) concentrador parabólico compuesto; A es la abertura del concentrador, B el ancho del receptor y δ el ángulo de aceptación. De Ref. 13.

Parte inferior. Factor de concentración efectivo del concentrador parabólico compuesto en función de la relación entre el largo de los reflectores y la abertura, para diferentes valores de $\delta/2$. De Ref. 13.

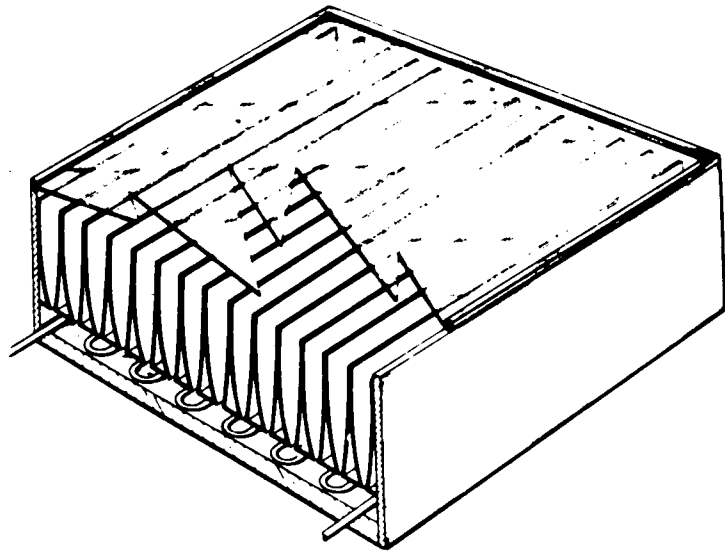


Fig. 4: Conjunto de concentradores parabólicos compuestos o concentradores Winston. De Ref. 12.

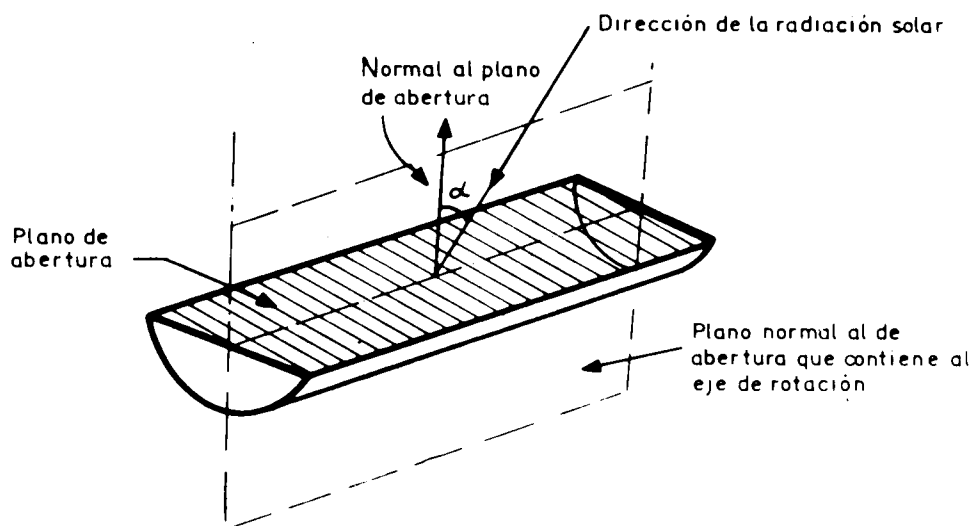
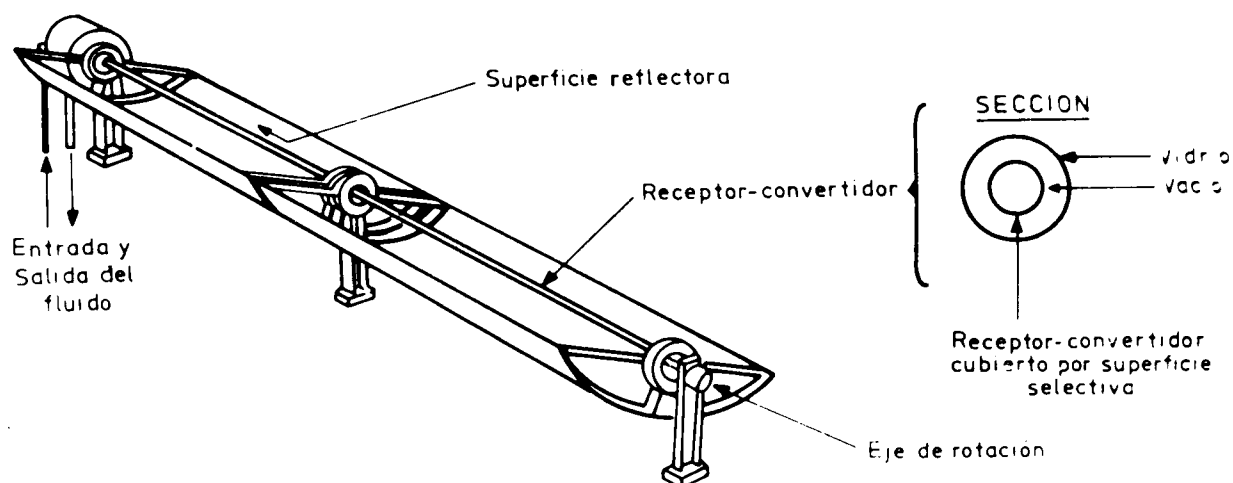


Fig. 5: Sistema con concentrador cilíndrico-parabólico. A fin de tener un foco nítido, los rayos incidentes deben estar contenidos en planos paralelos al plano normal al de abertura que contiene al eje de rotación. De Ref. 15.

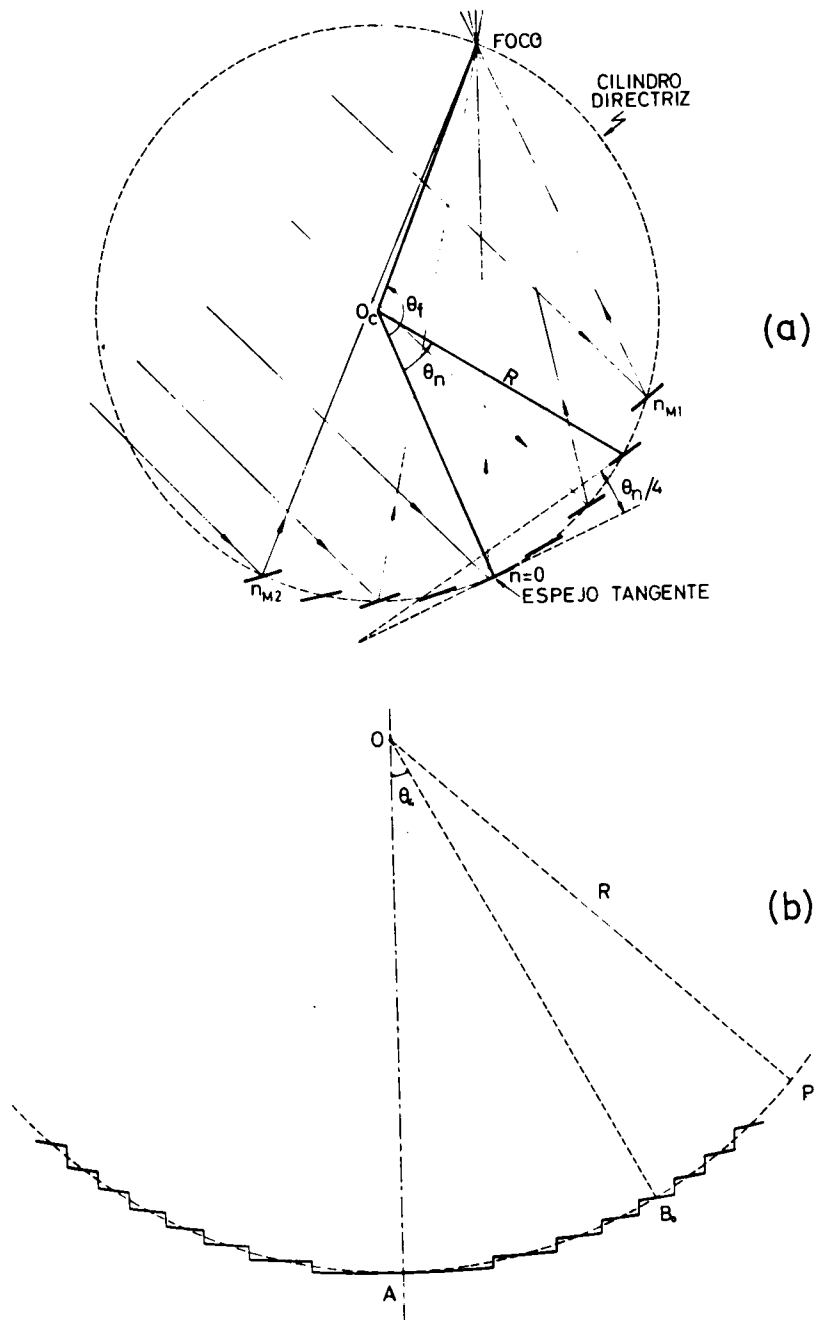


Fig. 6: (a) Concentrador fijo a espejo facetado, formado por elementos planos. De Ref. 20.

(b) Concentrador fijo a espejo facetado formado por elementos cilíndricos. De Ref. 21.

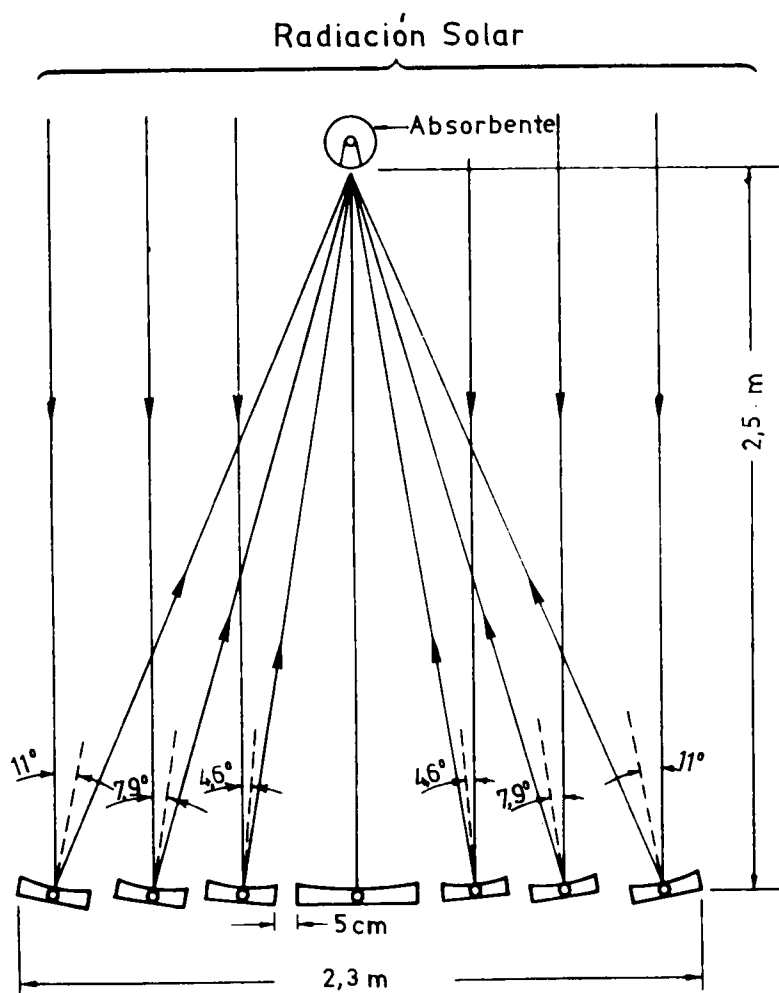


Fig. 7: Concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios. Todos los espejos tienen sus ejes de giro en un plano. En la figura se indica, para incidencia normal, la inclinación de cada espejo para tener un foco nítido. Al girar todos los espejos con la misma velocidad angular para seguir el movimiento aparente del Sol, se mantiene el foco nítido fijo. De Ref. 24.

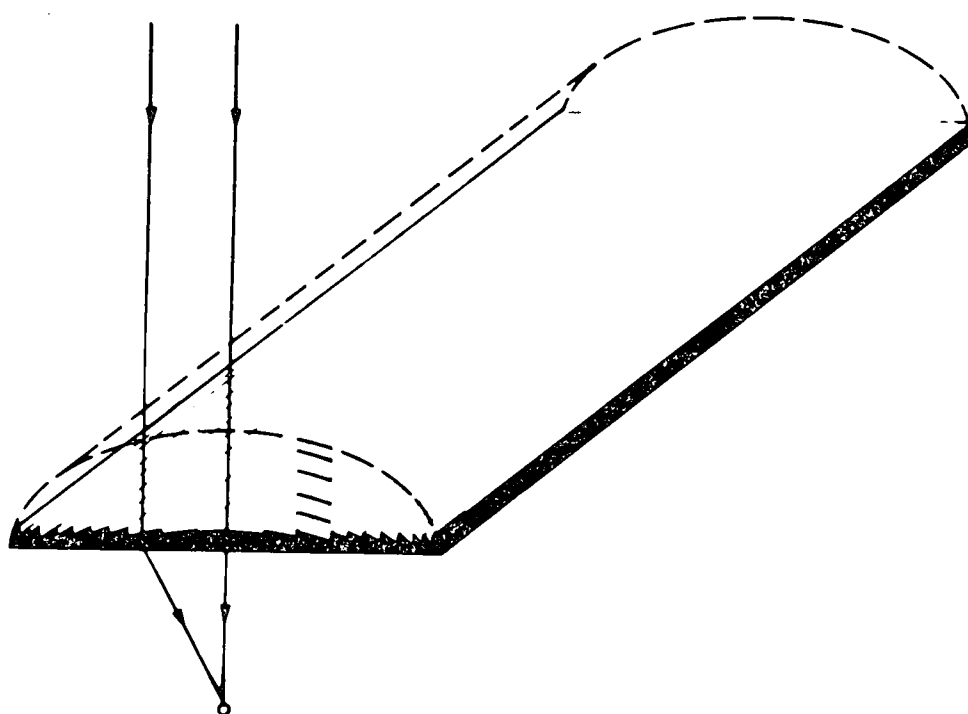


Fig. 8: Esquema de lente de Fresnel con foco lineal.

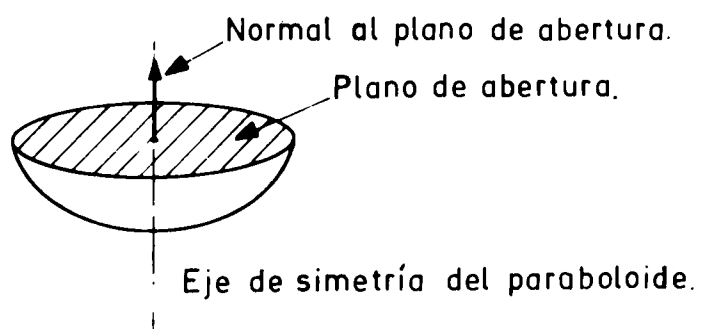
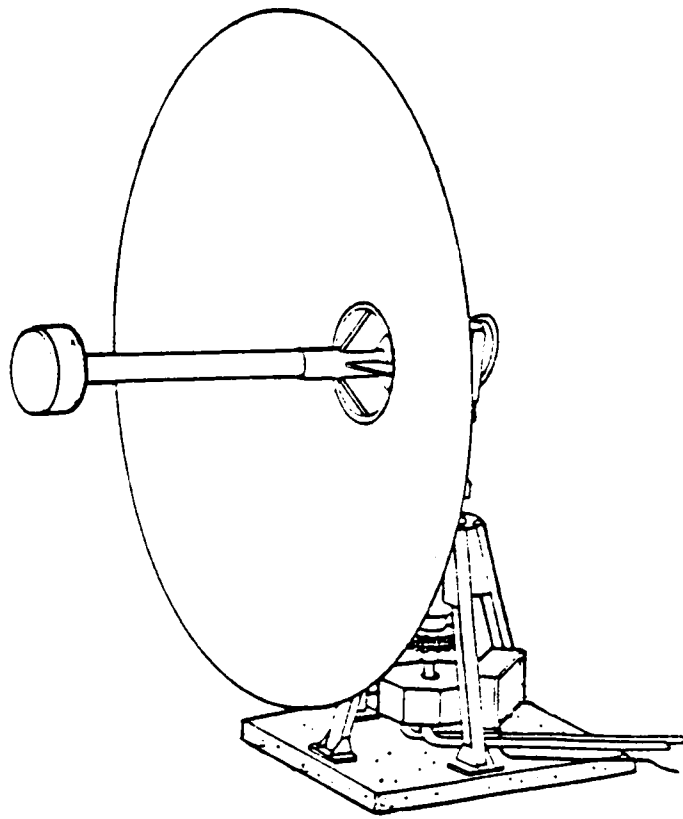


Fig. 9: Esquema de un concentrador paraboloide de revolución. El receptor tiene la forma de una cavidad. De Ref. 3.

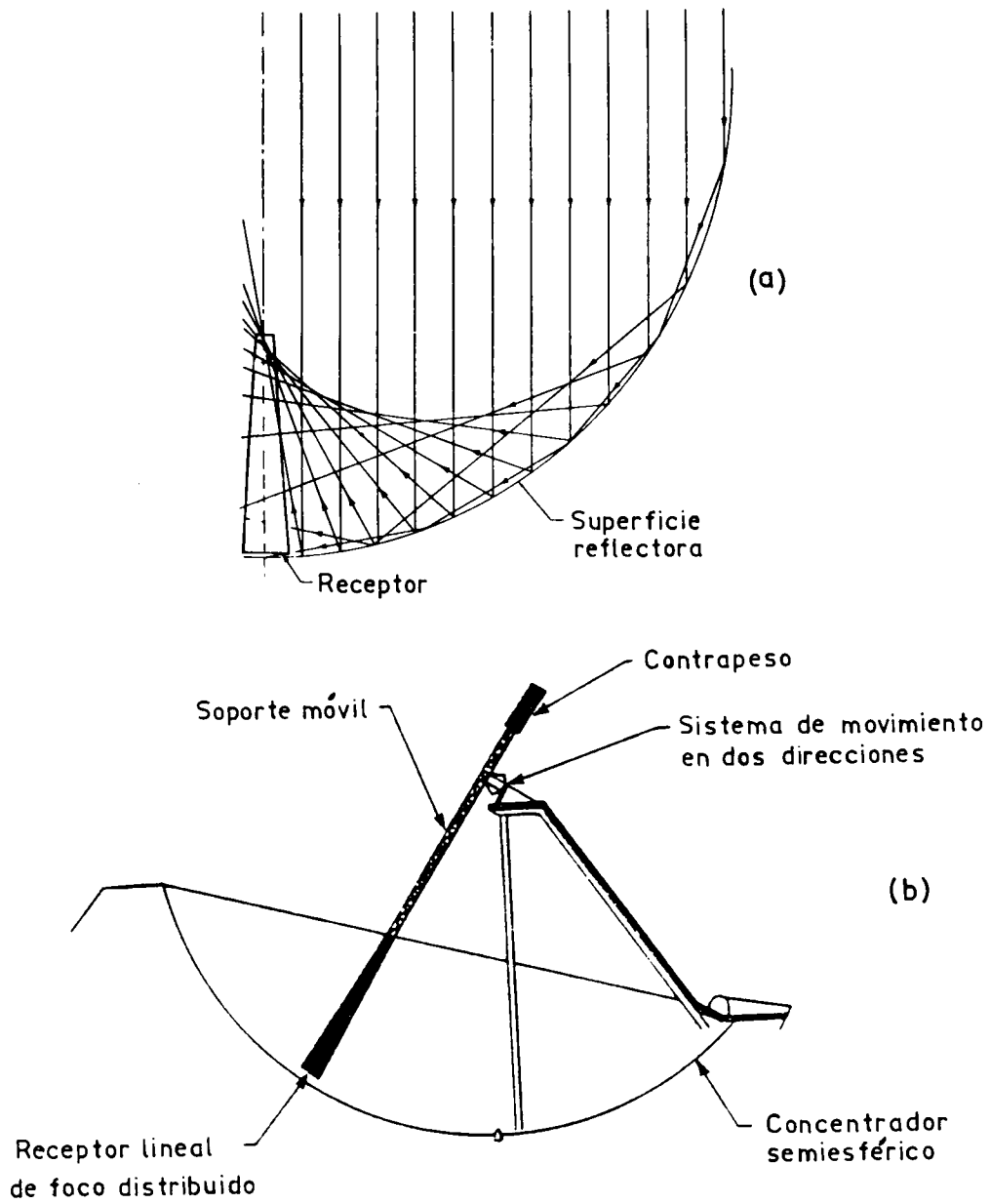


Fig. 10: Concentrador fijo semiesférico.

(a) Distribución focal. De Ref. 29.

(b) Representación esquemática. De Ref. 3.

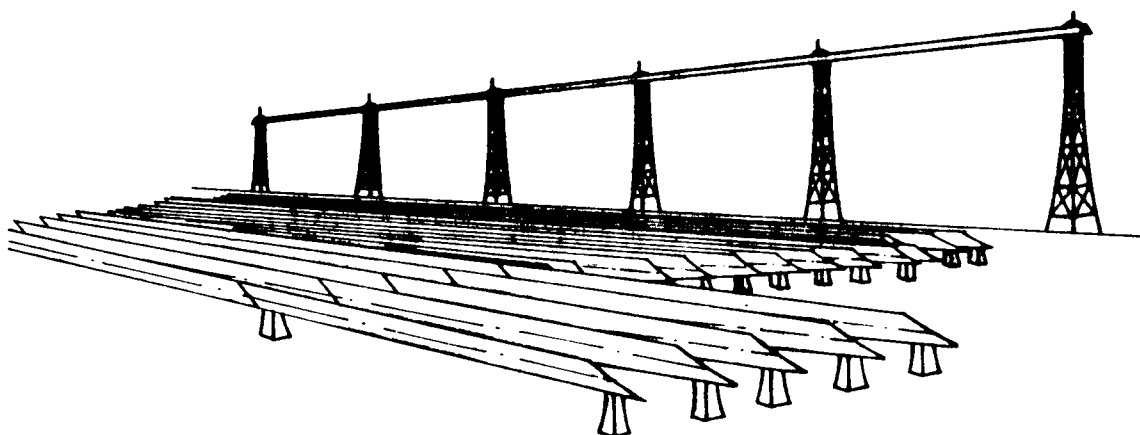


Fig. 11: Sistema a receptor central con foco lineal, con receptor en un extremo del campo de espejos. El receptor y las filas de espejos están orientados de E-0. De Ref. 30.

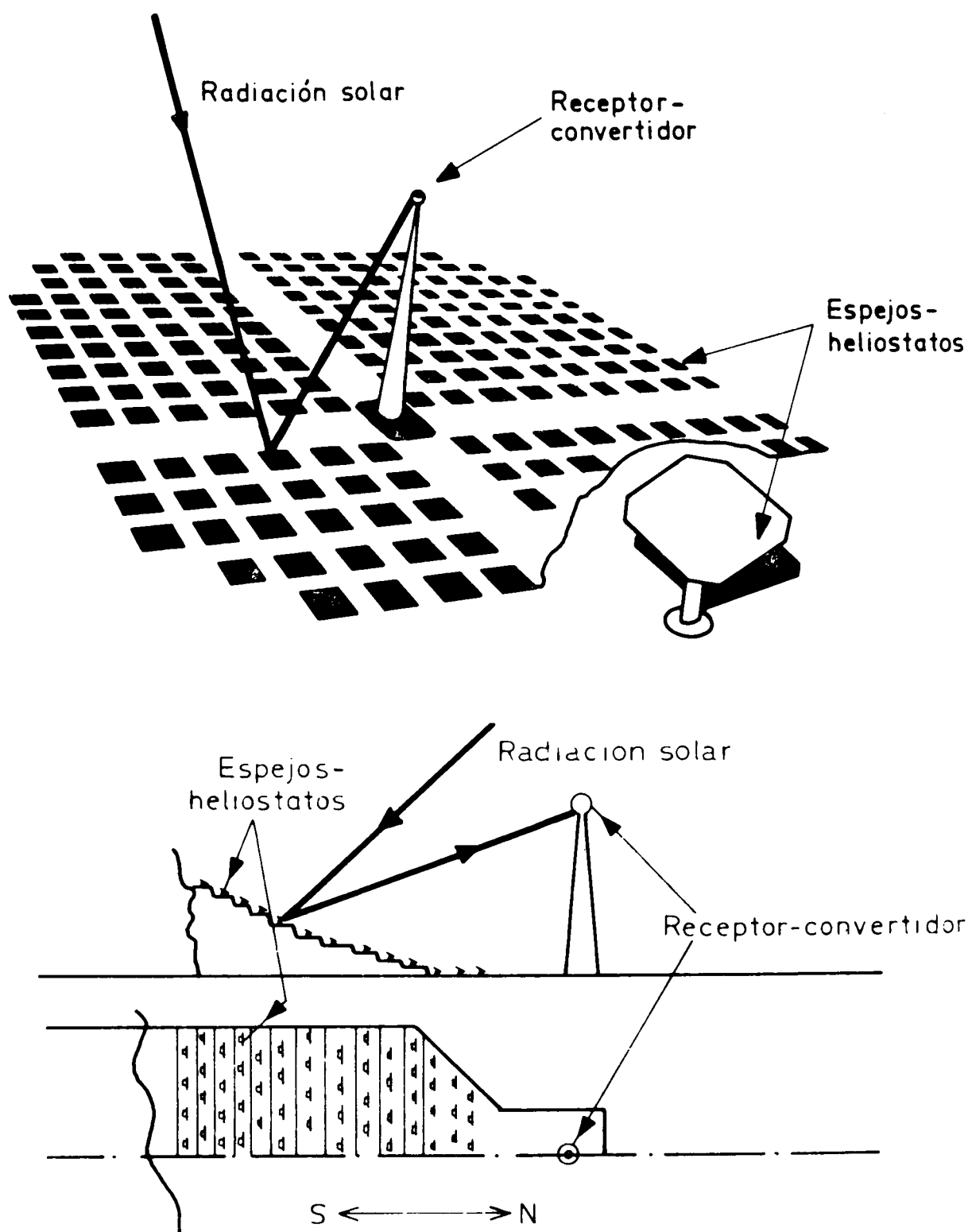


Fig. 12: Esquemas de dos sistemas a torre central. En la figura superior se muestra una distribución simétrica de espejos respecto de la torre, ubicados todos en un mismo plano. En la figura inferior la planta y el corte corresponden a un campo de espejos en una terraza inclinada, con la torre en un extremo y con la orientación correspondiente a la Argentina. De Refs. 18 y 31.

REFERENCIAS

Convención

"Conferencia Georgia": trabajo presentado a la "ERDA Conference on Concentrating Solar Collectors", Atlanta, Georgia (1977)

- - - - -

- 1) J.A.Moragues y W.Scheuer, "Conversión de energía solar en electricidad. Estudio de evaluación". Informe CNEA-NT 23/77 de la Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina (1977).
- 2) H.Tabor, Solar Energy 7, 189 (1963).
- 3) J.P.Thornton, Ch.J.Bishop, K.C.Brown y A.C.Edgecombe, "Small Power Systems Study". Informe SERI-36 del Solar Energy Research Institute, Colorado, EE.UU.de N.A. (1978).
- 4) J.A.Moragues y W.Scheuer, "Estanques solares playos para calentamiento de agua a nivel industrial", Actas de la 2da. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, pág. 21, Buenos Aires, Argentina (1976).
- 5) A.B.Casamajor, A.F.Clark y R.E.Parsons, "Cost Reductions and Performance Improvements for Shallow Solar Ponds", Informe UCRL-79280 del Lawrence Livermore Laboratory, California, EE.UU. de N.A. (1977).
- 6) W.C.Dickinson, A.F.Clark, J.A.Day y L.F.Wonters, "The Shallow Solar Pond Energy Conversion System", Informe UCRL-75780 del Lawrence Livermore Laboratory, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 7) R.E.Atley, "Evaluation of the Flat Plate Solar Collector System for Electric Power Generation", Reunión Anual de la Sección de EE.UU. de N.A. de la ISES, Fort Collins, Colorado, EE.UU. de N.A. (1974).
- 8) B.O.Seraphin y A.B.Meinel, "Photothermal Solar Energy Conversion and the Optical Properties of Solids", en "Optical Properties of Solid-New Developments", editado por B.O.Seraphin (1976) (Editorial North Holland Publishing Co. Amsterdam).
- 9) G.Francia, Solar Energy 12, 51 (1968).
- 10) A.Rabl, Solar Energy 16, 63 (1974).
- 11) Actas de la "Conferencia Georgia" (1977).
- 12) R.Winston, Solar Energy 16, 89 (1974).
- 13) R.B.Bannerot, "The Radiative Characteristics of Non-tracking Moderately Concentrating Solar Energy Collectors, en Actas de la "Conferencia Georgia" (1977).

- 14) R.Cole, W.W.Schertz y W.Teagan, "Conceptual Design of a 5 x CPC for Solar Total Energy Systems", en Actas de la "Conferencia Georgia" (1977).
- 15) R.C.Jordan, E.R.G.Eckert, J.W.Ramsey, R.N.Schmidt, E.M.Sparrow y G.K.Wehner, "Terrestrial Solar Thermal Power Systems", E-137, Actas del Congreso Internacional "El sol al servicio del hombre", Paris, Francia (1973).
- 16) J.Durán y R.Nicolás, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina. Comunicación privada (1978).
- 17) W.J.Wachtler, J.H.Price, R.L.Henry, B.L.Hale, "Survey of Generic Types of Focusing Collectors for Large-Scale Applications", Conferencia Georgia, pág. 8 - 35 (1977).
- 18) P.B.Bos, W.A.Kammer y E.Blond, "Solar Thermal Conversion Mission Analysis - Southwestern United States", Informe ATR-74 (7417-16), Vol. I de The Aerospace Corporation, California EE.UU. de N.A. (1975).
- 19) J.L.Russell, Jr., E.P.DePlomb y R.K.Bansal, "Principles of the Fixed Mirror Solar Concentrator", Informe GA-A12902 de General Atomic Company, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 20) R.Nicolás, R.Platzeck, J.Durán, J.A.Moragues y W.Scheuer, "Concentrador cilíndrico fijo a espejo facetado para aprovechamiento de la energía solar", Informe CNEA-NT 35/78 de la Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina (1978).
- 21) R.Platzeck, "Utilización de elementos cilíndricos en concentradores fijos a espejo facetado", Actas de la 4ta. Reunión de la Asociación Argentina de Energía Solar, Argentina (1978).
- 22) J.L.Russell, Jr., J.R.Schuster, "The Fixed Mirror Solar Concentrator", en Actas de la "Conferencia Georgia", pág. 3 - 1 (1977).
- 23) J.H.Davison y A.J.Wendt, "SLATS Line Focus Solar Collector", en Actas de "Conferencia Georgia", pág. 2 - 29 (1977).
- 24) N.S.Goralnick, "Seasonal Daily Thermal Energy Output of the ITEK Solar Collector", en Actas de "Conferencia Georgia", pág. 2 - 51 (1977).
- 25) R.P.Platzeck, "Concentrador Solar Cilíndrico a Espejos Cóncavos Giratorios", Actas de la 5ta. Reunión de Trabajo de la ASADES, pág. 155, Argentina (1979).
- 26) G.Nixon, "Cast Acrylic Fresnel Lens Solar Concentrator", en Actas de "Conferencia Georgia", pág 5 - 33 (1977).
- 27) R.M.Cosby, "Solar Concentration by Curved-base Fresnel Lenses", en Actas de "Conferencia Georgia", pág. 2 - 61 (1977).

- 28) L.J.Hastings y S.L.Allums, "Performance Characteristics of a 1.8 by 3.7 Meters Fresnel Lens Solar Concentrator", en Actas de "Conferencia Georgia", pág. 2 - 71 (1977).
- 29) J.D.Reichert, "The Crosbyton Solar Power Project: Fixed Spherical Mirror/Tracking Receiver", en Actas de "Conferencia Georgia", pág.3-61 (1977).
- 30) "Solar Thermal Electric Line Central Receiver Research Study", Informe provisorio de FMC Corporation (1977).
- 31) F.A.Blake, "Solar Thermal Power", Informe de la Martin Marietta Aerospace Corporation, Colorado, EE.UU. de N.A. (1975).
- 32) F.A.Blake y J.D.Walton, "Update on the Solar Power System and Component Research Program", Presentado en la Reunión Anual de la Sección de EE.UU. de N.A. de la ISES; Fort Collins, Colorado, EE.UU. de N.A. (1974).
- 33) J.Bigger, "Spinning a Turbine with Sunlight", EPRI Journal, vol. 3, N° 2, pág. 14 (1978).
- 34) A.C.Skinrood, T.D.Brumleve, C.T.Schafer, C.T.Yokomizo y C.M.Leonard,Jr., "Status Report on a High Temperature Solar Energy System", Informe SAN 74-8017 de Sandia Laboratories, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 35) J.M.Hammer et al., Honeywell; J.C.Grosskreuts et al., Black and Veatch, "Dynamics Conversion of Solar-Generated Heat to Electricity", Informe F 3403 - PR6 2852-41410 del Honeywell System and Research Center, Minnesota, EE.UU. de N.A. (1974).
- 36) K.Fukuda, H.Higuchi, K.Yanagi y A.Yoshihara, "A Study on Solar Tower System", Actas de la Conferencia Internacional "Solar Electricity", pág. 681, Toulouse, Francia (1976).
- 37) LL.O.Herwing, Sunworld 6, 11 (1977).
- 38) C.Th.Brown, "A 400 kW High Temperature Solar Test Facility", "Conferencia Georgia", pág. 4 - 13 (1977).
- 39) Comunicación privada de ORMAT Ltd. (1980).
- 40) "Haced trabajar el Sol", publicación de SOFRETES (1979).
- 41) Comunicación privada de la Compañía Hexcel (1979).
- 42) Neil H. Woodley. Jornadas de trabajo "Aprovechamiento directo de la energía solar", Argentina (1979).
- 43) "Solar Energy at Sandia Laboratories", Albuquerque, New Mexico, EE.UU. de N.A. (1977).

- 44) Comunicación privada, Comisión Energía Atómica Francesa (1980).
- 45) Comunicación privada, Ansaldo (1980).
- 46) Solar Energy Intelligence, Report 3, 4 (1977).
- 47) Solar Energy Intelligence, Report 3, 20 (1977).
- 48) J.C.Durán, J.A.Moragues, R.O.Nicolás, R.P.Platzeck, W.Scheuer, J. Di Santo y A.Rapallini, "Concentrador Fijo a Espejo Facetado de CNEA. Progresos en el período 1/7/78-30/6/79". Actas de la 5ta. Reunión de trabajo de la ASADES, pág. 55 (1979).
- 49) R.O.Nicolás y J.C.Durán, "Concentradores Fijos a Espejo Facetado de la CNEA. Consideraciones teóricas para el diseño de un prototipo de laboratorio". 6ta. Reunión de trabajo de la ASADES, Catamarca (1980).
- 50) J.C.Durán y R.O.Nicolás, "Generalization of the Two Dimensional Optical Analysis of Cylindrical Concentrators". Aceptado para su publicación en Solar Energy (1980).
- 51) J.C.Durán y R.O.Nicolás, "Análisis Optico Bidimensional de Concentradores Cilíndricos no Perfectos". 6ta. Reunión de trabajo de la ASADES, Catamarca (1980).
- 52) L.Saravia, G.Lesino, J.Mangussi, E.Hamity, J.Irigoitia, J. de la Puente, G.Canelada y D.Galli, "La Generación de Energía Eléctrica Mediante Pozas Solares en la Argentina". 6ta. Reunión de trabajo de la ASADES, Catamarca (1980).
- 53) J.Mangussi, G.Lesino, L.Saravia y D.Ronco, "Funcionamiento de un Modelo de Poza Solar con Gradiente Salino Saturado". Actas de la 4ta. Reunión de trabajo de la ASADES, pág. 43 (1978).
- 54) G.Lesino, J.Mangussi, L.Saravia, D.Galli y J.Riera, "Incorporación de las Pozas Solares al Proceso Industrial de Producción de Sulfato de Sodio". 6ta. Reunión de trabajo de la ASADES, Catamarca (1980).

