

00.77.08

CNEA - NT. 2377

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

1

CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

ESTUDIO DE EVALUACION

VOLUMEN I

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

BUENOS AIRES

1977

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
DEPARTAMENTO DE PROSPECTIVA Y ESTUDIOS ESPECIALES

CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

ESTUDIO DE EVALUACION

VOLUMEN I

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

BUENOS AIRES

1977

CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

ESTUDIO DE EVALUACION

VOLUMEN I

Jaime A. Moragues* y Walter Scheuer

Resumen

Se presentan generalidades sobre energía solar, suministrándose algunos datos físicos que dan una idea de la disponibilidad de este tipo de energía en relación con las necesidades presentes y futuras de la humanidad. Se discuten las aplicaciones posibles agrupadas según su probable concreción a corto, mediano y largo plazo.

Se analizan los aspectos técnicos y económicos más significativos de los sistemas de conversión fototérmica y fotovoltaica de energía solar a electricidad, comparándolos entre sí y con sistemas convencionales.

La información analizada proviene de los EE.UU. de Norteamérica, Europa Occidental, Japón, U.R.S.S. y Latinoamérica. En promedio, está actualizada hasta mediados de 1975 en lo relacionado con la conversión fototérmica y hasta mediados de 1976 en cuanto a la conversión fotovoltaica.

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

TEMARIO

Volumen 1

PROLOGO

NOTA PRELIMINAR

PARTE I

ENERGIA SOLAR: RECURSOS Y APLICACIONES

1. GENERALIDADES
2. RADIACION SOLAR. DATOS FISICOS
3. DEMANDA ENERGETICA Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA DE ORIGEN SOLAR
4. UTILIZACION DE LA ENERGIA SOLAR

PARTE II

CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

5. INTRODUCCION
6. CONVERSION FOTOTERMICA
7. CONVERSION FOTOVOLTAICA
8. SINTESIS Y CONCLUSIONES

Volumen 2

PARTE III

CONVERSION FOTOTERMICA

9. CONCEPTOS GENERALES
10. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION
11. ANALISIS ECONOMICO
12. PROGRAMAS NACIONALES DE CONVERSION FOTOTERMICA
13. CONCLUSIONES
14. APENDICE: DETALLES TECNICOS ADICIONALES DE LOS SISTEMAS DE COLECCION Y CONVERSION

PARTE IV

CONVERSION FOTOVOLTAICA

15. INTRODUCCION
16. CARACTERISTICAS TECNICAS DE CELULAS FOTOVOLTAICAS
17. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION
18. ANALISIS ECONOMICO
19. PROGRAMAS NACIONALES DE CONVERSION FOTOVOLTAICA
20. CONCLUSIONES

PROLOGO

La Comisión Nacional de Energía Atómica, como organismo responsable de integrar la energía nuclear en el sector productivo de la Nación, necesita disponer de información actualizada sobre las demás tecnologías energéticas, necesidad que se manifiesta no solamente en relación con las ya tradicionales y probadas sino en especial respecto de fuentes no convencionales que presenten potencial significativo. Su carácter de institución de investigación, desarrollo y producción, y la infraestructura existente en ella, hacen posible, además, que la CNEA contribuya al adelanto de la utilización de estas últimas en el país. Entre las tareas asignadas al Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales de la CNEA figura, precisamente, la de estudiar y evaluar las nuevas tecnologías nucleares y no nucleares y asesorar sobre la conveniencia de promover estudios adicionales, investigaciones y desarrollos sobre ellas.

La producción de energía eléctrica a partir de la radiación solar es un caso típico de esta clase de tecnologías. Por una parte, es la única fuente, en lo que respecta a recursos disponibles en escala mundial, con capacidad de competición y complementación clara, en el largo plazo, con la energía nuclear. Por otra, es una fuente no contaminante. Ambas circunstancias, enmarcadas en la denominada "crisis energética" y la generalizada preocupación por el costo ecológico de la civilización industrial, han provocado un enorme incremento de las investigaciones sobre el tema en los últimos años, reubicándolo como un excitante estudio de frontera ampliamente estimulante de la creatividad ingenieril y científica. Es claro que su utilización real futura estará determinada por razones de competitividad económica y no por el presente entusiasmo, pero tampoco cabe duda de que éste será un factor decisivo para alcanzarla.

El presente informe constituye una contribución de la CNEA en la dirección recién expuesta. En él se analizan la situación mundial actual y las tendencias de las líneas más importantes en estudio, tal cual surgen de la información disponible, y se consignan algunos datos sobre el potencial del país en el campo helioenergético. Su realización fue encargada a dos científicos del actual Departamento de Física interesados en el tema, los Dres. J.A. Moragues y W. Scheuer. Como primera etapa, ambos profesionales realizaron un viaje de información por Europa y Estados Unidos de Norteamérica de siete semanas de duración, a lo largo de las cuales asistieron a un curso y a tres congresos específicamente dedicados a la conversión de energía solar y visitaron doce

centros especializados en el mismo tema. La información recolectada fue significativamente ampliada a través de la recepción posterior de numerosos informes, en su mayor parte enviados como consecuencia de los contactos establecidos en el viaje.

Dentro del panorama energético nacional, la participación de la energía solar en el mercado eléctrico a largo plazo puede llegar a tener una importancia considerable. En el país se dan las condiciones básicas para ello. En primer término, la insolación de gran parte del mismo es elevada, y si bien no llega a los valores máximos registrados en algunas regiones de la Tierra, está claramente por encima del promedio mundial. En segundo, la gran extensión del territorio posibilita la captación de la energía solar en gran escala sin originar conflictos respecto de la utilización óptima de su superficie, que es una limitación para su posible uso masivo en algunos países del mundo.

La producción de energía eléctrica en la Argentina es del orden de los 1200 kWh por habitante-año, con una posición relativa 30 % inferior al promedio mundial y más de 8 veces por debajo del de los Estados Unidos de Norteamérica y de Suecia. El camino hacia nuevos niveles puede recorrerse de muchas maneras, pero es claro que la ruta óptima está caracterizada por la utilización máxima de la capacidad nacional, de modo que las necesidades de cada etapa se vayan cubriendo con las fuentes más apropiadas para las condiciones y disponibilidades locales dominantes en ella, que no tienen por qué ser las que prevalezcan en la misma época en países más desarrollados y poblados y dominen, por lo tanto, la oferta internacional de equipamiento.

No cabe duda que hay acuerdo general en el país sobre la conveniencia de seguir ese camino. La posibilidad real de recorrerlo sin embargo, no depende de acuerdos declamatorios, sino de la capacidad que muestre la Argentina para reconocer con objetividad las verdaderas dimensiones y posibilidades de cada uno de sus recursos y, más aún, de la energía técnica y financiera con que sea capaz de emprender y mantener un esfuerzo propio de investigación y desarrollo inspirado en esas premisas.

Si este informe contribuye a estimular dicho esfuerzo, habrá cumplido uno de sus propósitos más importantes.

Martín B. A. Crespi
Dpto. Prospectiva y Estudios
Especiales

NOTA PRELIMINAR

El presente trabajo contiene información referente al desarrollo alcanzado en la conversión de energía solar a electricidad para utilización terrestre. En promedio está actualizado hasta mediados de 1975 en lo concerniente a conversión fototérmica y hasta mediados de 1976 en lo concerniente a conversión fotovoltaica; cubre las siguientes regiones: EE.UU. de Norteamérica, Europa Occidental, Japón, URSS y Latinoamérica.

La energía solar que incide sobre la Tierra puede ser usada directamente o después que el sistema Tierra-atmósfera la haya convertido en otra forma de energía. Dentro de la primera posibilidad, existen diversas maneras de transformar la energía solar en energía eléctrica mediante técnicas apropiadas. Se las puede agrupar según sean de conversión directa o indirecta. En el primer grupo se incluyen tres procesos: termoiónico, termoeléctrico y fotovoltaico; en el segundo sólo uno, en el que, por conversión fototérmica, se produce vapor con el cual se acciona una turbina. En este informe analizamos únicamente las conversiones fotovoltaica y fototérmica, dado que son las que aparecen como más promisorias, estando, además, el estudio de las restantes muy poco desarrollado. Respecto a la generación de electricidad a partir de energía solar naturalmente convertida a otra forma, como ser la energía eólica o la obtenible a partir del gradiente de temperatura en los mares, si bien presentan grandes posibilidades, son de por sí de tal complejidad que deben ser objeto de análisis por separado.

El Volumen 1 del presente estudio consta de dos partes. En la Parte I se incluyen generalidades sobre la energía solar; en la Parte II se dan los aspectos técnicos y económicos más significativos de los sistemas de conversión fototérmica y fotovoltaica, comparando a éstos entre sí y con sistemas convencionales de generación de electricidad. El Volumen 2 amplía la Parte II con un análisis más profundo, tanto de la información técnica y económica referente a ambos sistemas de conversión cuanto de la comparación de éstos con los sistemas convencionales.

En este informe no analizamos la posibilidad de construir y utilizar en la Argentina centrales eléctricas a energía solar. Ese análisis constituye una tarea para la cual, aparte de la información aquí reunida, será necesario incorporar la proveniente de una serie de otros campos específicos. Un conocimiento imprescindible, que deberá ser ampliado por estar escasamente disponible a la fecha, es el de la insolación (global y directa) en la

República Argentina. Asimismo, deberá efectuarse un análisis de disponibilidad de materiales y de recursos industriales nacionales, para que la selección del sistema de generación más conveniente sea hecha teniendo en cuenta no sólo las características técnicas y económicas específicas, sino también el criterio de máxima adaptabilidad a las necesidades y posibilidades de la Argentina. Se puede adelantar que la tecnología implicada no es de gran complejidad, estando al alcance de países con desarrollo tecnológico medio, como nuestro país.

Consideramos que las decisiones referentes al desarrollo de la capacidad de generación de potencia eléctrica en el país deben contemplar la conveniencia de incorporar centrales solares a partir de aproximadamente 1990, fecha para la cual se prevé que serán económicamente competitivas; eventualmente, para algunos emplazamientos seleccionados, esta condición se satisfará antes. En la clara fijación de prioridades requerida deberá valorarse debidamente que las centrales solares no producen contaminación ambiental y que emplean una fuente de energía primaria inagotable y de libre disponibilidad.

Al Dr. Martín B.A.Crespi agradecemos el haber hecho posible este trabajo, a través de su continuo apoyo y aliento, como también el haber leído el manuscrito, con fructífero espíritu crítico, lo cual indudablemente contribuyó a clarificar su contenido. También agradecemos al Lic. E.Achterberg sus sugerencias tras haber leído críticamente varios de los capítulos del mismo.

Las figuras fueron realizadas por el Sr. Jorge Prieto y por personal de la División Proyectos; la mayor parte del trabajo fue mecanografiado por la Sra. Magdalena Neufeld de Goldstein, colaborando en el resto el Sr. Eduardo Lapuente, la Srta. María Cristina Mansilla y la Sra. Marta Rial de Gismondi. Todos ellos trabajaron con gran dedicación y esmero y fueron colaboradores siempre bien dispuestos, por lo cual les estamos reconocidos.

PARTE I

ENERGIA SOLAR: RECURSOS Y APLICACIONES

I N D I C E

1.	<u>GENERALIDADES</u>	1
2.	<u>RADIACION SOLAR. DATOS FISICOS</u>	3
	2.1. CONSTANTE SOLAR	3
	2.2. RADIACION SOLAR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE	3
3.	<u>DEMANDA ENERGETICA Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA DE ORIGEN SOLAR</u>	11
	- Energía solar que incide sobre la tierra	11
	- Consumo mundial de energía	11
	- Reservas mundiales de combustible fósil	12
	- Producción de energía eléctrica	12
4.	<u>UTILIZACION DE LA ENERGIA SOLAR</u>	19
	4.1. PERSPECTIVAS DE APLICACION DE LA ENERGIA SOLAR A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO	19
	4.2. PROGRAMAS DE APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR Y PRESUPUESTOS ASIGNADOS.	26
	- EE.UU. de Norteamérica	26
	- Japón	31
	<u>REFERENCIAS</u>	33

1. GENERALIDADES

Con el estado actual de los conocimientos, para la utilización de la energía solar únicamente se requieren desarrollos tecnológicos que permitan reducir los costos de los sistemas de conversión a otras formas de energía. Por lo tanto -dejando de lado progresos científicos fundamentales que puedan originar nuevos métodos de conversión- los factores que determinarán si la energía solar se utilizará para contribuir masivamente a satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad serán de orden económico, político y ecológico. Consecuentemente, la finalidad primordial de un estudio de las posibilidades actuales de aprovechamiento de la energía solar es establecer en qué proporción se puede explotar esa fuente de energía, teniendo en cuenta los conocimientos tecnológicos presentes, los factores económicos y los condicionamientos ecológicos. Dicho análisis lo efectuaremos, dentro de lo que permita la información disponible, para el caso particular de la generación de electricidad a partir de energía solar, tema de este informe.

Dos características importantes de la energía solar son: su condición de energía prácticamente inagotable y el hecho de no constituir un agente contaminante. En este contexto, es conveniente recordar que no sólo son importantes las contaminaciones materiales del aire y del agua, sino que también lo es la térmica. La energía solar que llega a la Tierra es el elemento más importante del balance calórico de ésta y su aprovechamiento sólo alterará en pequeña medida la distribución geográfica del proceso de transferencia de esa energía al sistema Tierra-atmósfera (y aun este efecto estará circunscripto a áreas pequeñas en comparación con la superficie terrestre). Además, es una fuente de energía disponible, en mayor o menor grado, en cualquier lugar del planeta, presentando la ventaja de que, en muchos casos, puede ser colectada y transformada en el lugar de utilización. Esto último puede ofrecer ventajas económicas considerables, particularmente en áreas remotas, para las cuales los costos de transporte de combustibles convencionales o la distribución de energía eléctrica pueden ser muy elevados.

Como contrapartida, la energía recibida desde el sol tiene baja densidad y su suministro es intermitente. Ello significa que es necesario recogerla sobre superficies relativamente grandes y, eventualmente, concentrarla antes de su conversión a una forma utilizable de energía. Además, la energía necesaria para las horas nocturnas debe colectarse en las horas de sol e, inclusive, deben preverse períodos relativamente largos (varios días) totalmente nublados. Por ello, el aprovechamiento de la energía solar requiere

desarrollar no sólo dispositivos que permitan convertirla en una forma usable, sino también disponer de buenos sistemas de acumulación.

En esta primera parte del informe suministramos algunos datos físicos que permiten dar una idea de la magnitud de energía de origen solar de que se dispone en relación a las necesidades energéticas actuales y futuras de la humanidad. Asimismo, damos un listado de aplicaciones posibles, agrupándolas según su concreción sea probable a corto, mediano o largo plazo. Finalmente, como ejemplo de los programas de aprovechamiento de la energía solar en ejecución en diversos países, describimos con algún detalle los correspondientes a EE. UU. de N.A. y al Japón.

2. RADIACION SOLAR. DATOS FISICOS

La energía solar es generada por reacciones complejas de fusión nuclear producidas en el sol. A los fines prácticos, el sol puede considerarse como una enorme esfera incandescente, cuya temperatura de emisión es de 5760 K (temperatura de la fotosfera). La radiación emitida atraviesa el espacio y tiene que pasar por la atmósfera antes de alcanzar la superficie terrestre, sufriendo modificaciones en ésta por procesos de absorción y dispersión. A la energía solar que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo (densidad de flujo de energía), se la denomina irradiancia; las siguientes son algunas relaciones entre las unidades más usuales en que se la expresa:

$$\begin{aligned} 1 \text{ W.m}^{-2} &= 1 \text{ Joule.seg}^{-1}.\text{m}^{-2} = 10^3 \text{ erg.seg}^{-1}.\text{cm}^{-2} \\ &= 2,389 \cdot 10^{-5} \text{ cal.seg}^{-1}.\text{cm}^{-2} \\ &= 1,432 \cdot 10^{-3} \text{ Langley.min}^{-1} \\ &= 8,795 \cdot 10^{-5} \text{ Btu.seg}^{-1}.\text{ft}^{-2}, \end{aligned}$$

siendo 1 Langley = 1 cal.cm⁻².

2.1 CONSTANTE SOLAR

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 terrestre; por energía total se entiende la transportada por las radiaciones de todas las longitudes de onda existentes en el espectro solar. La constante solar se determina a la denominada distancia media del sol a la tierra (149,5 millones de km). Un valor reciente ¹⁾ de aceptación general es de 1353 W/m².

Esta irradiancia extraterrestre, correspondiente por lo tanto a masa atmosférica cero (AM0), tiene la distribución espectral mostrada en la Fig. 2.1; está compuesta en un 8 % por radiación ultravioleta, 41 % por luz visible y 51 % por radiación infrarroja. Como se observa en dicha figura, esta distribución no pertenece exactamente a la emisión de un cuerpo negro a la temperatura de 5760 K, pero a los fines energéticos se puede aceptar como tal.

2.2 RADIACION SOLAR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Al atravesar las capas atmosféricas que rodean la Tierra, se producen efectos de absorción y dispersión de la radiación solar que modifican su intensidad y su distribución espectral (de hecho, sólo son significativos

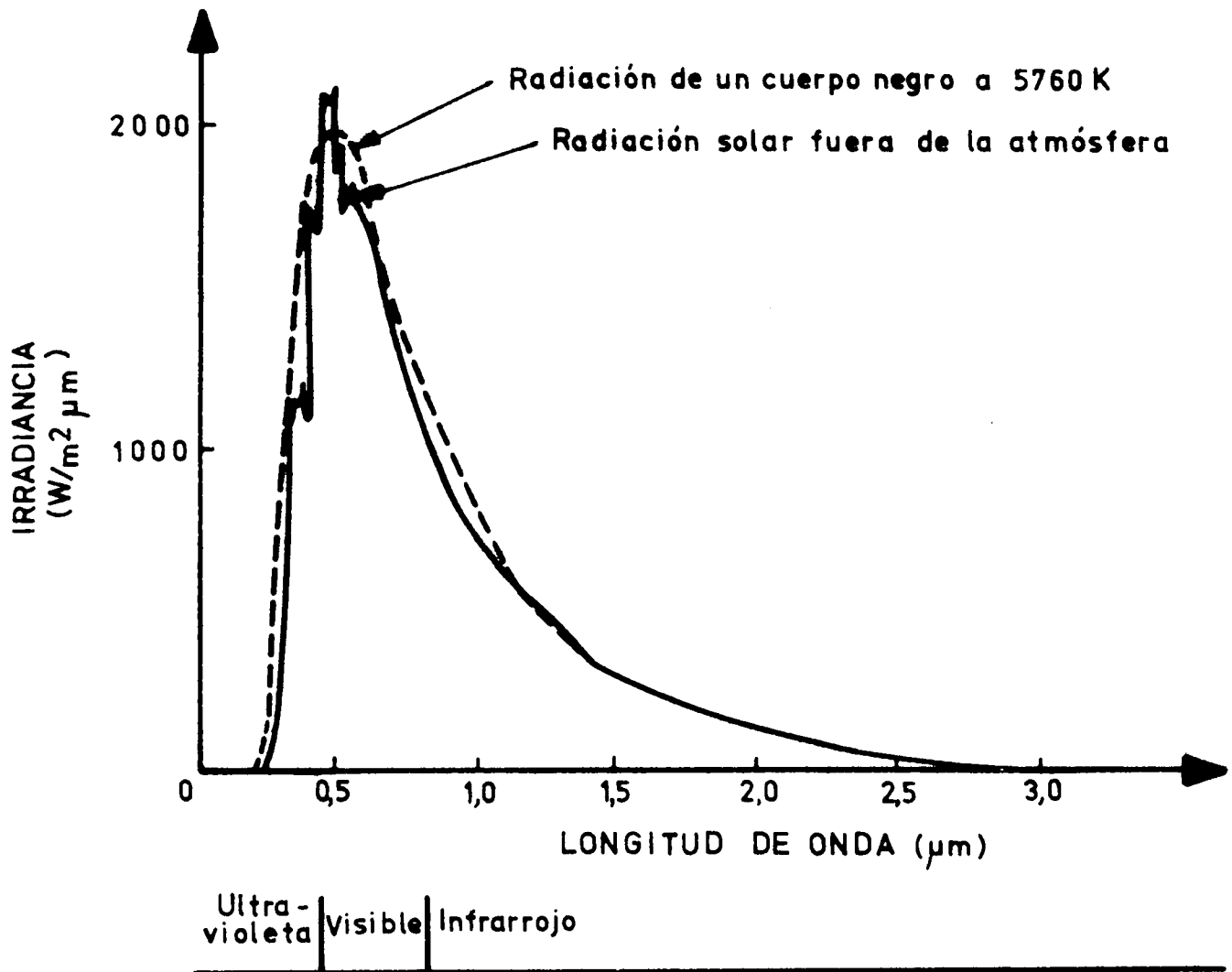


Fig. 2.1: Distribución espectral de la irradiancia AM0, obtenida de datos experimentales. Su composición corresponde a 8 % de radiación ultravioleta, 41 % de radiación visible y 51 % de radiación infrarroja. De Refs. 1 y 2.

los producidos en la capa más densa, la troposfera, de ~ 11 km de espesor). Por lo tanto, sobre la tierra se recibe radiación que llega directamente desde el disco solar y radiación que ha sufrido dispersión al pasar por la atmósfera. Esta distinción es importante; por ejemplo, hay equipos de aprovechamiento de la energía solar que funcionan sobre la base de concentración de la radiación previa a su conversión a otra forma de energía y que sólo trabajan con radiación directa.

RADIACION DIRECTA, DIFUSA Y GLOBAL: La radiación directa (I) es, como dijimos, la radiación que atraviesa las capas atmosféricas sin sufrir modificaciones; igual que la radiación extraterrestre, se la mide sobre un plano perpendicular a los rayos solares. La radiación difusa o dispersa (D) es la que llega a la tierra después de haber sufrido procesos de dispersión en las capas atmosféricas y en las nubes; la irradiancia difusa es medida sobre un plano horizontal. Finalmente, la radiación global (G) es la suma de las dos primeras, ambas medidas sobre un plano horizontal. La irradiancia global es dada por $G = D + I \cdot \sin h$, donde la altura del sol h es expresada como el ángulo formado por las líneas observador-horizonte y observador-sol, medido a partir de la primera.

La relación entre radiación directa y difusa depende del espesor de atmósfera a atravesar (latitud, hora del día), de su humedad y de la nubosidad.

IRRADIANCIA AM1, AM2, AM3, ETC.: Normalmente se expresa la irradiancia en condiciones atmosféricas ideales, o sea con cielo despejado y ambiente seco. Se la normaliza, además, a nivel del mar y para distintas alturas del sol. Para ello, se considera que la radiación solar atraviesa una atmósfera terrestre cuando el sol está ubicado en el cenit, o sea $h = 90^\circ$. Luego, se denominan irradiancias AM1, AM2, AM3, etc., a las correspondientes a alturas del sol tales que la radiación atraviesa una, dos, tres, etc. atmósferas terrestres. El índice numérico está relacionado con la altura h del sol a través de la relación $1/\sin h$.

La distribución espectral será, por supuesto, distinta para las diferentes condiciones. Como ejemplo, en la Fig. 2.2 se muestran las distribuciones espectrales de la radiación solar directa para los casos de irradiancias AM1, AM2, AM4 y AM8, obtenidas teóricamente a partir de la irradiancia AM0 al considerar el efecto de la atmósfera sobre las distintas longitudes de onda. Como comparación se da, en cada caso, la correspondiente distribución para AM0. En la Tabla 2.1 consignamos valores calculados de irradiancias directa, difusa y global para distintas posiciones del sol y en condiciones de cielo despejado y ambiente seco.

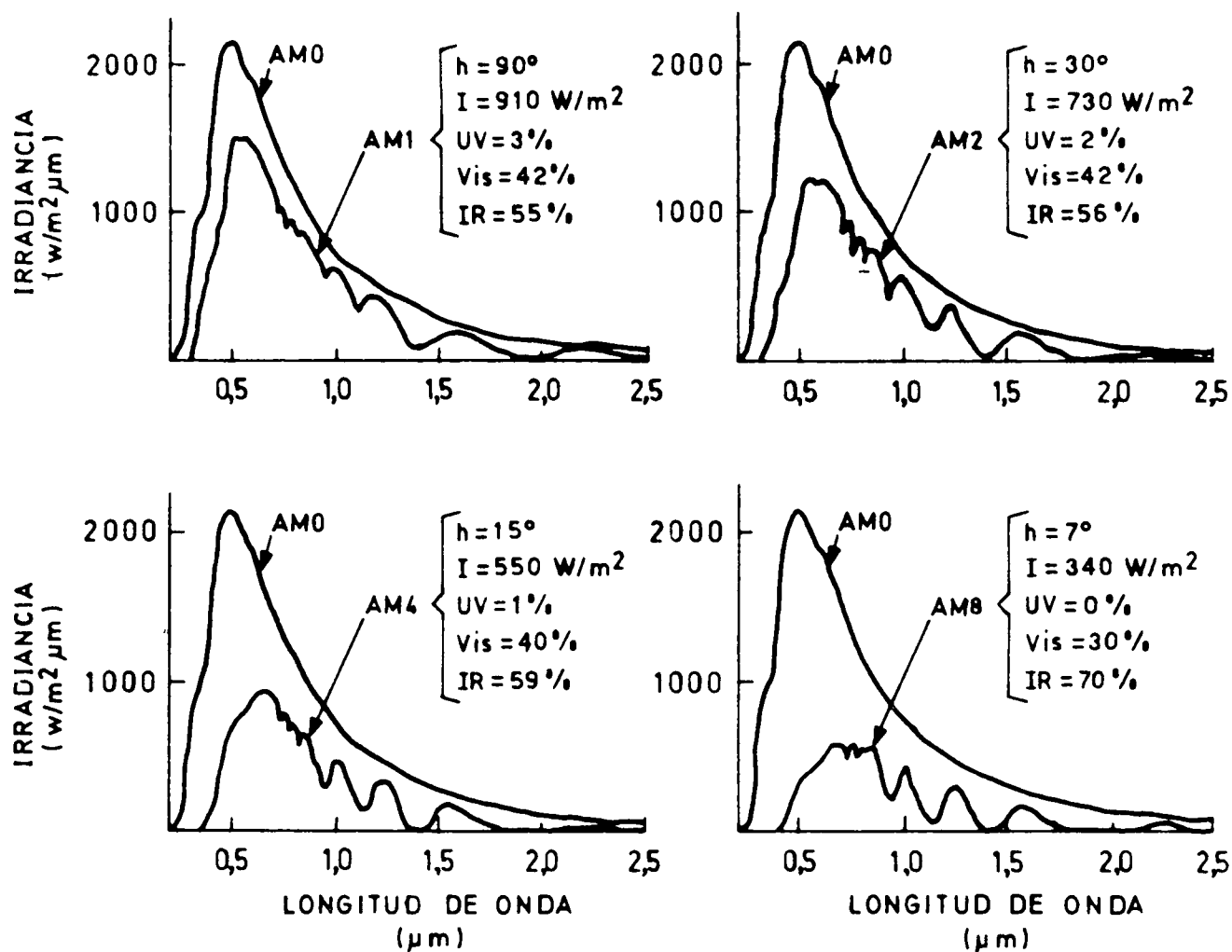


Fig. 2.2: Distribución espectral de radiación solar directa a nivel del mar con cielo claro y ambiente seco. Valores calculados conociendo la composición atmosférica. En cada caso se da la altura (h) del sol, expresada como el ángulo formado por las rectas observador-horizonte y observador-sol; la irradiancia directa total (I) y la proporción (en por ciento) de radiación ultravioleta (UV), visible (Vis) e infrarrojo (IR). La distribución AM0 es dada como comparación; sus características son: irradiancia de 1353 W/m^2 y composición de $UV=8\%$, $Vis=41\%$, $IR=51\%$. En el eje de las ordenadas, la irradiancia corresponde a la que llega dentro de un intervalo de longitudes de onda de $0,1 \mu\text{m}$. De Ref. 3.

Tabla 2.1

Ejemplo de relaciones de radiación directa, difusa y global para distintas horas del día, con cielo claro y ambiente seco ^{a)}

Posición del sol		Irradiancia (W/m ²)			
Altura del sol (h)	Masas atmosféricas	Directa		Difusa D	Global G=I.sen h + D
		I	I.sen h		
	AM0	1353	---	---	---
90°	AM1	910	910	130	1040
30°	AM2	730	360	80	440
15°	AM4	550	140	50	190
7°	AM8	340	40	30	70

a) Datos tomados de Ref. 3 . La irradiancia directa se mide sobre una superficie perpendicular a la dirección de la radiación. Las irradiancias difusa y global sobre superficies ubicadas horizontalmente.

Tabla 2.2

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' O	481	1965-68	2,63	5,86	4,40	110	244	183			620
Pilar (Córdoba)	31°40' S 63°53' O	338	1964-66	2,80	6,63	4,87	117	276	203			660
Mendoza	32°53' S 68°51' O	828	1965-68	2,57	7,93	5,02	107	330	209			690
San Martín (Mendoza)	33°05' S 68°25' O	653	1965-67	2,79	7,95	4,75	116	331	198			720
Buenos Aires	34°35' S 58°29' O	25	1964-68	2,01	6,99	4,50	84	291	187	330 ^{e)}	920 ^{e)}	620
Neuquén	38°57' S 68°08' O	270	1965-68	1,98	8,02	4,80	83	334	200			650

a) Datos obtenidos de Ref. 4 .

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.

Estas condiciones atmosféricas ideales son reproducibles en laboratorio, permitiendo comparar experimentalmente, a condiciones normalizadas, los comportamientos de dispositivos solares cuya respuesta depende fuertemente de la composición espectral de la radiación. Así, por ejemplo, es usual consignar las eficiencias de células fotovoltaicas a condiciones AM0 y AM1.

La altura máxima del sol para cada lugar es una función de la latitud y de la estación del año, encontrándose entre los límites $h_{\text{máx}} = (90^\circ - \text{latitud}) \pm 23,50^\circ$, donde $23,50^\circ$ es el ángulo que forma la eclíptica con el plano ecuatorial. Por lo tanto, en muchos lugares nunca se tienen condiciones reales de irradiancia AM1; en Buenos Aires, por ejemplo, la altura máxima del sol va de 79° en verano a 32° en invierno.

DISPONIBILIDAD REAL DE RADIACION SOLAR: Desde el punto de vista de la energía disponible en cada lugar, la irradiancia se da como valor promedio de mediciones realizadas en condiciones reales de nubosidad y altura sobre el nivel del mar.

Usualmente, se da la energía incidente sobre la unidad de superficie durante un día. Promediando los valores diarios a lo largo de un mes, se determina la **energía solar diaria** media disponible en dicho mes. El conjunto de estos promedios mensuales da la distribución anual de la energía solar diaria disponible. Igualmente, es usual dar el promedio anual. Otra forma de consignar información sobre la radiación solar es dar la potencia disponible, expresada como valor promedio durante 24 horas (o sea la energía que llega durante un día, dividida por 24 horas) y la potencia pico, correspondiente al sol en su posición de altura máxima (energía que llega durante una hora para dicha posición del sol). Ambas potencias se dan, como en el caso de la energía, en promedio mensual y anual. En la Tabla 2.2, damos como ejemplo la radiación global medida en seis estaciones de la República Argentina.

3. DEMANDA ENERGETICA Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA DE ORIGEN SOLAR

La cantidad de energía que llega a la superficie de nuestro planeta en forma de radiación solar es enorme. Para justificar esta afirmación haremos algunas comparaciones con la energía que la humanidad requiere para su consumo. A fin de facilitar la comparación de los datos aquí presentados con los dados en otras publicaciones, damos las relaciones entre las unidades de energía más usadas.

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kWh} &= 3,60 \cdot 10^6 \text{ Joule} \\
 &= 8,60 \cdot 10^5 \text{ cal (calorías pequeñas)} \\
 &= 3,41 \cdot 10^3 \text{ Btu (British thermal units)} \\
 &= 3,41 \cdot 10^{-15} \text{ Q}^\dagger \\
 &= 1,34 \text{ hph (horse power-hour)} \\
 &= 1,36 \text{ cvh (cheval vapeur-heure)} \\
 &= 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ tec (toneladas métricas equivalentes de carbón)} \\
 &= 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ tep (toneladas métricas equivalentes de petróleo)}
 \end{aligned}$$

Energía solar que incide sobre la tierra

Consideraremos únicamente la radiación incidente sobre Africa, América, Asia, Australia y Europa, o sea sobre una superficie de aproximadamente 132,5 millones de km^2 . De los datos a nuestra disposición, estimamos que la energía solar que llega al área considerada es de 3 a 4 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$. A los fines de comparación, adoptamos un valor de 3,5 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$, promedio anual, al cual le corresponde una potencia promedio sobre 24 horas de $150 \text{ W}/\text{m}^2$. Estos valores implican la disponibilidad de una energía de origen solar de $4,6 \cdot 10^8 \text{ GWh}/\text{día}$ ($1,6 \text{ Q}/\text{día}$) o $1,7 \cdot 10^{11} \text{ GWh}/\text{año}$ ($580 \text{ Q}/\text{año}$). Sin embargo, por razones ecológicas, económicas o técnicas sólo es posible utilizar una fracción de la superficie considerada, debiéndose hacer un análisis particular para cada región (ver, p.ej., pág. I-13).

Consumo mundial de energía

De acuerdo con los datos suministrados por las Naciones Unidas ⁵⁾, el consumo mundial de energía *en todas sus formas* fue, para 1972, de $5,9 \cdot 10^7 \text{ GWh}/\text{año}$. Para el año 2000 se estima ⁶⁾ que la tasa anual mundial de consumo de energía será 3 veces mayor que la actual. Por lo tanto, convirtiendo la energía solar con una eficiencia del 20 %, en menos de 0,2% del área continental considerada se podría generar una energía equivalente a la demanda mundial actual y, en 0,5%, la correspondiente a la demanda mundial para el año 2.000.

[†] Aquí Q identifica a la tradicional "unidad Q" = 10^{18} Btu . Nótese que en los EE.UU. de N.A. también suele utilizarse Q como abreviatura de "quad" = 10^{15} Btu .

Tabla 3.1

Disponibilidad mundial de energía de origen solar

Energía solar incidente por día y por m ² (promedio anual)	(kWh/(m ² .día))	3,5
Superficie continental considerada (Africa, América, Asia, Australia, Europa)	(km ²)	132,5 10 ⁶
Energía solar incidente sobre la superficie considerada	(GWh/día) (GWh/año)	4,6 10 ⁸ 1,7 10 ¹¹
Consumo mundial total de energía en 1972 a)	(GWh/año)	5,9 10 ⁷
Reservas mundiales de combustibles fósiles a)	(GWh)	6,3 10 ¹⁰

a) Datos obtenidos de Ref. 5.

Interesante mencionar que, para muchos de los usos tenidos en cuenta en el consumo mundial de energía, basta con convertir la energía solar en térmica a bajas temperaturas, para lo cual la eficiencia es de $\sim 70\%$, aumentando en forma considerable la disponibilidad de energía de origen solar.

Reservas mundiales de combustibles fósiles

Las reservas mundiales totales de combustibles fósiles se estiman ⁵⁾ en $7,8 \cdot 10^{12}$ t o $6,3 \cdot 10^{10}$ GWh. Esas reservas, no renovables, fueron producidas a lo largo de millones de años por la energía solar a través del proceso de fotosíntesis y concentradas por procesos geológicos. El total de reservas mundiales de petróleo, carbón, lignito y gas natural recién consignadas, que puede considerarse como el capital de energía solar acumulado, es equivalente a la cantidad de energía solar que incide sobre la superficie continental antes mencionada en un período de cuatro meses y medio.

En la Tabla 3.1 hemos resumido los datos de energía solar, demanda energética mundial y reservas de combustibles fósiles arriba discutidos.

Producción de energía eléctrica

Concretándonos al problema específico de este informe, la producción de energía eléctrica, compararemos las demandas para aproximadamente 1990 en el suroeste de EE.UU. de N.A. y en la República Argentina con las posibilidades de satisfacerlas utilizando energía solar.

SUROESTE DE EE. UU. DE NORTEAMERICA: Recientemente se ha realizado ⁷⁾ un análisis de las posibles ubicaciones de centrales solares para la generación de electricidad en el suroeste de EE. UU. de N.A., limitándolo a zonas en las que la energía solar incidente es mayor que $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ (promedio anual). Se excluyeron dentro de esas zonas, terrenos erosionados, regiones de difícil acceso, lagos, ríos, dunas, playas, zonas de recursos naturales, parques, bosques, áreas urbanas, granjas, terrenos de elevado valor. Aplicando un criterio muy restrictivo, del área de $2.670.000 \text{ km}^2$ correspondiente a los ocho estados de la región, quedan 55.700 km^2 como aptos para la ubicación de las centrales (2 % del área total); sobre ellos inciden $10,6 \cdot 10^7$ GWh/año de energía solar. Con una eficiencia total para la conversión de energía solar en electricidad del 16 % y un factor de utilización del terreno del 50 % (espacios necesarios para circular entre colectores), se pueden producir $8,5 \cdot 10^6$ GWh/año. Con un criterio menos restrictivo en la selección de los terrenos, se puede disponer de 7,5 veces más energía eléctrica.

En el mismo trabajo se efectúa un análisis de la demanda de electricidad en el suroeste de los EE. UU. de N.A. para el período 1980-2000. Para

Tabla 3.2

Demanda de electricidad y posibilidad de satisfacerla a partir de energía solar para el suroeste de EE.UU. de N.A. ^{a)}

Superficie del suroeste de EE.UU. de N.A. (8 estados) (km ²)		2.670.000
Superficies aptas para instalar centrales solares ^{b)} (km ²)		55.700
Energía solar que incide sobre la superficie considerada (GWh/año)		$10,6 \cdot 10^7$
Energía eléctrica disponible (16 % eficiencia) (50 % utilización del terreno) (GW _e h/año)		$8,5 \cdot 10^6$
Demanda energía eléctrica S.O. de EE.UU. (GW _e h/año)	1990	$\sim 1,0 \cdot 10^6$
	2000	$\sim 2,0 \cdot 10^6$

a) Datos obtenidos de Ref. 7 .

b) Según criterio restrictivo.

el año 1990, año en el que se espera que entren en operación comercial las centrales solares, la demanda sería de $\sim 1,0 \cdot 10^6$ GW_eh/año y para el año 2000 de $\sim 2,0 \cdot 10^6$ GW_eh/año. En la Tabla 3.2 resumimos los datos discutidos. De ellos surge que para una región de un país altamente industrializado como EE. UU. de N.A. — el cual, de acuerdo a las estadísticas de las Naciones Unidas ⁵⁾, actualmente consume el 33 % del consumo total mundial de energía — sería posible satisfacer la demanda de energía eléctrica para el año 2000 a partir de energía solar solamente.

REPUBLICA ARGENTINA: Según los datos presentados por la Secretaría de Estado de Energía ⁸⁾, la generación de electricidad por centrales del servicio público en todo el país fue, durante los años 1973 y 1974, de 21.580 y 23.030 GW_eh, respectivamente. Se considera que estas cifras representan el 80 % del total de la electricidad producida en el país, correspondiendo el 20% restante a autogeneración. Partiendo de estos datos, suponiendo un crecimiento de la demanda entre 1974-75 igual al del período 1973-74 (7%), y utilizando para el período 1975-90 un incremento de la demanda al servicio público del 11% en promedio (según la proyección elaborada por la Gerencia de Centrales Nucleares de la CNEA (Ref. 9)), para el año 1990 se obtiene una necesidad de generación de 125.000 GW_eh.

De la Tabla 2.2 y la Ref. 10, se ve que es razonable considerar 4,5 kWh/(m².día) como promedio anual de la energía solar incidente sobre la zona del país situada al norte de la provincia de Río Negro (esto corresponde a una potencia promedio en 24 horas de 190 W/m²). Tomando 20 % para la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad, se obtienen 330 kW_eh/(m².año). Por lo tanto, considerando un factor de utilización del terreno del 50 %, para satisfacer la demanda de electricidad en 1990 se necesita un área de colección de 760 km².

Si bien es necesario hacer un estudio de los lugares aptos para la ubicación de centrales solares, similar al que se citara anteriormente, es interesante notar que 760 km² equivalen a sólo 0.04 % de la superficie total de la mencionada zona al norte de Río Negro. Por otra parte, provincias de alta insolación como San Juan, San Luis, Mendoza y Salta tienen superficies que oscilan en los 80.000 km² las dos primeras y en los 150.000 km² las dos últimas. También se puede comparar aquella área con la requerida por los lagos artificiales formados para centrales hidroeléctricas, si bien ésta, para una potencia dada, depende fuertemente de la topología del terreno. Tomemos como ejemplo la central de El Chocón ¹¹⁾, para la cual el espejo de agua cubre, a cota máxima, 820 km², posibilitando la producción de $3,3 \cdot 10^3$ GW_eh durante un año medio. La superficie cubierta es aproximadamente la que se necesita para satisfacer

Tabla 3.3

Demanda de energía eléctrica y posibilidades de satisfacerla a partir
de energía solar en la República Argentina

Energía eléctrica generada por cen- trales de servicio público (GW _e h)	Producida ^{a)}	1973	21.580
		1974	23.030
	Demanda ^{b)}	1990	125.000
Energía solar disponible (kWh/(m ² .día)) (promedio anual) (kWh/(m ² .año))			4,5 1.600
Energía eléctrica disponible (20 % de eficiencia) (kW _e h/(m ² .año))			330
Superficie requerida para satisfacer la demanda de electricidad de 1990 (50 % factor utilización terreno) (km ²)			760
Superficies de algunas provincias argentinas (km ²)	San Luis		76.750
	San Juan		86.750
	Mendoza		150.840
	Salta		155.360
Central hidroeléctrica El Chocón ^{c)}	Energía generable (GW _e h)		3.300
	Superficie del espejo de agua (km ²)		820

a) Datos obtenidos de Ref. 8.

b) Datos obtenidos de Ref. 9.

c) Datos obtenidos de Ref. 11.

a partir de energía solar la demanda eléctrica total proyectada para 1990, la cual es 40 veces mayor que la que puede producir El Chocón. Además, debe recordarse que las mejores zonas en las que se pueden instalar centrales solares son, por su elevada irradiancia, las desérticas, las cuales, en general, no son aprovechables para otros fines. En la Tabla 3.3 hemos resumido los datos discutidos.

4. UTILIZACION DE LA ENERGIA SOLAR

Como hemos mencionado en el Capítulo 1, para hacer uso de la inmensa cantidad de energía de origen solar disponible, es necesario desarrollar dispositivos que permitan convertirla, a niveles económicamente competitivos, en otras formas de energía. La fase importante que queda por cumplir es diseñar, construir y demostrar la confiabilidad de sistemas que satisfagan la condición de economicidad; en relación a esto último, deben tenerse en cuenta las ventajas ecológicas y la disponibilidad prácticamente libre e inagotable del recurso.

Aun saliéndonos del campo estricto abarcado por el presente informe, creemos ilustrativo dar en esta Introducción una breve enumeración de las aplicaciones más importantes de la energía solar.

4.1. PERSPECTIVAS DE APLICACION DE LA ENERGIA SOLAR A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO

Parte de la radiación solar que llega a nuestro planeta es colectada y convertida en otras formas de energía por el gran sistema termodinámico formado por el conjunto Tierra-atmósfera; la energía eólica, la energía térmica disponible en los océanos, la energía obtenible a través de procesos de bioconversión, son productos de este proceso natural. El hombre puede usar estas formas de energía, o directamente la energía solar, convirtiéndolas en:

- (a) energía térmica, por conversión directa de la radiación solar, por combustión de material orgánico, etc.;
- (b) energía mecánica, por conversión fototérmica, conversión de la energía eólica, utilización del gradiente de temperatura de los océanos, etc.;
- (c) potencia eléctrica, a través de conversión fototérmica o fotovoltaica, conversión de la energía eólica, utilización del gradiente de temperatura de los océanos, etc.;
- (d) combustibles renovables no contaminantes, mediante, por ejemplo, producción fotosintética de materiales orgánicos y posterior conversión a combustibles, biofotólisis o disociación térmica del agua para producir hidrógeno, etc.

Las posibles aplicaciones de estas formas de energía pueden clasificarse de acuerdo a los plazos que se consideran necesarios para que resulten económicamente competitivas.

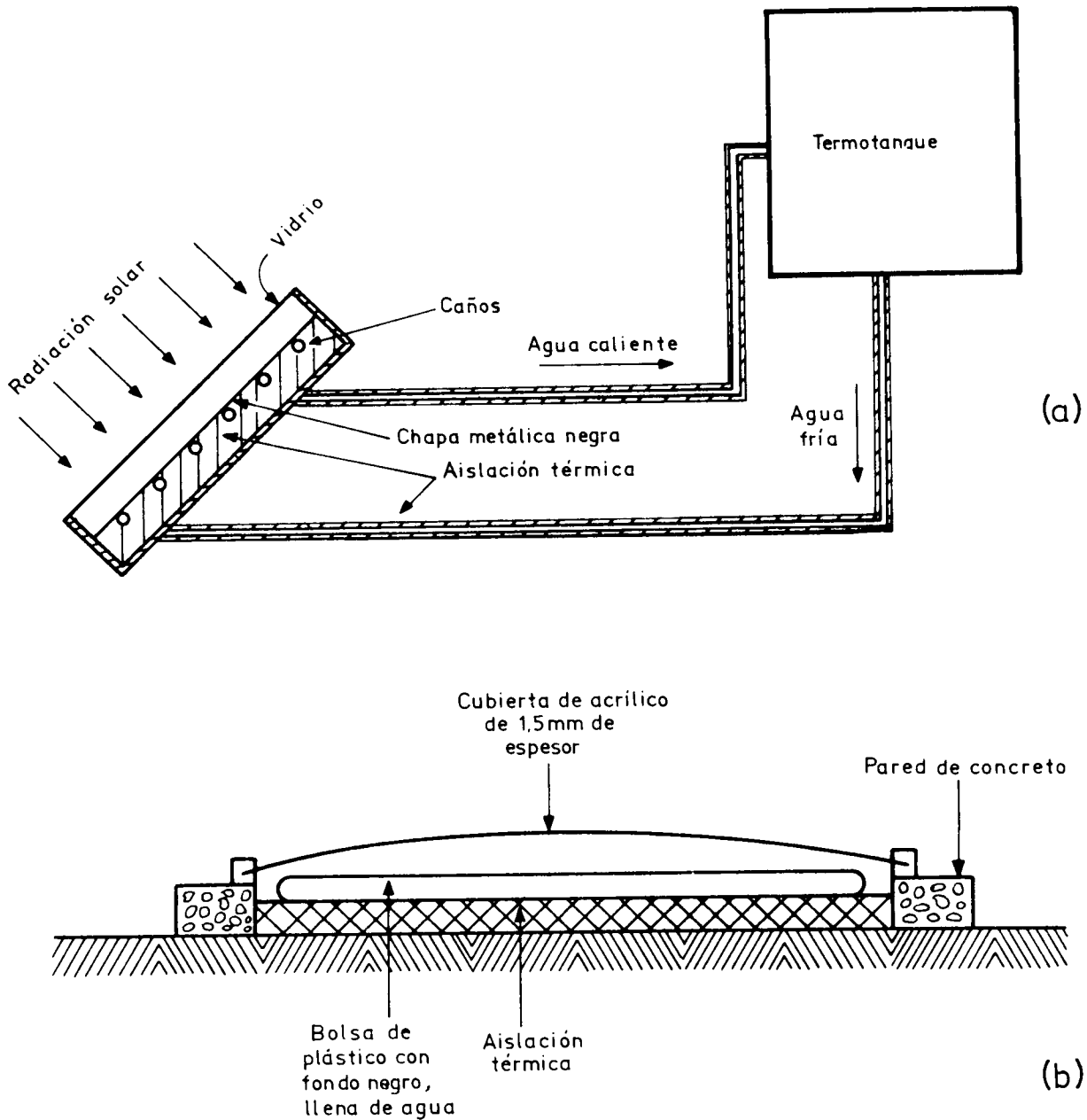


Fig. 4.1: (a) Calentamiento de agua. El colector plano consiste en una caja térmicamente aislada, con la parte superior cubierta por un vidrio que deja entrar la radiación visible y, siendo prácticamente opaco a la infrarroja, evita la pérdida de calor a través de él. La chapa metálica negra colecta la radiación solar y la convierte a energía térmica, la cual es transferida al agua que circula por los caños. El agua fría, al irse calentando, sube por termosifón, estableciéndose una circulación pontínua por el sistema colector plano-termotanque.

(b) Corte de un estanque playo para calentamiento de agua. Cada módulo tiene 60 m de largo por 3,6 m de ancho y la bolsa de plástico con fondo negro, por la cual fluye agua lentamente, tiene una altura de 5 a 10 cm. La cubierta de acrílico produce efecto invernadero. De Ref. 12.

Aplicaciones a corto plazo

Consideramos como tales aquellas que pueden estar en el mercado en un término de 3 a 5 años. Algunas de las aplicaciones clasificadas dentro de esta categoría en realidad se utilizan, con buenos resultados, en algunos países desde hace bastante tiempo, y sólo requieren una adaptación al medio en el cual van a ser empleados. La mayoría de ellas hacen uso directo del contenido calórico de la radiación solar, sin conversión a otro tipo de energía.

CALENTAMIENTO DE AGUA: Para usos domésticos y algunos usos industriales que sólo requieren temperaturas del orden de los 60 C, se puede utilizar un dispositivo muy simple que aprovecha la radiación global incidente sobre un colector plano convenientemente orientado. Para las horas nocturnas se almacena el agua en tanques térmicamente aislados (Fig. 4.1a). Para períodos muy prolongados sin sol es necesario reforzar con un sistema convencional, a menos que se disponga de una superficie colectora y tanques de gran capacidad. En países como Australia, Israel, Japón, Unión Soviética y EE. UU. de N.A., el empleo de estos dispositivos se está difundiendo rápidamente para uso doméstico, fabricándose los a escala industrial. Como ejemplo de aplicación a usos industriales podemos citar ¹²⁾ la adaptación de un dispositivo de esta naturaleza para producir el agua caliente requerida para el tratamiento de minerales de uranio (Fig. 4.1b).

DESTILACION SOLAR: Para tratamiento de aguas salobres, se han utilizado destiladores solares en diversos países desde hace ya muchos años. El principio de funcionamiento es similar al de los dispositivos de calentamiento de agua antes mencionados (Fig. 4.2a). En los salitrales del norte de Chile se instaló en 1872 una planta con 4.700 m² de superficie colectora que, por más de 30 años, produjo agua potable para la población minera de Las Salinas, a razón de más de 20.000 litros diarios en verano (Ref. 13).

Un principio totalmente distinto de purificación de agua es el de formación de hielo por radiación natural nocturna a la atmósfera. Las sales quedan disueltas en la capa inferior de agua no congelada. En el norte de Chile se realizaron numerosas experiencias, habiéndose logrado importantes espesores de hielo: del orden de 15 kilos por metro cuadrado en una sola noche ¹⁴⁾. Sin embargo no se tienen noticias de que se haya difundido su uso.

SECADO SOLAR: Se utiliza la energía solar para, por ejemplo, calentar aire que se hace circular por el secador controlando los parámetros de temperatura y humedad. Estos dispositivos son utilizados en varios países para los productos más diversos (granos, frutas, tabaco, etc.). Un método más rudimentario, en el cual no se tiene ningún control sobre los parámetros mencionados, es el secado exponiendo directamente los frutos al sol.

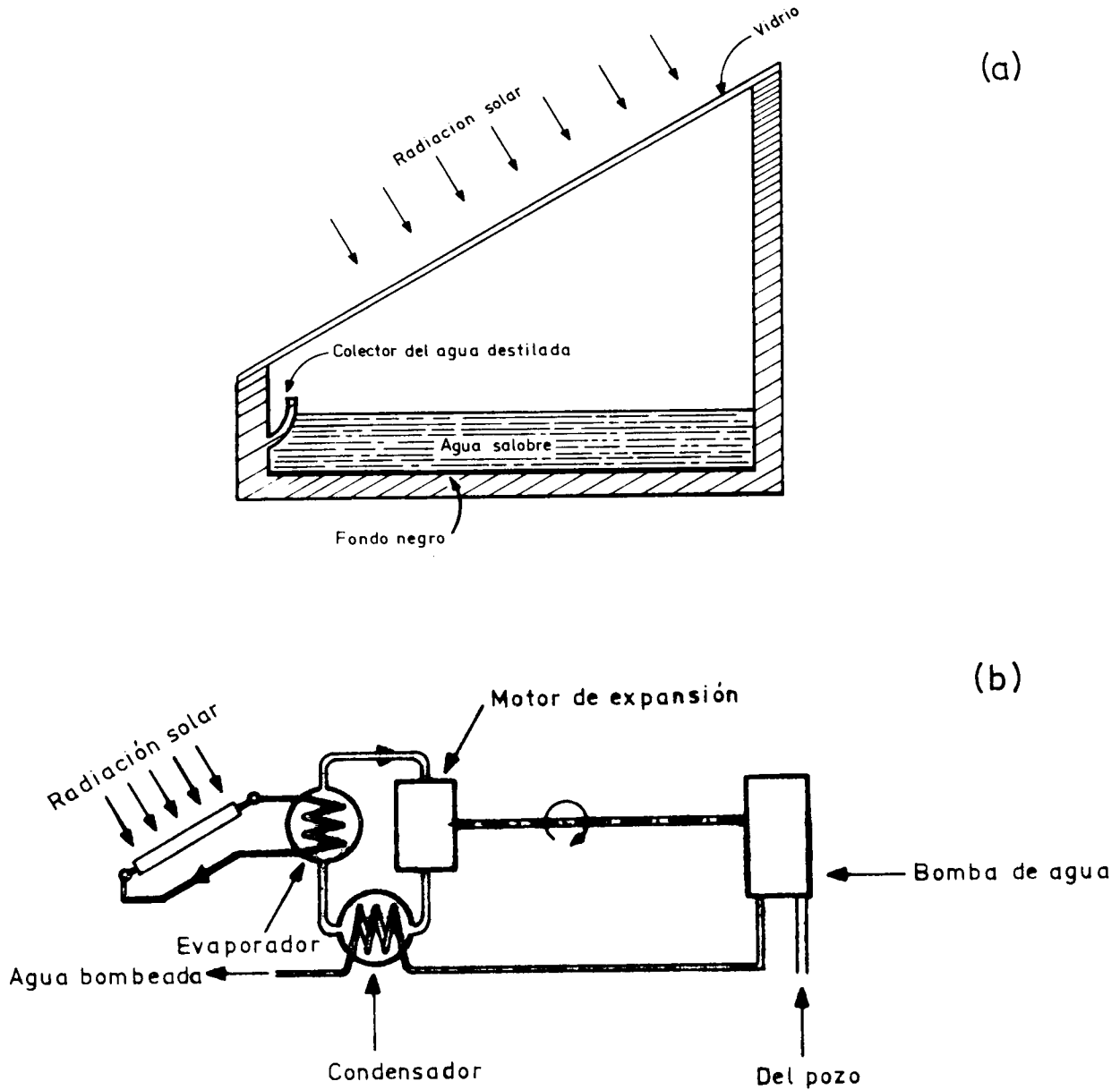


Fig. 4.2: (a) Destilador solar. El agua salobre es destilada por efecto del calor proveniente de la radiación solar y se condensa en la pared interior del vidrio inclinado, corriendo por la misma y siendo recogida por una canaleta lateral.

(b) Bomba solar. La fuente de calor del evaporador es agua calentada por la radiación solar, la fuente fría del condensador es el agua bombeada del pozo. En el motor de expansión un gas líquido, por ejemplo butano, se expande rápidamente produciendo una presión capaz de mover un émbolo que, a su vez, pone en funcionamiento una bomba. El gas luego es enfriado, cerrándose el ciclo.

CULTIVO BAJO CARPA: Son los tradicionales invernaderos en los cuales se controlan temperatura, humedad y contenido de CO_2 . En los lugares desérticos, se combina con la destilación solar para obtener agua de riego.

CALEFACCION DE EDIFICIOS: Se han propuesto diversos procedimientos, sobre la base de calentamiento de agua o aire en dispositivos de funcionamiento similar al de los utilizados para obtener agua caliente. El problema principal reside en la acumulación de la energía térmica para las horas nocturnas o períodos prolongados sin sol. Sin embargo, ya se está utilizando a nivel experimental en algunos edificios en EE.UU. de N.A., Inglaterra, Francia, etc.

ENERGIA MECANICA Y ELECTRICA EN PEQUEÑA ESCALA: La energía eólica es utilizada desde hace muchos años para la extracción de agua y la generación de electricidad en instalaciones de baja potencia (cargadores de baterías).

Aplicaciones a mediano plazo

Consideramos como tales aquellas que pueden entrar en competitividad en un plazo de 5 a 10 años. También en estos casos existen algunos prototipos, pero sólo a escala experimental, aunque ya pueden resultar económicamente competitivos en emplazamientos seleccionados.

PRODUCCION DE FUERZA MOTRIZ: Existe experiencia en motores a ciclo térmico de baja temperatura, usando colectores planos similares a los utilizados en calentamiento de agua. Ha tenido amplia difusión el sistema que usa estos motores para la extracción de agua ¹⁵⁾ (Fig. 4.2b), encontrándose instalados equipos similares, entre otros lugares, en Mauritania, Niger, Senegal, Argelia y Túnez. Sin embargo, aún es necesario lograr que estos equipos sean competitivos en lugares no tan apartados como aquellos en los que actualmente están instalados. El Commissariat à l'Energie Atomique de Francia está efectuando desarrollos en estos sistemas.

Es posible utilizar motores que trabajen con fluidos a mayor temperatura, pero para ello es necesario desarrollar dispositivos que, con o sin concentración, permitan lograr a precios competitivos temperaturas mayores que las alcanzables con colectores planos.

HORNOS SOLARES: Su factibilidad ha sido demostrada con el conocido ¹⁶⁾ horno solar de Odeillo, en los Pirineos franceses, el cual permite alcanzar temperaturas del orden de 3800 C con una potencia térmica de 1 MW (Fig. 4.3). Su importancia radica, entre otras cosas, en que permite obtener temperaturas elevadas en atmósfera limpia, lo cual es requerido, por ejemplo, para la producción de aleaciones con muy alto grado de pureza.

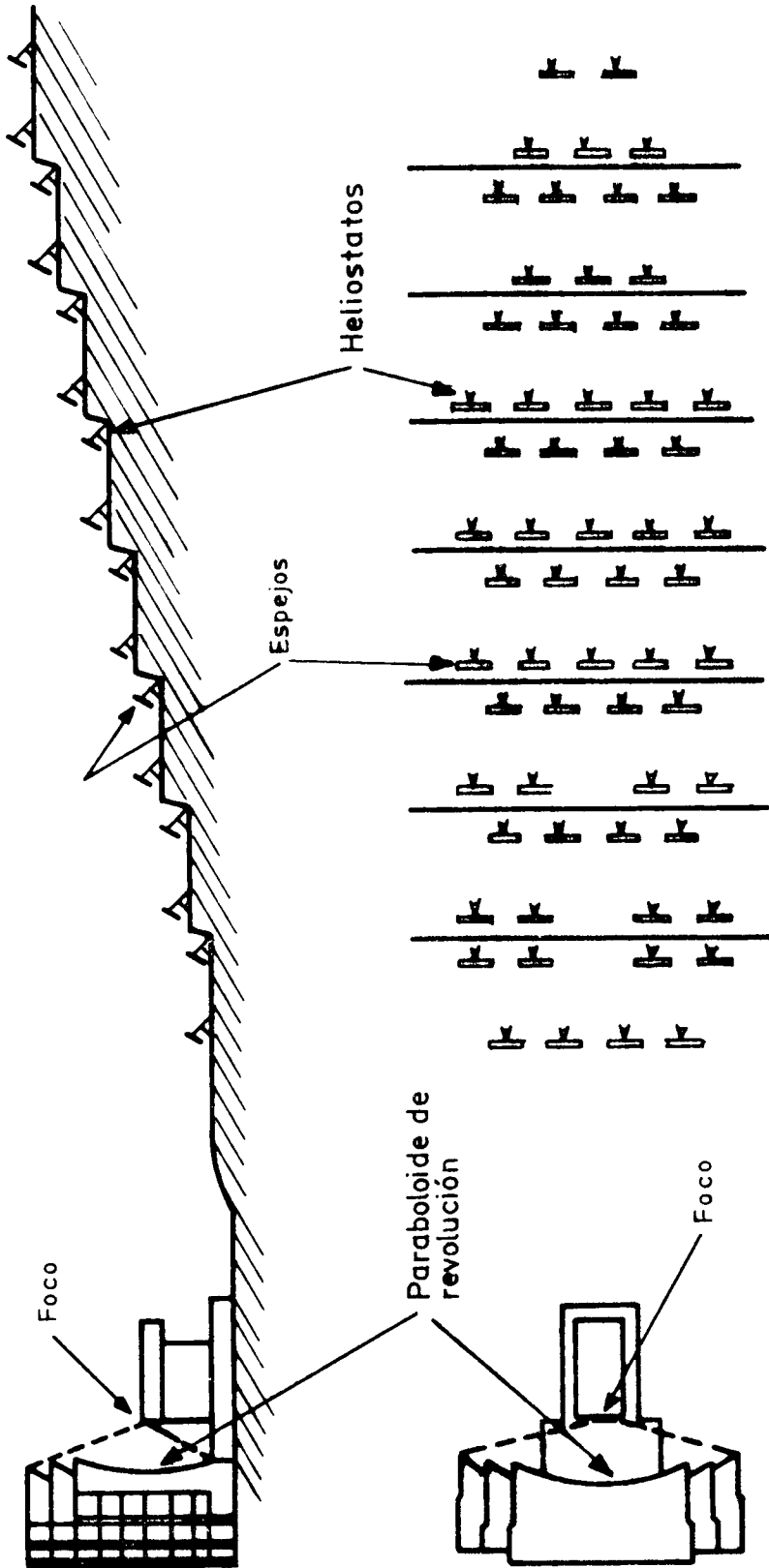


Fig. 4.3: Horno solar. Disposición del horno solar existente en Odeillo, en los Pirineos franceses. La radiación solar incidente sobre una superficie de 2520 m^2 es reflejada por 60 espejos hacia un paraboloide de revolución formado, a su vez, por 9500 espejos curvados. El paraboloide tiene 40 m de altura, $5\frac{1}{4} \text{ m}$ de ancho y una longitud focal de 18 m . Para 1 kW/m^2 de radiación solar se obtiene, en el foco, una potencia superior a los 1000 kW ter y una temperatura de 3800 C . De Ref.16.

REFRIGERACION DE EDIFICIOS: Es una de las aplicaciones que puede difundirse más fácilmente cuando se haya logrado un sistema satisfactorio, dado que en los lugares donde hay mayor radiación solar es donde más se lo necesita. Se han desarrollado diferentes sistemas, basándose algunos en el uso del cambio de fase de sales eutécticas y, otros, en la generación de vapor por concentración ¹⁷⁾ y su posterior utilización para accionar máquinas compresoras.

ARQUITECTURA SOLAR: El objetivo consiste en efectuar diseños arquitectónicos destinados a aprovechar al máximo las posibilidades de iluminación, calefacción, refrigeración y provisión de agua caliente que brinda la energía solar, siendo importante diferenciar esto de la simple adición de dispositivos que utilicen energía solar a los edificios de diseño tradicional. A nuestro criterio, su clasificación como de mediano plazo es originada en buena medida porque requiere una adaptación mental de la generalidad de los arquitectos y usuarios, más que un desarrollo de nuevos componentes.

COMBUSTIBLES SINTETICOS A PARTIR DE MATERIALES ORGANICOS: Se espera alcanzar dentro de este plazo el desarrollo de sistemas económicos que permitan producir y convertir materiales orgánicos a combustibles líquidos, gaseosos o sólidos. Los procesos involucrados pueden ser bioconversión de materiales orgánicos a metano, pirólisis de materiales orgánicos, reducción química a aceites, etc..

Aplicaciones a largo plazo

Las únicas aplicaciones a largo plazo en que, según nuestras referencias, se está trabajando, son las de producción de energía eléctrica por conversión de la energía solar mediante diversos métodos: conversión fototérmica y fotovoltaica, energía eólica, gradiente de temperatura de los océanos. Se considera que no van a ser comercialmente competitivas en un plazo inferior a 10 ó 15 años. Su aplicación antes del período mencionado solamente puede justificarse para casos muy particulares, como ser zonas donde, por problemas de distancia, el uso de combustibles convencionales es muy costoso.

Es posible que el sistema de conversión fototérmico (Parte III de este informe) llegue a ser competitivo antes que el fotovoltaico (Parte IV de este informe), si bien en este campo se están ensayando nuevas técnicas que, de tener éxito, significarán una considerable disminución de costos. Los sistemas basados sobre la utilización del gradiente de temperatura de los océanos ¹⁸⁾ son los que, a nuestro juicio, demandarán mayor tiempo de concreción.

4.2. PROGRAMAS DE APLICACION DE LA ENERGIA SOLAR Y PRESUPUESTOS ASIGNADOS.

Lo mencionado en el punto anterior se concreta mediante programas nacionales existentes en numerosos países, como, por ejemplo, Australia, Inglaterra, Israel, Rusia, EE.UU. de N.A. y Japón. Dado que para los dos últimos poseemos información detallada sobre sus objetivos y presupuestos asignados, damos a éstos como ejemplos ilustrativos de la importancia relativa asignada a la energía solar dentro del campo de las nuevas fuentes energéticas.

A. EE.UU. DE NORTEAMERICA

A fines de 1972, un grupo de expertos en energía solar, coordinados por la National Science Foundation (NSF) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA), realizaron una evaluación de la energía solar como recurso nacional de energía, proponiendo ¹⁹⁾ un programa nacional de investigación y desarrollo. Al constituirse en 1974 la Energy Research and Development Administration (ERDA), la cual absorbió, entre otras instituciones, parte de la NSF, hizo suyo el programa de energía solar ²⁰⁾ anteriormente presentado.

Programa

Está dividido en 6 subprogramas, cuyos objetivos y campos de acción resumimos a continuación.

CALEFACCION Y REFRIGERACION DE EDIFICIOS: Además de la utilización de los sistemas de calefacción y refrigeración con energía solar en todo tipo de edificios, se espera extender los resultados a aplicaciones tales como secado de granos, invernaderos, refugios de animales y calentamiento de agua para un extenso rango de necesidades domésticas e industriales.

CONVERSION FOTOTERMICA: Está destinado a proveer, para mediados de 1980, una base tecnológica completa para (a) la producción de energía eléctrica a fin de satisfacer parte de la demanda en el modo de seguimiento de carga, (b) sistemas de generación para satisfacer las necesidades energéticas totales de complejos urbanos, comunidades rurales y parques industriales.

CONVERSION FOTOVOLTAICA: Su objetivo es desarrollar sistemas de generación de potencia eléctrica sobre la base de células fotovoltaicas para aplicaciones terrestres. La primera fase del subprograma está destinada a disminuir los costos en un factor ~ 50 para comienzos de la próxima década.

ENERGIA EOLICA: Los objetivos específicos a 5 años involucran la operación y evaluación de sistemas de 100 kW_e y diseño, construcción, operación y evaluación de sistemas a escala de MW_e, así como el estudio de sistemas

para producir hidrógeno en mar abierto por electrólisis.

BIOCONVERSION A COMBUSTIBLE: Tiene por finalidad demostrar, para mediados de 1980, la conveniencia de producir comercialmente materiales orgánicos para luego convertir a éstos y otros productos corrientemente considerados como basura en combustibles limpios u otras formas útiles de energía no contaminante.

CONVERSION DE LA ENERGIA TERMICA DE LOS OCEANOS: El objetivo es proveer, para comienzo de la próxima década, las bases tecnológicas que permitan diseñar, construir y operar una planta de demostración para producir electricidad, basada en el uso del gradiente térmico de los océanos.

Presupuestos

Los fondos que la NSF y, actualmente, la ERDA han provisto a terceros para desarrollar aplicaciones terrestres de la energía solar, han ido variando abruptamente en los últimos años. Hasta el año fiscal [†] 1971 inclusive, se puede considerar que eran muy pequeños, menos de un millón de dólares anuales para todo el programa. A partir de esa fecha, los presupuestos para cada uno de los subprogramas se incrementaron de acuerdo a las prioridades establecidas. En la Fig. 4.4 hemos graficado para cada uno de los subprogramas, los presupuestos correspondientes a partir de 1971, 1972 ó 1973, según sea el caso. Los presupuestos del año 1975 son valores estimados y constituyen la suma de lo que aún administra la NSF (7 millones de U\$S en total) y lo que fue transferido a la ERDA. Los presupuestos para el año fiscal 1976 corresponden a lo solicitado por la ERDA.

Los fondos provistos a terceros por otras instituciones gubernamentales son poco significativos. Por ejemplo, en el año fiscal 1974 el total de fondos para energía solar en general asignados por la NASA, la AEC, el Department of Housing and Urban Development y el Department of Defense, alcanzó a 2,35 millones de dólares. Por otra parte, algunas instituciones gubernamentales, como por ejemplo la NASA, realizan investigaciones propias en energía solar, pero no disponemos de información sobre los presupuestos asignados a dichos trabajos. En cuanto a los fondos invertidos por la industria privada, se estiman en aproximadamente 1 a 2 veces los invertidos por la NSF y la ERDA.

Como resumen, podemos estimar que para el año fiscal 1976 los fondos disponibles para desarrollos en el aprovechamiento de la energía solar en EE.UU.

[†] En EE.UU. de N.A., el año fiscal se identifica por el año calendario en que finaliza. El año fiscal 1976 abarca desde el 1° de Julio de 1975 al 30 de Junio de 1976.

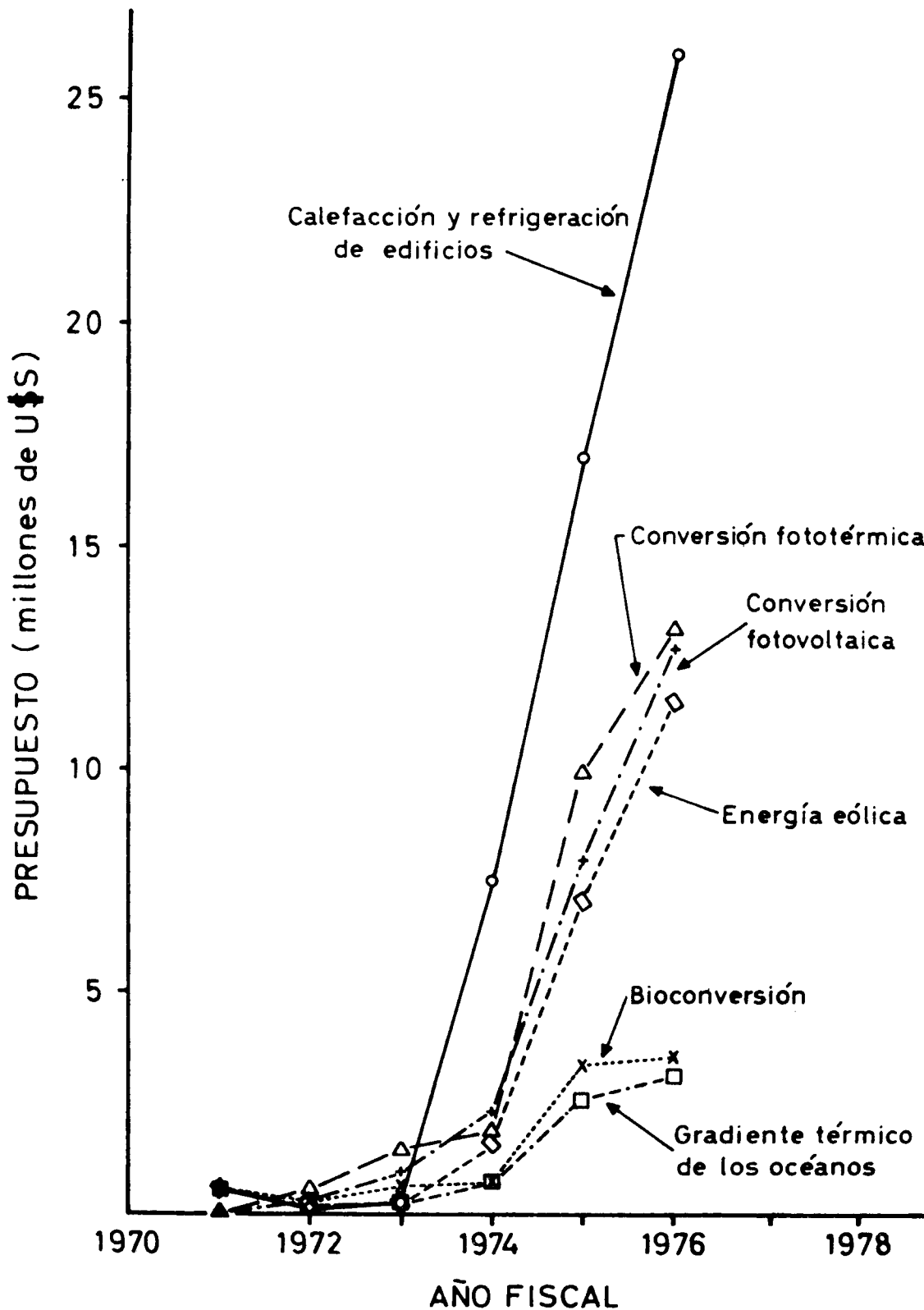


Fig. 4.4: Presupuestos provistos a terceros por la NSF y la ERDA a partir del año fiscal 1971. Los datos para los años 1971-74 fueron obtenidos de las Refs. 21 y 22. Los datos del año fiscal 1975 fueron estimados por nosotros, combinando los dados por la NSF y la ERDA (Refs. 21 y 23). Los valores para 1976 son los solicitados por la ERDA y, eventualmente, serán incrementados al doble, según propuestas del Subcomité de Investigaciones Energéticas del Comité de Ciencias de la Cámara baja del Congreso de los EE. UU. de N.A. (Refs. 23 y 24).

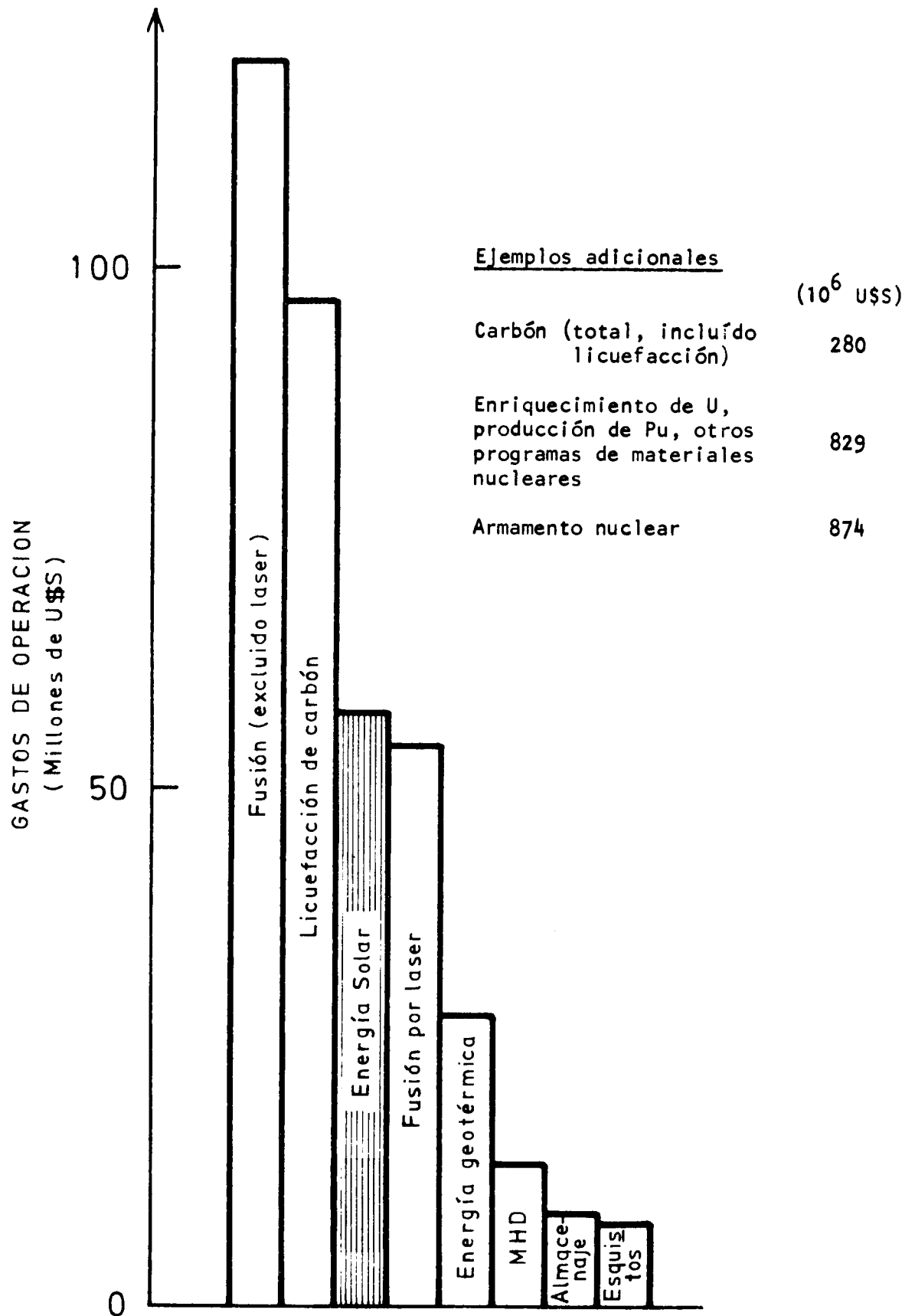


Fig. 4.5: Presupuestos solicitados por la ERDA para gastos de operación de ocho programas durante el año fiscal 1976. Los datos son actualizados a febrero-marzo de 1975. Además, para cada programa se deben considerar los gastos en instalaciones y equipos que no poseemos en detalle; si se considera la totalidad de los programas de la ERDA, los gastos en instalaciones y equipos son aproximadamente el 22 % de los gastos de operación. De Refs. 25 y 26.

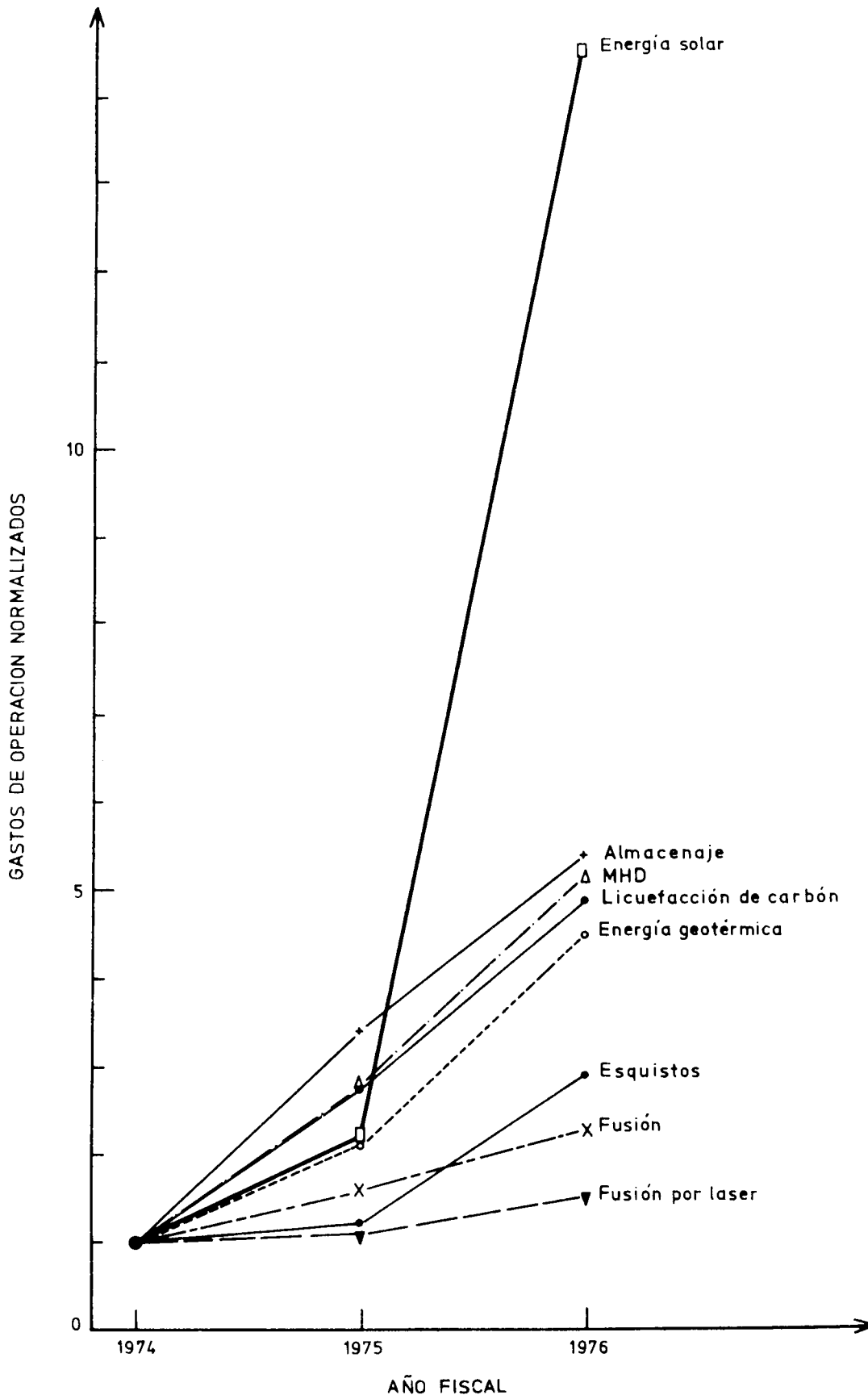


Fig. 4.6: Gastos de operación normalizados al año 1974, a fin de mostrar el incremento relativo de las inversiones. Los presupuestos para los años fiscales 1975 y 1976 son valores estimados por la ERDA. De Ref. 25.

de N.A. no serán menores que ~ 160 millones de dólares, si se tienen en cuenta tanto los de origen gubernamental cuanto privado.

A fin de mostrar la importancia relativa del programa de energía solar dentro de los programas energéticos de la ERDA, en la Fig. 4.5 graficamos los presupuestos solicitados ^{25,26)} para gastos de operación de ocho programas durante el año fiscal 1976. Como datos adicionales, damos las inversiones previstas por la ERDA, en el mismo período, para desarrollo de algunos métodos convencionales: carbón, enriquecimiento de U, producción de Pu y otros programas de materiales nucleares. También incluimos la inversión prevista en armamentos nucleares. En la Fig. 4.6, hemos graficado los gastos de operación para los ocho programas, normalizados al año fiscal 1974, a fin de mostrar el incremento relativo de las inversiones propuestas. Es evidente que existe una clara decisión de desarrollar intensamente los aprovechamientos de la energía solar.

B. JAPON

La Agencia de Ciencia y Tecnología Industrial del Ministerio de Comercio e Industria del Japón ha implementado recientemente un plan de investigación y desarrollo denominado "Sunshine Project", el cual abarca el período 1974-2000 y los campos de energía solar, energía geotérmica, licuefacción y gasificación de carbón y producción de hidrógeno.

Programa

El programa ^{27,28)} de energía solar ha sido dividido en tres subprogramas:

DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA SISTEMAS DE GENERACION DE ELECTRICIDAD:

- (a) Conversión fototérmica: Dentro del período 1974-1980, se propone desarrollar un sistema piloto de 1 MW de potencia pico, así como el diseño conceptual de un sistema piloto de 10 MW de potencia pico.
- (b) Conversión fotovoltaica: Este subprograma está orientado a reducir en un factor 100 el costo de la electricidad generada por sistemas de conversión fotovoltaica, lo cual se propone lograr en 1990.
- (c) Otros: Destinado a investigaciones para obtener aplicaciones prácticas de otros métodos de generación de potencia a partir de energía solar, como ser conversión termoiónica y generación de potencia en el espacio.

DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA CALEFACCION Y REFRIGERACION DE EDIFICIOS Y

SUMINISTRO DE AGUA CALIENTE: Se propone desarrollar, durante el período 1974-1980, sistemas altamente económicos para los fines enunciados, aplicables a todo tipo de edificios. Para el año 1990, se espera tener desarrollados sistemas regionales de calefacción y refrigeración.

DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA NUEVAS APLICACIONES DE ENERGIA SOLAR: Abarca fuentes de calor para usos industriales, hornos solares, etc., como también investigaciones tendientes a clarificar la relación entre tecnología solar y problemas económicos, sociales y de medio ambiente.

Presupuesto

Los presupuestos ²⁹⁾ para el año fiscal 1974, otorgados por la Agencia de Ciencia y Tecnología Industrial para cada uno de los programas del "Sunshine Project", son:

Programa	Millones de U\$S
Energía solar	2,9
Energía geotérmica	1,9
Gasificación y licuefacción de carbón	1,5
Producción de hidrógeno	1,1

La distribución de presupuestos muestra claramente que el programa de energía solar es prioritario.

El presupuesto solicitado para el año fiscal 1975 para el programa de energía solar fue de 4 millones de U\$S.

REFERENCIAS

- 1) M.P.Thekaekara, Solar Energy 14, 109 (1973).
- 2) J.Gretz, Energia Nucleare 21, 504 (1974).
- 3) Cuaderno N°1 de la Association Française pour l'Etude et le Développement des Applications de l'Energie Solaire (A.F.E.D.E.S.), (Enero 1968).
- 4) M.C.Kurlat y R.O.Fernández, Acta Scientifica N°19 del Observatorio de Física Cósmica, San Miguel (Bs. As.), (1970).
- 5) "Statistical Yearbook 1973", United Nations, New York (1974).
- 6) H.Lustig, El Correo de la UNESCO, pág. 4, (Enero 1974).
- 7) P.B.Bos, W.A.Kammer y E.Blond, "Solar-Thermal Conversion Mission Analysis-Southwestern United States", Informe ATR-74(7417-16)-2, Vol. 1, de The Aerospace Corporation, California, EE.UU. de N.A. (1975).
- 8) Boletín Mensual, Secretaría de Estado de Energía, Buenos Aires, (Diciembre 1974).
- 9) B.J.Csik, H.M.Marrero y H.Sarraillet, "Análisis Electroenergético Argentino", Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, (1974).
- 10) E.S.Crivelli, J.L.Guerrero y A.Pedregal, "Solar Radiation and Solar Energy in Argentina", E 24, Congreso Internacional "El Sol al Servicio del Hombre", París, Francia, (Julio 1973).
- 11) Centro de Investigaciones Energéticas, Servicio Informativo N°3, Buenos Aires, (Febrero 1973).
- 12) W.C.Dickinson, "Large-Scale Industrial Application of Solar Energy", Informe del Grupo de Energía Solar del Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, EE.UU. de N.A. (1975).
- 13) G.Frick y J.Hirschmann, Solar Energy 14, 405 (1973).
- 14) J.Fournier, en Actas de la XIX reunión de la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada, (Agosto 1972).
- 15) H.Masson y J.P.Girardier, Bulletin de la Coopération Méditerranéenne pour l'Energie Solaire (COMPLES) N°10, 103 (1966).
- 16) F.Trombe y A. Le Phat Vinh, Solar Energy 15, 57 (1973).
- 17) J.G.Cottingham y G.K.Green, "Solar Powered Steam Supplement for the BNL Steam Plant", Informe BNL 18734 del Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, EE.UU. de N.A. (1974).
- 18) C.Zener, Physics Today 26, N°1, 48, (1973).
- 19) P.Donovan, W.Woodward, W.R.Cherry, F.H.Morse y L.O.Herwig, "An Assessment of Solar Energy as a National Energy Resource", preparado por un panel de especialistas en energía solar coordinados por la NSF y la NASA, EE.UU. de N.A. (1972).
- 20) "Solar Energy Program", Informe ERDA-15 de la División de Energía Solar de la Energy Research and Development Administration, Washington, EE.UU. de N.A. (Marzo 1975).
- 21) L.O.Herwig, "Report on Photovoltaics Research and Technology in the United States", pág. 29, Conferencia Internacional sobre "Generación de Potencia por Medios Fotovoltaicos", Hamburgo, República Federal Alemana, (Setiembre 1974).

- 22) L.O.Herwig, "NSF/RANN Solar Energy Research Grants and Contracts in Fiscal Year 1974", Washington, EE.UU. de N.A. (1974).
- 23) Solar Energy Intelligence Report 1, 2 (1975).
- 24) Solar Energy Intelligence Report 1, 11 (1975).
- 25) Nucleonics Week 16, N°6, 1 (1975).
- 26) Nuclear News 18, N°4, 28 (1975).
- 27) "Sunshine Project", Informe BI-3(74-9) del Ministerio de Comercio Internacional e Industria, Tokio, Japón (1974).
- 28) "Sunshine Project, Indicative Plan and Implementation Plan for the First Stage". Informe 49-10-1721 del Ministerio de Comercio Internacional e Industria, Tokio, Japón (1974).
- 29) F.Ishikawa, pág. 43, Conferencia Internacional sobre "Generación de Potencia por Medios Fotovoltaicos", Hamburgo, República Federal Alemana, (Setiembre 1974).

PARTE II

CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD

I N D I C E

5. <u>INTRODUCCION</u>	1
6. <u>CONVERSION FOTOTERMICA</u>	3
6.1. DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMA DE CONVERSION	3
6.2. CARACTERISTICAS TECNICAS	7
- Eficiencias	9
- Tamaños	9
- Transporte de la energía térmica entre el convertidor de energía solar a térmica y la turbina	11
- Almacenaje de energía	13
- Parámetros indicativos del comportamiento técnico de centrales solares	14
6.3. ANALISIS ECONOMICO	15
6.3.1. Costos de componentes	15
- Costos de componentes por kW_e nominal instalado	15
- Comparación de inversiones iniciales para centrales solares y convencionales	17
- Costos de sistemas de almacenaje de energía	17
6.3.2. Costos del $kW_e h$	17
- Centrales solares puras	19
- Centrales solares híbridas	19
- Competividad con centrales convencionales	21
7. <u>CONVERSION FOTOVOLTAICA</u>	25
7.1. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LAS CELULAS FOTOVOLTAICAS	27
7.1.1. Principios de funcionamiento	27
- Eficiencia de conversión	29
7.1.2. Estado actual de desarrollo de las tecnologías de fabricación	29
- Células de Si	31
- Células de CdS/Cu_xS	39
- Otros tipos de células	39
7.2. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION	43
- Operación de células con radiación solar concentrada	43
- Almacenaje, conversión a corriente alterna y distribución de la energía generada	44

- Eficiencias, tamaños y comportamiento de centrales fotovoltaicas	45
- Análisis de sistemas fotovoltaicos	45
- Centrales ubicadas en el espacio	45
7.3. ANALISIS ECONOMICO	46
7.3.1. Costos de componentes	46
- Células, módulos y paneles	47
- Células de Si	49
- Células de CdS/Cu _x S	52
- Paneles	52
- Costo energético	53
- Sistemas concentradores	53
- Sistemas de almacenaje y conversión	54
7.3.2. Costos comparativos del kWh en sistemas fotovoltaicos	55
7.3.3. Disponibilidad y toxicidad de materiales fotovoltaicos	56
8. <u>SINTESIS Y CONCLUSIONES</u>	59
<u>REFERENCIAS</u>	67

5. INTRODUCCION

Como señalamos en la Nota Preliminar, 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 intermediarias 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 o en los mares genera energía mecánica en forma de desplazamientos de grandes masas de aire (energía eólica) o de agua (energía de las olas), como también un significativo y aprovechable gradiente de temperatura en las capas oceánicas superiores 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 al proceso interviniente, podemos definir dos grandes grupos de conversores: directos e indirectos. En el primero figuran los termoiónicos, termoeléctricos y fotovoltaicos, de los cuales los dos primeros utilizan la energía solar como fuente de calor[†], mientras que en el último los fotones entregan energía a los electrones de valencia para llevarlos a la banda de conducción, generando así una corriente eléctrica. En el segundo grupo sólo incluimos los sistemas fototérmicos, en los que la energía solar es entregada a un fluido que acciona un turbogenerador.

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. En el presente estudio sólo consideraremos los sistemas de conversión fototérmica acoplados a turbogeneradores y de conversión fotovoltaica, puesto

[†] En la conversión termoiónica se calienta un cátodo que emite electrones y en la termoeléctrica, una de las junturas de un par metálico.

que actualmente son los más desarrollados en cuanto a posibilidades para concretar económicamente la generación masiva de electricidad, aspecto al que, por otra parte, nos limitaremos. Cabe tener presente, sin embargo, que a nivel de laboratorio, las conversiones termoiónica y termoeléctrica de la radiación solar son motivo de numerosas investigaciones y que lo mismo ocurre para la producción no convencional y económicamente redituable de hidrógeno.

Ni la conversión fototérmica ni la fotovoltaica poseen efectos perniciosos sobre el medio ambiente dignos de mencionar. Además, las tecnologías involucradas en su desarrollo hasta el grado de centrales solares de electricidad, no son complejas, particularmente si se las compara con las fuentes a combustibles nucleares, y están al alcance de países de desarrollo tecnológico medio como lo es la República Argentina. Sin embargo, como indicamos en la Nota Preliminar, en este estudio no evaluamos explícitamente la factibilidad de instalar dichas centrales en nuestro país.

Sólo tenemos conocimiento de dos estudios previos efectuados en la Argentina referentes a la generación de electricidad a partir de energía solar. El Dr. Pablo de Vago publicó ¹⁾ hacia fines de la década de 1960 un detallado análisis de una central con concentradores cilíndrico-parabólicos. En 1970, el Ing. Luis E. Funes, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, realizó ²⁾ para la Empresa Nacional de Agua y Energía Eléctrica un estudio similar al presente, con numerosa información, fundamentalmente en lo referente a conversión fototérmica.

6. CONVERSION FOTOTERMICA

El método de generación de electricidad por conversión fototérmica de la energía solar, se basa en el empleo de la energía térmica obtenida para la producción de un fluido apto para accionar turbinas convencionales. 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 denominado "específicamente solar", y los turbogeneradores que, con ligeras modificaciones para adaptarlos al concepto solar, constituyen el "subsistema convencional".

A la fecha de cierre de este estudio, la única realización de un sistema especialmente concebido para la conversión de energía solar en térmica a fin de generar electricidad, es el que funciona ³⁾ desde 1968 en St. Ilario-Nervi, Génova. El sistema produce vapor a 600 C y 150 atmósferas y tiene una potencia térmica de 160 kW_t. Por otra parte, al presente el ejemplo más significativo de concentración de energía solar en gran escala es el horno solar de Odeillo, Francia, en funcionamiento ⁴⁾ desde 1970 (ver Fig. 4.3); en las horas de máxima intensidad solar, se logra con él una potencia de 1000 kW_t y una temperatura de 3800 C.

Limitamos nuestro análisis a la información concerniente a centrales diseñadas exclusivamente para la generación de electricidad en gran escala, no considerando algunas propuestas de plantas mixtas, generadoras de servicios múltiples para pequeñas comunidades (como ser: electricidad, agua caliente, refrigeración y calefacción de edificios).

6.1. DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION

Para realizar los procesos involucrados en lo que hemos llamado subsistema solar se han propuesto varios dispositivos, cada uno con características técnicas propias que deben tenerse en cuenta en el análisis técnico-económico final. Nos restringiremos a describir dichas características para los sistemas cuyo desarrollo se considera en programas actualmente en marcha o a ser iniciados en el futuro cercano. No incluimos la concentración de radiación a través de lentes en lugar de espejos, pues no tenemos datos sobre ningún programa que incluya esta variante.[†]

[†] Un sistema de este tipo, basado en lentes de Fresnel, fue propuesto por A.B. Meinel y M.P. Meinel ⁵⁻⁷⁾; actualmente no tenemos noticias de que dicho programa siga desarrollándose.

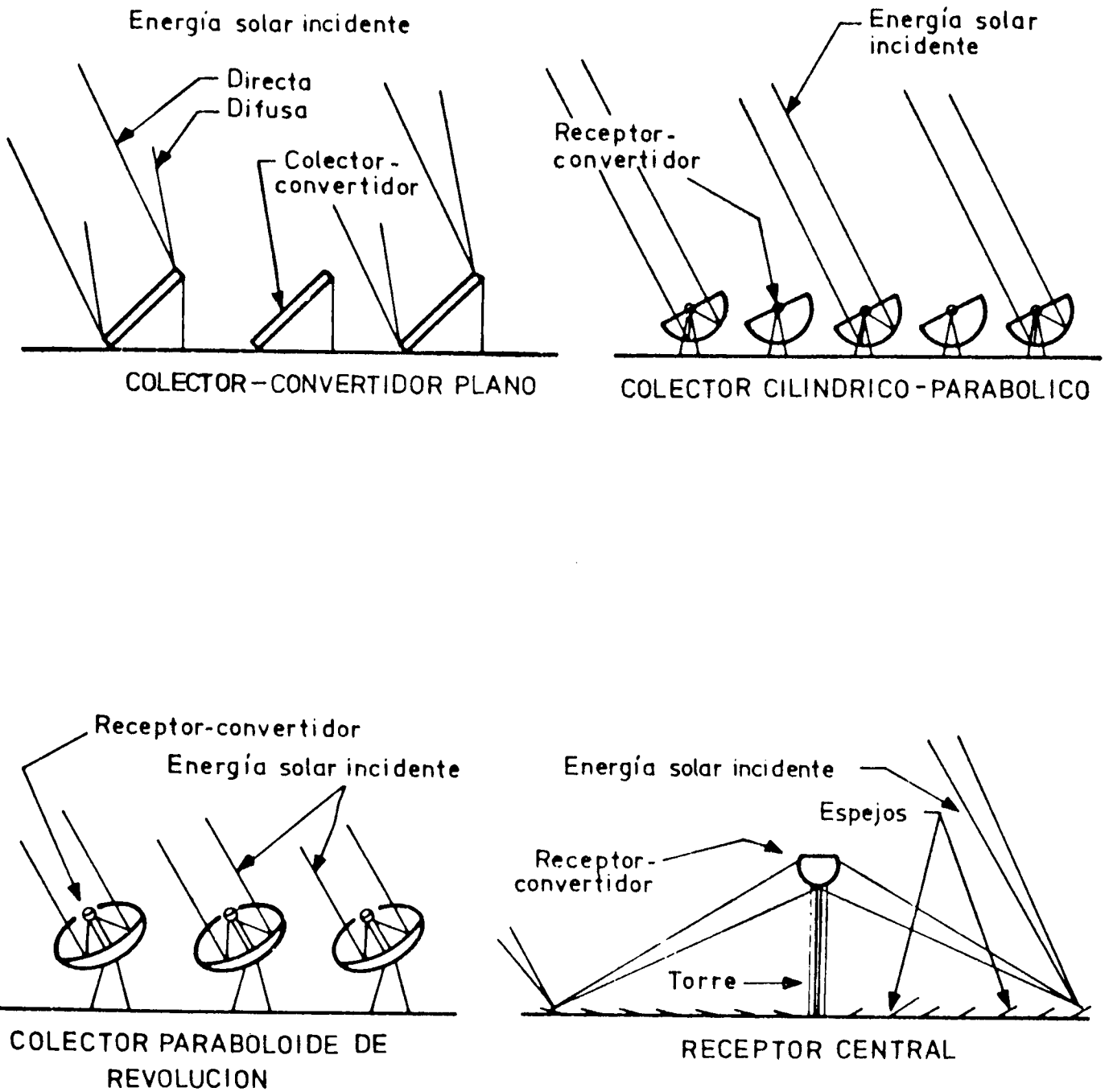


Fig. 6.1: Representación esquemática de los distintos sistemas de conversión de energía solar en térmica. De Ref. 8.

Todos los proyectos de los cuales tenemos conocimiento se basan en alguno de los siguientes cuatro sistemas de colección de la energía solar y su posterior conversión a térmica, ilustrados en la Fig. 6.1:

- (a) sistema de colectores-convertidores planos;
- (b) sistema de concentradores cilíndricos;
- (c) sistema de concentradores paraboloídes de revolución;
- (d) sistema a receptor-convertidor central (o sistema de torre central).

El sistema de colectores-convertidores planos ^{9,10} está formado (ver Fig. 4.1) por un conjunto de módulos, cada uno de los cuales colecta y convierte la radiación solar global que llega sobre una superficie de varios m^2 y la transforma en energía térmica in situ. Cada módulo se instala en forma horizontal o inclinado en un ángulo cercano a la latitud del lugar; en este último caso se aconseja realizar un ajuste de la inclinación de acuerdo a las estaciones. Dado que este sistema sólo puede alcanzar temperaturas bajas (no mayor de 180 C) el calor generado se utiliza para producir vapor con un fluido secundario de presión relativamente alta (por ej. freón 11 (CCl_3F)).

El sistema de concentradores cilíndricos está formado por un conjunto de módulos, cada uno de los cuales concentra en su eje focal la energía incidente sobre una superficie de varios metros cuadrados. Se pueden distinguir dos tipos: (a) concentrador móvil de sección parabólica ¹¹ (en cuyo caso el receptor de los rayos concentrados, ubicado en el foco, está fijo) o (b) concentrador fijo a espejo facetado ¹² (en este caso el receptor es el que se mueve siguiendo el desplazamiento aparente del Sol). En los sistemas constituidos por concentradores paraboloídes de revolución ¹³, éstos concentran la radiación solar directa que incide sobre una superficie de varios m^2 en una pequeña zona (foco del paraboloíde), donde se convierte en energía térmica. Dado que los dos sistemas precedentes están constituidos por un gran número de unidades, la conversión se considera realizada en "forma distribuida" a lo largo de un extenso campo de colección.

Finalmente, en el sistema a receptor central ^{3,14-16} la idea básica consiste en concentrar por medios ópticos, en una zona relativamente pequeña (pocos metros cuadrados), la radiación solar directa incidente sobre una gran superficie (1-2 km^2). Esto se realiza mediante un conjunto de espejos planos o curvos montados sobre heliostatos y convenientemente distribuidos, que reflejan la radiación solar que llega a ellos hacia un receptor ubicado en la cúspide de una torre. La radiación solar así concentrada puede ser convertida en

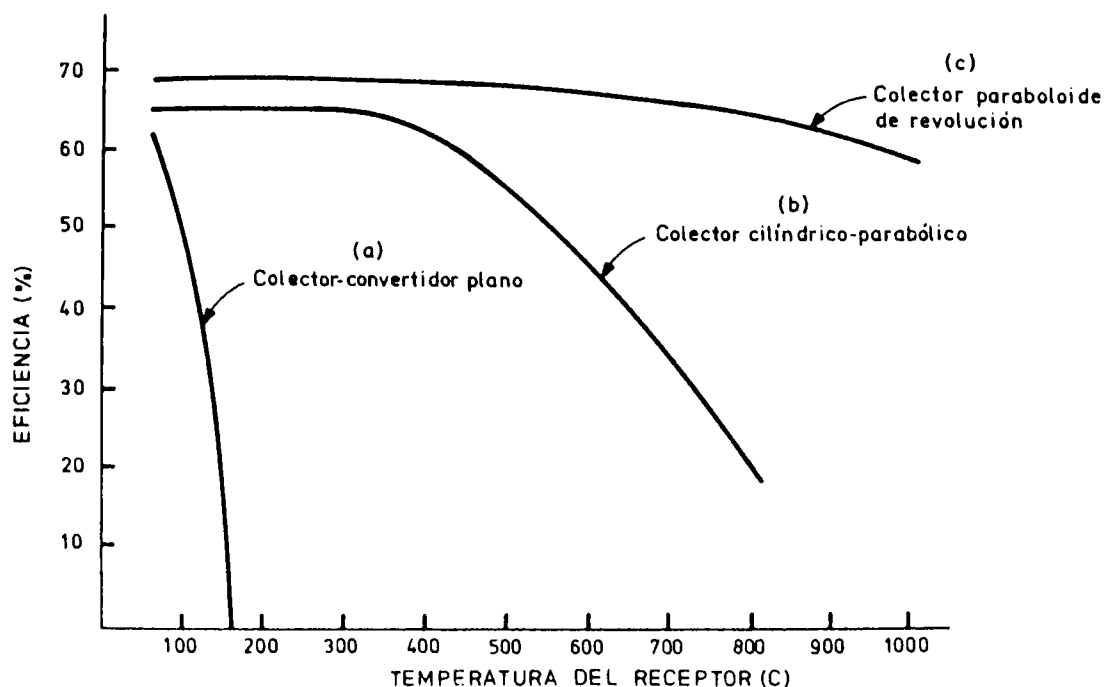


Fig. 6.2: Relación existente entre las temperaturas alcanzables con colectores planos, cilíndrico-parabólicos y paraboloide de revolución y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica. Los receptores correspondientes a las curvas (a) y (b) están recubiertos con superficies selectivas cuya relación entre coeficiente de absorción y de emisión vale 10. De Ref. 17.

Tabla 6.1

Características de los distintos sistemas de colección y conversión de energía solar en energía térmica

Características Sistemas	Radiación solar utilizada	Sistema de movimiento	-Colección -Conversión a)	Tipo de energía transportada	Temperatura alcanzable b)
Colector-conversidor plano	Global (directa + difusa)	Sistema fijo o de ajuste estacional	-Sin concentración -Distribuida	Térmica	~ 180 C
Concentrador cilíndrico	Directa	Movimiento alrededor de un eje	-Con concentración -Distribuida	Térmica	~ 450 C con eficiencia de ~ 60 %
Concentrador paraboloide de revolución	Directa	Movimiento alrededor de dos ejes	-Con concentración -Distribuida	Térmica	~ 1000 C con eficiencia de ~ 60 %
Receptor central	Directa	Movimiento alrededor de dos ejes	-Con concentración -Centralizada	Lumínica	~ 1000 C, con eficiencia de ~ 60 %

a) Ver Fig. 6.1.

b) Ver Fig. 6.2.

energía térmica en ese mismo lugar o retransmitida por medios ópticos a otro punto ubicado a nivel de tierra. La conversión es, por consiguiente, no distribuida.

Cada sistema, en el orden mencionado, tiene aparejado un grado de complejidad creciente en cuanto al sistema de movimiento de los colectores. Los colectores planos pueden estar fijos o ser ajustados estacionalmente. En los otros tres casos es necesario seguir el movimiento aparente del Sol en forma continua. El concentrador cilíndrico sólo requiere un grado de movimiento. Los sistemas de concentradores parabólicos de revolución o a receptor central, en cambio, requieren un sistema de movimiento en dos direcciones.

Los tres primeros sistemas convierten la energía solar en térmica en la ubicación de cada uno de ellos en el campo de colección, debiéndose transportar dicha energía térmica hasta un receptáculo cercano al turbogenerador o al sistema de almacenaje, resultando en algunos casos distancias del orden de 1 km; por lo tanto se requieren sistemas de transporte con alto grado de aislación térmica. El sistema a receptor central, por el contrario, colecta la radiación solar y la transmite por medios ópticos (la refleja) hasta un punto cercano al turbogenerador, donde es convertida en energía térmica.

La temperatura máxima 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. En la Fig. 6.2 se muestra la relación existente entre las temperaturas alcanzables con colectores planos, cilíndricos y parabólicos de revolución y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica. El sistema a receptor central se comporta en forma similar a la que caracteriza al de parabólico de revolución, pudiéndose alcanzar temperaturas elevadas con buena eficiencia.

En la Tabla 6.1 se han resumido algunas de las características principales de los cuatro sistemas de colección y conversión descriptos.

6.2. CARACTERISTICAS TECNICAS

A fin de evaluar cada uno de los sistemas descriptos y realizar un estudio comparativo del costo del kW_eh en los bornes de salida de las centrales, se deben tener en cuenta varios factores, a saber:

- (a) eficiencia total de la central (eficiencia del subsistema solar y del subsistema del ciclo térmico);

Tabla 6.2

Características técnicas de los distintos sistemas de conversión a)

Sistema	Potencia (MW _e)	Temperatura (C)	Eficiencia (%)			Area cubierta por colectores (km ²)			
			Subsist. solar	Subsist. convenc.	Total	Central solar pura			Central híbrida
						Base (12 h.)	Seguim. (6 h.)	Punta (3 h.)	
Colector convertidor plano b)	10	60-75 c)	38	8,8	3	1,3			
Cilíndrico { Polar parabólico N-S d) E-O	100	320	47	32	15	~ 2,0	~ 1,3		
	100	320 e)	42	32	13	~ 3,0	~ 2,0		
	100	320	35	32	11	~ 3,0	~ 2,0		
Paraboloide de d) revolución	100	430 e)	51	34	17	~ 1,8	~ 1,2		
Receptor d) central	100	480 e)	53	36	19	1,5	1,0	0,5	0,5

a) Para todos los casos la intensidad total de la radiación es similar: ~ 6kWh/m² ó ~ 250 W/m². Para cada modo de operación de las centrales se dan, entre paréntesis, las horas de almacenaje.

b) Datos de Ref. 10.

c) Temperatura del fluido de transporte de energía térmica a la salida del convertidor de energía solar en térmica.

d) Datos de Ref. 8.

e) Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del turbogenerador.

- (b) intensidad de la radiación solar (valores promedios mensuales y anuales);
- (c) potencia de la central;
- (d) modo de operación de la central (base, seguimiento de carga o punta);
- (e) que la central sea únicamente solar (para lo cual, de acuerdo al modo de operación, necesita una cierta capacidad de almacenaje de energía) 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 primer punto es una característica que depende del sistema de colección y conversión que se considera. En función de él y de las condiciones impuestas en los demás puntos, queda determinada el área a cubrir para colectar la energía necesaria que satisface las mismas.

EFICIENCIAS

Si bien lo importante es la eficiencia total del sistema conversor de la energía solar en electricidad, es conveniente dar por separado las eficiencias del subsistema típicamente solar (conversión de energía solar a térmica) y del subsistema convencional (turbogenerador). Las eficiencias parciales de algunas partes componentes del subsistema solar varían a lo largo del día y con las épocas del año, por lo cual los valores dados (Tabla 6.2), tanto para el subsistema solar cuanto para el sistema completo, son promedios anuales.

Para el caso de sistemas con concentradores cilíndricos la eficiencia del sistema depende bastante fuertemente de la orientación del eje de movimiento y de la inclinación, pudiéndose considerar tres casos: eje de movimiento orientado en la dirección N-S e inclinado en un ángulo igual a la latitud del lugar (orientación polar); eje de movimiento N-S, en posición horizontal; eje de movimiento E-O en posición horizontal. Para estos concentradores sólo disponemos de datos técnicos de los de sección parabólica.

TAMAÑOS

Cabe recordar que toda la energía que entregue una central solar va a ser colectada exclusivamente durante las horas de sol. Por lo tanto, dadas una eficiencia y una intensidad de radiación, si se quiere que la central aporte energía eléctrica en las horas con y sin sol, se debe colectar y acumular energía en exceso en las horas de sol, lo cual equivale a mayor área de colección. Además, cabe destacar que el área real a ser utilizada es aproximadamente

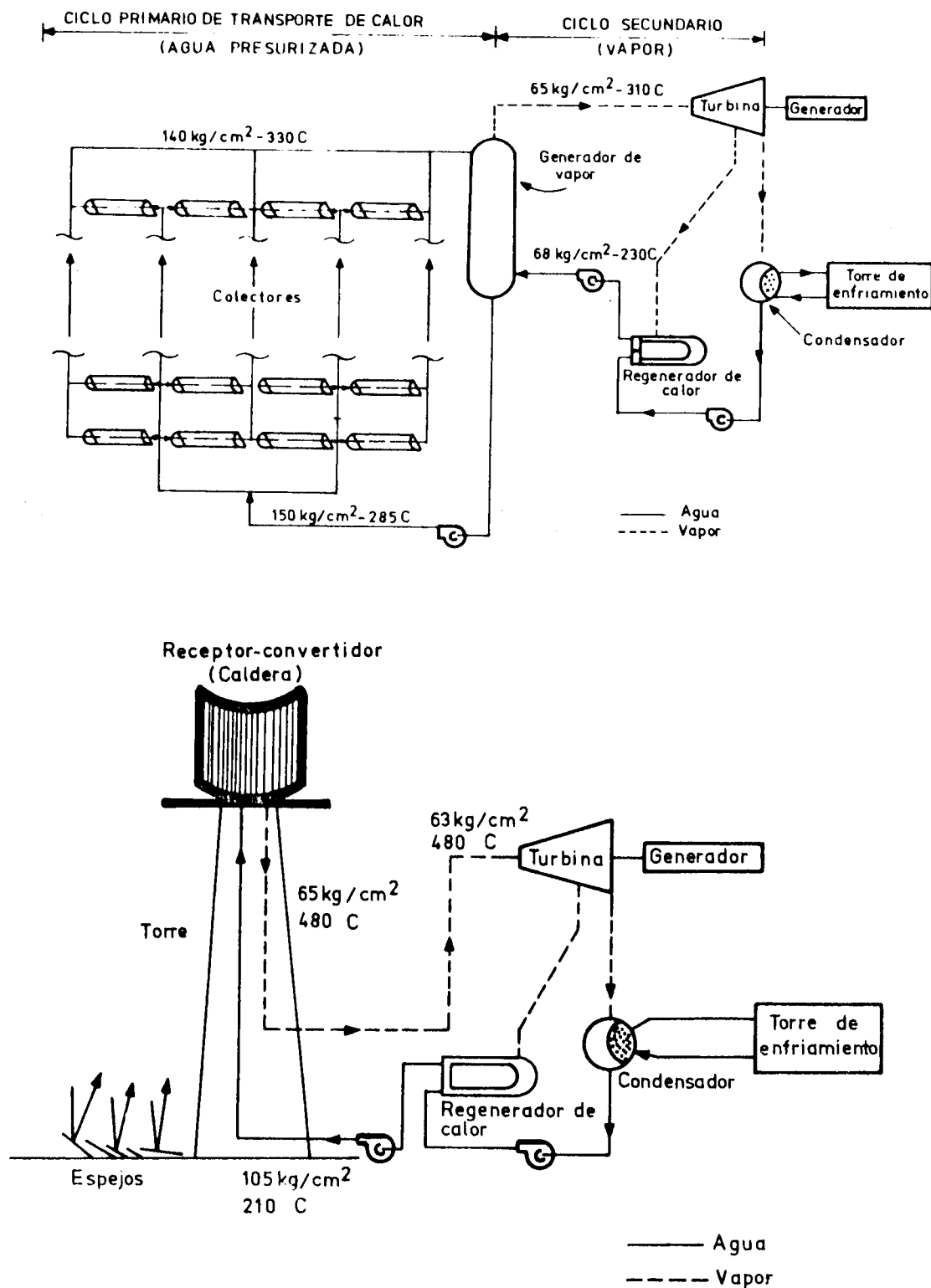


Fig. 6.3: a) Sistema con colectores cilíndrico-parabólicos y agua presurizada como fluido de transporte.

b) Sistema a receptor central. El vapor sobrecalentado utilizado en la turbina se produce directamente en el receptor-convertidor.

De Ref. 17.

el doble de la cubierta por colectores, ya que es necesario dejar espacios libres entre ellos para evitar problemas de sombras tanto de los rayos incidentes cuanto de los reflejados, así como caminos de circulación para la ejecución de tareas de mantenimiento.

En la Tabla 6.2, además de los valores típicos de las eficiencias estimadas para los distintos sistemas y las temperaturas de trabajo, damos las áreas a cubrir con colectores para una potencia dada y diferentes modos de operación y, en un caso, a modo de ejemplo, las áreas a cubrir para una central solar pura y una híbrida operando en el modo de seguimiento.

A título ilustrativo, consignamos a continuación ejemplos de tamaños y números de componentes para dos de los sistemas discutidos:

SISTEMA CON COLECTORES PARABOLOIDES DE REVOLUCION: Para una central con las características dadas en la Tabla 6.2, operada en el modo de seguimiento de carga, se ha propuesto ¹⁰⁾ un sistema formado por 27.000 heliostatos sosteniendo paraboloides de revolución de 44 m^2 cada uno, con sus respectivos receptores ubicados en el foco de los mismos.

SISTEMA A RECEPTOR CENTRAL: Se ha propuesto ⁸⁾ un sistema modular con un área de $0,5 \text{ km}^2$ cubierta por espejos (15.400 espejos de 33 m^2 cada uno) y una torre de 250 m de altura. Para las plantas a receptor central presentadas en la Tabla 6.2, se requerirán 3 módulos para la que opera en el modo de base, 2 módulos para la de seguimiento y 1 módulo para la de punta.

TRANSPORTE DE LA ENERGIA TERMICA ENTRE EL CONVERTIDOR DE ENERGIA SOLAR A TERMICA Y LA TURBINA

Dado que para las centrales solares basadas sobre el mecanismo de conversión fototérmica se propone utilizar turbogeneradores convencionales, es necesario estudiar el modo de acoplar las turbinas con el subsistema solar. La importancia de este estudio reside en el hecho de que el diseño de la caldera del subsistema solar depende fuertemente de las características del fluido empleado para extraer la energía térmica de él. Se puede usar o un solo circuito en el cual una misma masa de fluido extrae la energía térmica del subsistema solar y luego acciona las turbinas o bien dos circuitos conectados por un intercambiador de calor: el primero extrae la energía térmica del subsistema solar y el segundo provee el fluido de trabajo a la turbina. Cada combinación de los diversos subsistemas con los diversos fluidos propuestos, tiene distintas características técnicas y económicas que deben ser evaluadas. En la Ref. 17 se realiza un estudio bastante completo para los diferentes sistemas. Como ejemplos, damos en la Fig. 6.3 un sistema

Tabla 6.3

Eficiencias de almacenaje de energía^{a)}

Tipo de almacenaje	Eficiencia ^{b)} (%)
Hidrógeno líquido	
Para turbina de gas	20
Para fuel cell	48
Baterías (sales fundidas)	50-70 ^{c)}
Cambio de fase de sal eutéctica	50-90 ^{d)}
Tanque aislado con agua a 320 C	85
Volante	90

- a) Datos tomados de la Ref. 19. Para todos los casos se considera una pérdida de energía, una vez almacenada, de 0,1 % por hora de almacenaje.
- b) Indica qué fracción de la energía entregada al sistema de almacenaje es posible extraer de él, sin considerar pérdidas propias del almacenaje.
- c) Depende de la velocidad de descarga.
- d) Depende del método de carga y del diseño del sistema.

con concentradores cilíndrico-parabólicos y un sistema a torre central.

ALMACENAJE DE ENERGIA

Como mencionamos anteriormente, para proveer de electricidad en horas sin sol a partir de medios exclusivamente solares, será necesario acumular energía en las horas con sol. Este requisito se mantiene aún en los casos en que únicamente se prevea generar electricidad durante las horas en que el Sol se halle sobre el horizonte, puesto que existen lapsos variables durante los cuales el cielo se cubre de nubes. Desde el punto de vista económico es, sin embargo, discutible ¹⁸⁾ si para compensar las horas sin insolación es más conveniente efectuar almacenaje de energía o usar una central convencional auxiliar.

Los posibles métodos para el almacenaje de energía en centrales fototérmicas se pueden clasificar ¹⁹⁾ 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.

En la compañía Honeywell Inc., se realizó ¹⁹⁾ un análisis de algunos de estos sistemas. Los autores definen una eficiencia que tiene en cuenta la energía que se pierde en el proceso de almacenaje en sí, es decir, la fracción de la energía entregada al acumulador que es posible extraer de él sin tener en cuenta las pérdidas de almacenaje. Los valores así definidos están dados en la Table 6.3. Además, consideran que en todos los casos estudiados se pierde el 0,1 % de energía acumulada por cada hora de almacenaje.

PARAMETROS INDICATIVOS DEL COMPORTAMIENTO TECNICO DE CENTRALES SOLARES

Para efectuar evaluaciones económicas referentes a centrales solares es necesario conocer ciertos parámetros que caracterizan el comportamiento técnico de aquéllas. Daremos únicamente la definición de los más importantes.

FACTOR DE POTENCIA DE LA PLANTA o, simplemente, factor de planta: se define como la cantidad de energía eléctrica efectivamente entregada por una central cualquiera durante un lapso, dividida por la energía que teóricamente se generaría si, durante ese lapso, la central hubiese operado en forma continua a su potencia nominal. Por ej., durante 1973, el factor de planta para el sistema interconectado de centrales del servicio público argentino fue de 0,38; en los EE.UU. de N.A., en promedio, fue de 0,55 (Ref. 18).

FACTOR DE CARGA: se define como la potencia media a la que efectivamente operó una central cualquiera durante un lapso, dividida por la demanda máxima registrada durante ese lapso. Por ej., en 1973, el factor de carga para el sistema interconectado de centrales del servicio público argentino fue de 0,50 (Ref. 20).

FACTOR DE REEMPLAZO DE ENERGIA: Dado que el combustible para las centrales solares es esencialmente gratuito, es razonable que, al integrarlas a una red que incluya centrales convencionales, se las proyecte para que operen el mayor tiempo posible, ahorrando así el combustible de éstas, lo cual equivale a un "reemplazo de fuentes de energía convencional". Por lo tanto, interesa establecer ⁸⁾ el valor del factor de reemplazo de energía, definido como la energía obtenible a la salida de la central solar en funcionamiento simulado, dividida por aquella parte de la demanda programada para la red que corresponde a la zona de la curva de demanda para la cual se diseña la planta, ambas integradas sobre un año.

CAPACIDAD DE REEMPLAZO DE POTENCIA: A fin de asegurar que, frente a imprevistas salidas de servicio de una o más centrales de una red de potencia, la demanda eléctrica no exceda la capacidad de generación disponible, esta última se diseña en exceso respecto a la demanda pico. El exceso de potencia disponible por sobre la demanda pico se denomina reserva o margen. Cuando en una red de potencia se sustituyen centrales convencionales por solares, es necesario rehacer el cálculo de la reserva requerida, para asegurar que el nuevo sistema tiene la misma confiabilidad que el convencional. O sea, se debe establecer la capacidad de una planta solar para reemplazar una dada cantidad de potencia convencional sin disminuir la confiabilidad del sistema. Cuando esta capacidad de reemplazo de potencia de una planta solar no es 100 %, a fin de mantener la

mencionada confiabilidad del sistema, es necesario disponer en la red de cierta cantidad de potencia convencional de apoyo (back-up capacity).

6.3. ANALISIS ECONOMICO

Respecto a los cálculos de costos y las comparaciones realizadas por diferentes autores debemos destacar que: (a) los costos del kW_eh solar han sido calculados usando como costos de los componentes de las centrales solares los que se lograrán mediante su producción masiva; se supone que esta etapa se alcanzará en aproximadamente 1990, tras la puesta a punto de metodologías apropiadas; (b) los cálculos del kW_eh solar 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; (c) la comparación con los costos del kW_eh convencional está basada sobre precios del carbón y del uranio vigentes en 1973-1974; si bien éstos no han sufrido las drásticas modificaciones a las que se viera sometido el precio del petróleo, también han crecido a un ritmo superior al de la tasa de variabilidad usualmente supuesta.

Todos los costos son expresados en U\$S (de los años 1972-1974), dado que así fueron calculados en los trabajos de los cuales se extrajo la información. Carece de sentido transformarlos a pesos, pues, de cualquier manera, no corresponden a costos reales en la Rep. Argentina.

6.3.1. Costos de componentes

COSTOS DE COMPONENTES POR kW_e NOMINAL INSTALADO

Si bien, para hacer una comparación con centrales convencionales, lo importante es el costo final del kW_eh en los bornes de salida de las centrales solares, es interesante conocer las inversiones (expresadas en $\text{U$S/kW}_e$) requeridas para las distintas partes de los sistemas en estudio, para así determinar sobre qué componentes es necesario concentrar los esfuerzos de reducción de costos unitarios.

En la Tabla 6.4 damos, como ejemplos, una central de 10 MW_e a colectores-convertidores planos operada en el modo de base y tres centrales de 100 MW_e a concentradores cilíndricos, a paraboloides de revolución y a receptor central, operadas en el modo de seguimiento de carga.

En los sistemas con concentradores cilíndricos, además del caso de aquéllos con sección parabólica cuyas características técnicas se mencionan en

Tabla 6.4

Estimaciones de costos por kW_e nominal instalado, para distintos sistemas de conversión ^{a)}

Partes constitutivas	Costos en US\$/kW _e (% del total)						
	Colect. convert. plano	Cilindrico parabólico				Parab. revol.	Recep. centr.
		Polar	H-S	E-0	E-0 ^{b)}		
Terreno	—	2 (0,1)	2 (0,2)	3 (0,2)	3 (0,4)	2 (0,2)	2 (0,3)
Edificios, construcción, facilidades para transporte	—	49 (3,3)	49 (3,9)	49 (3,2)	49 (5,8)	49 (4,0)	44 (6,7)
Colectores, espejos, heliostatos	730 (68)	875 (59)	720 (57)	900 (59)	225 (27)	690 (56)	300 (46)
Torre, receptor, intercambiador de calor, transporte energía térmica	60 (5,6)	319 (22)	254 (20)	318 (21)	318 (38)	244 (20)	95 (15)
Almacenaje	60 (5,6)	120 (8,0)	120 (9,4)	120 (8,0)	120 (14)	120 (10)	90 (14)
Turbinas y anexos	—	80 (5,4)	80 (6,3)	80 (5,3)	80 (9,5)	80 (6,5)	80 (12)
Generadores y anexos	285 (27)	21 (1,4)	21 (1,7)	21 (1,4)	21 (2,5)	21 (1,7)	21 (3,2)
Equipos varios	—	4 (0,3)	4 (0,3)	4 (0,3)	4 (0,5)	4 (0,3)	4 (0,6)
Torre de enfriamiento	—	20 (1,3)	20 (1,6)	20 (1,3)	20 (2,4)	20 (1,6)	20 (3,0)
<u>Costo total directo</u>	1075	1429	1270	1515	840	1230	656

a) La central con colectores-convertidores planos tiene 10 MW_e de potencia operando en el modo de Base; datos de Ref. 10. Las demás centrales son de 100 MW_e de potencia operando en el modo de seguimiento de carga; datos de Ref. 8. No se deben comparar los costos totales en valor absoluto para la central a colector-convertidor plano con el resto por ser de distintos modos de operación y no encontrarse normalizados los cálculos. Entre paréntesis damos el % con que pesa cada parte constitutiva al total de inversión por kW_e.

b) Según modificaciones propuestas para bajar costos de los colectores-concentradores. Ver texto.

la Secc. 6.2, se consigna el caso mencionado en la Secc. 6.1 caracterizado por tener el concentrador facetado fijo y el receptor móvil ¹²⁾.

De la Tabla 6.4 es claro que la mayor inversión de capital 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. En los ejemplos presentados se consideraron centrales solares puras, por lo cual se incorporó costos de almacenaje.

COMPARACION DE INVERSIONES INICIALES PARA CENTRALES SOLARES Y CONVENCIONALES

En la Tabla 6.5 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. Es de destacar que los costos (tanto de centrales solares como convencionales) han sido calculados ⁶⁾ por los autores sobre las mismas bases, a fin de que sean directamente comparables entre ellos. Como es evidente, las centrales solares presentan el inconveniente de una mayor inversión inicial de capital si bien ulteriormente no hay inversión en combustible. Como ya fue mencionado en la Introducción de esta sección, los costos del kW_e considerados para las centrales solares corresponden al punto inicial de la curva de aprendizaje para su construcción ¹⁴⁾; si se supone una curva de aprendizaje con una pendiente del 90 %, para la cuarta central solar el costo del kW_e ya habrá caído al 80 % del valor inicial y para la trigésima segunda al 60 %.

COSTOS DE SISTEMAS DE ALMACENAJE DE ENERGIA

Los estudios sobre almacenaje son aún muy escasos. Hay, sin embargo, algunos datos que permiten establecer valores preliminares para los costos involucrados. Daremos únicamente las estimaciones hechas por un grupo de investigadores del laboratorio de Honeywell Inc. ¹⁹⁾, por ser el conjunto más completo. Los mismos están condensados en dos figuras que reproducimos en la Fig. 6.4. En ambas se da la inversión inicial total (costo de construcción y montaje) para sistemas de almacenaje en función de las horas de almacenaje (hasta un máximo de 10 horas); se supone que la energía es extraída permanentemente a razón de 1000 MW_e .

6.3.2. Costos del $\text{kW}_e \text{ h}$

Para el cálculo del costo total del $\text{kW}_e \text{ h}$ producido se deben tener en cuenta las inversiones de capital hechas hasta el momento de entrada en operación

Tabla 6.5

Estimaciones de inversiones iniciales para distintos tipos de centrales

a)

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. 8

comercial de la central, el costo de operación y mantenimiento y, en caso de centrales convencionales, el costo del combustible. Para centrales solares puras incorporadas a una red, debe incluirse el costo de almacenaje y de cierta cantidad de potencia de apoyo (back-up capacity).

CENTRALES SOLARES PURAS

Consideraremos primero el caso de centrales solares puras comparando el costo del $\text{kW}_e \text{ h}$ para los distintos subsistemas solares. Para ello sólo tomamos la información provista por dos grupos que han realizado un análisis sistemático teniendo en cuenta, cada uno de ellos, los mismos factores para todos los sistemas.

El grupo de Honeywell Inc. ha comparado ¹⁷⁾ los cuatro sistemas de conversión. Si bien no dan el costo del $\text{kW}_e \text{ h}$ para los sistemas con colectores planos y concentradores cilíndrico-parabólicos, indican que ellos son superiores a los producidos por los sistemas con colectores paraboloïdes de revolución o a receptor central. En la comparación efectuada para estos dos últimos, ambos operando en el modo de seguimiento de carga, el costo del $\text{kW}_e \text{ h}$ producido por el sistema a receptor central es 1,4 veces menor que el producido por el sistema con concentradores paraboloïdes de revolución.

El cálculo más detallado sobre costos de todos los sistemas, excepto el de colectores planos, es el publicado por Aerospace Corporation ⁸⁾. El estudio se limita a centrales operando en el modo de seguimiento, pues, como veremos más adelante, según estos autores, éste es el modo económicamente más conveniente para centrales solares. En la Fig. 6.5 se puede ver que el sistema a receptor central, es el que produce el $\text{kW}_e \text{ h}$ a menor costo. Se observa, además, que los sistemas con concentradores cilíndricos fijos a espejo facetado con orientación E-0, pueden llegar a ser una alternativa competitiva.

CENTRALES SOLARES HÍBRIDAS

Como alternativa al uso de centrales solares puras con almacenaje de energía, se puede utilizar durante las horas sin sol un método convencional para producir el vapor necesario para accionar las turbinas, o bien, durante esas horas, generar directamente la energía eléctrica requerida mediante una central convencional. Cabe aclarar que aún estas centrales híbridas necesitan una pequeña capacidad de almacenaje ($\sim 0,5 \text{ h}$) por razones de estabilidad dinámica de operación durante períodos cortos en que el cielo se nuble intermitentemente.

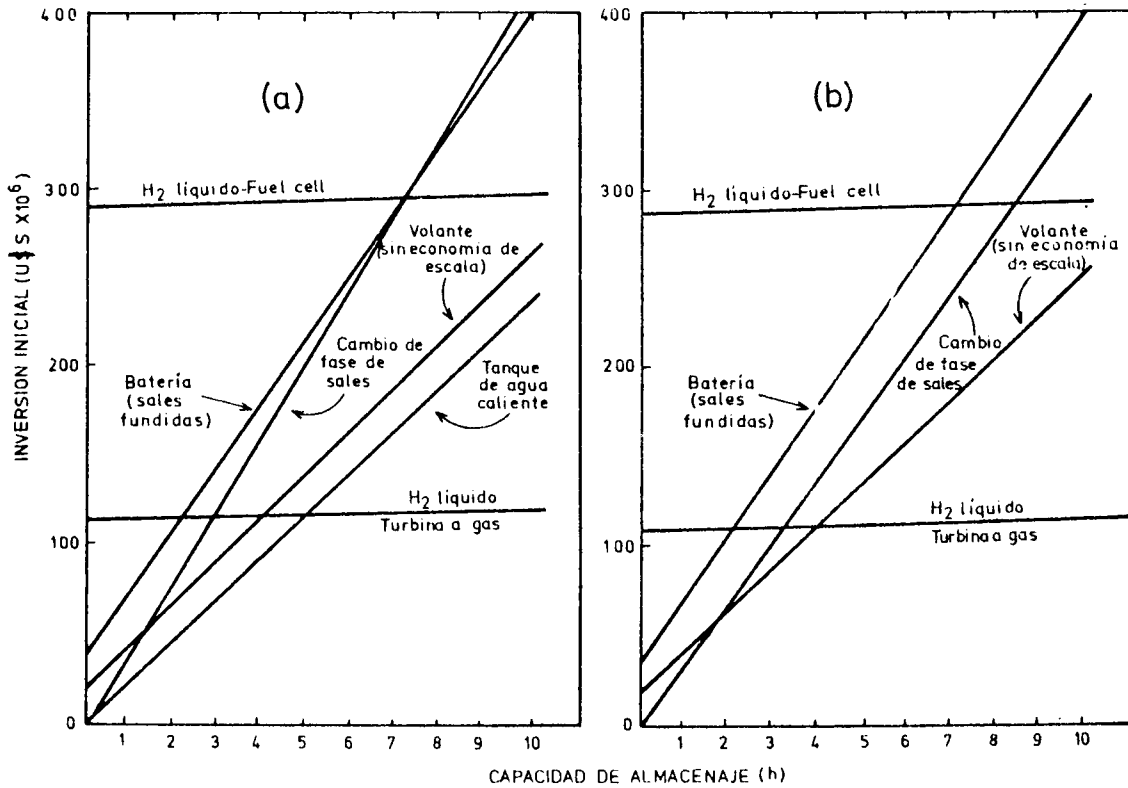


Fig. 6.4: Inversión inicial total para distintos sistemas de almacenaje de energía, en función de la capacidad de almacenaje (medida en cantidad de horas durante las cuales el sistema es capaz de entregar 1000 MWe). Temperatura del fluido a la entrada del sistema: (a) 320 C, (b) 540 C. De Ref. 19.

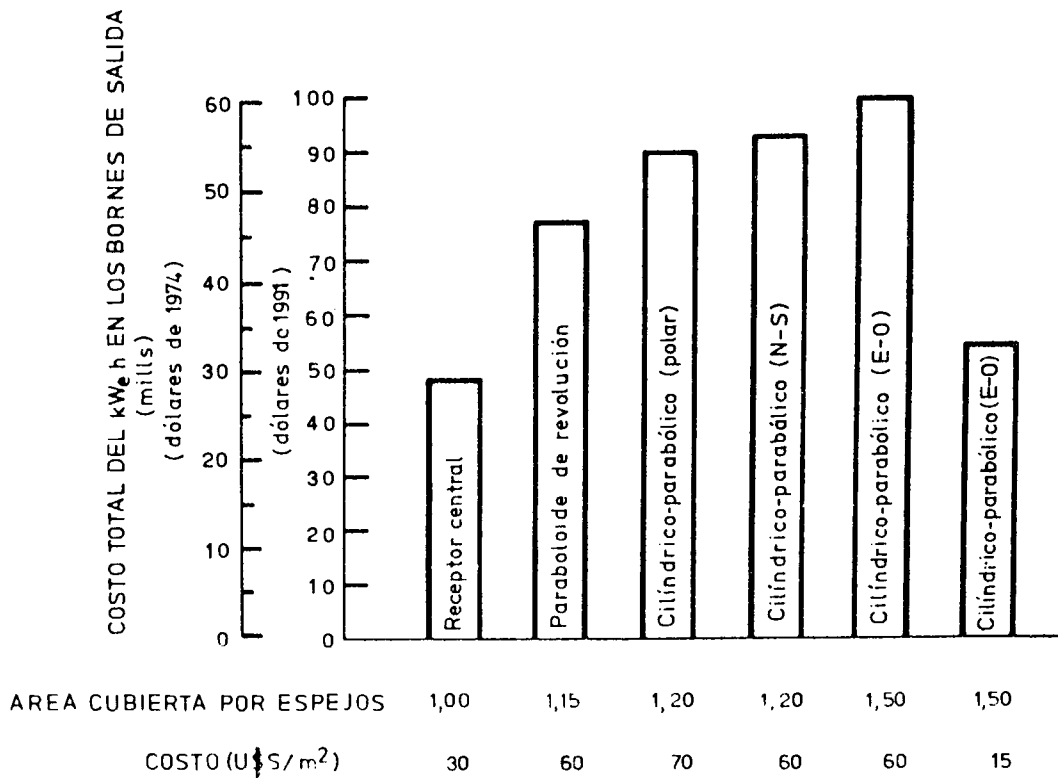


Fig. 6.5: Costo del kWh producido por una central de 100 MW operada en el modo de seguimiento de carga, en función del sistema de conversión de energía solar en eléctrica utilizado. De Ref. 8.

El grupo de investigadores de Sandia Laboratories ¹⁸⁾ estudió el comportamiento de centrales solares híbridas con sistema solar a receptor central y convencional a carbón, operando en los modos de base y seguimiento de carga. Analizó el costo del kW_eh en función del costo del combustible para diferentes contribuciones de la central solar a la energía total producida (en caso de centrales híbridas) y dos valores del costo de los espejos. Para valores del combustible fósil inferiores a 1,4 U\$S/MBtu siempre la central híbrida produce el kW_eh a menor costo que la pura. Para valores del combustible superiores a 2,4 U\$S/MBtu la central solar pura es más económica.

En el análisis hecho por Aerospace Corporation ⁸⁾ la central solar pura a receptor central es más económica que la híbrida para valores del costo de combustible para 1973 de 1,5 U\$S/MBtu para centrales operando en el modo de seguimiento de carga.

COMPETITIVIDAD CON CENTRALES CONVENCIONALES

En la Tabla 6.6 hemos resumido los costos del kW_eh estimados por diferentes autores para distintos sistemas de colección y conversión de la energía solar y su comparación con el producido por centrales convencionales. Para el caso de colectores-convertidores planos, los autores ¹⁰⁾ sólo dan el costo del kW_eh producido por la central solar; han tenido en cuenta, además de la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento. Para todos los datos de Ref. 8 se han tenido en cuenta en el cálculo de costos, además de los puntos antes mencionados, en los casos en que es necesario, el costo de la potencia de apoyo. Los datos de la Ref. 18 son, de acuerdo a los mismos autores, muy preliminares, sin optimización del sistema, y los cálculos del costo del kW_eh sólo incluyen inversión de capital.

El hecho importante que surge de las estimaciones presentadas en la Tabla 6.6 es que, en el peor de los casos, *el costo del kW_eh producido por centrales solares 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 1973-1974. Por supuesto, hay que llamar la atención sobre el hecho de que los cálculos están basados sobre costos de colectores-concentradores y de sistema de almacenaje que sólo se obtendrán mediante producción masiva de sus componentes. Por otra parte, si bien los estudios realizados y la experiencia existente hacen que dichos costos sean plausibles, hasta el presente no se construyó ningún prototipo para demostrar experimentalmente que son efectivamente factibles.

Tabla 6.6

Estimación de costos del kWh en los bornes de salida de las centrales

Sistema		Potencia (MW _e)	Modo de operación (Horas de almacenaje)	Costo de energía eléctrica ^{a)} (mills/kW _e h)		Ref.
				Solar	Convencional	
Solar puro	Colector convertidor plano	10	Base (12)	28	--	10
	Concentrador cilíndrico parabólico { Polar N-S E-0 b)	100	Seguimiento (6)	55 57 60 35	24-30 ^{c)}	8
	Concentrador paraboloide de revolución	100	Seguimiento (6)	46	24-30 ^{c)}	
	Receptor central	100	Base (12) Seguimiento (6) Punta (0,5)	22 29 80	12-16 ^{d)} 24-30 ^{c)} 47-54 ^{e)}	
		1000	Base (12) Seguimiento (6)	27 ^{f)} 29 ^{f)}	11-31 ^{g)} 14-34 ^{g)}	18
Híbrido ^{h)}	Receptor central	100	Seguimiento (0,5)	32-35	24-30 ^{c)}	8
		1000	Base ⁽¹²⁾ (0,5) (6) Seguimiento (0,5)	23-30 ^{f,i)} 15-29 ^{f,j)} 24-32 ^{f,i)} 20-32 ^{f,k)}	11-31 ^{g)} 14-34 ^{g)}	18

a) El costo del kWh es dado en dólares de 1974. Los costos del almacenaje son: para Ref. 8, 15 U\$S/kW_eh; para Ref. 18, 9,2 U\$S/kW_eh.

b) Incorporando modificaciones propuestas para bajar el costo del colector (ver texto).

c) Central de ciclo combinado a combustible fósil de 400 MW_e de potencia.

d) Central nuclear y de carbón de 1000 MW_e de potencia.

e) Central de turbina a gas a combustible fósil de 100 MW_e de potencia.

f) Se tomó un valor promedio correspondiente al valor promedio de los costos de los colectores.

g) Central a carbón de 1000 MW_e de potencia.

h) El rango de valores del kWh para las centrales híbridas se toma para el mismo rango de costos del combustible fósil considerado en el sistema convencional.

i) La parte solar contribuye con el 65 % de la energía producida.

j) La parte solar contribuye con el 28 % de la energía producida.

k) La parte solar contribuye con el 39 % de la energía producida.

En cuanto a los diferentes modos de operación de las centrales, los datos presentados en la Ref. 8, indican que el modo de seguimiento de carga sería el más competitivo con el sistema convencional.

Finalmente, la comparación de las centrales solares puras y las híbridas con las centrales convencionales arrojan resultados contradictorios según los autores considerados. Si se examinan los datos de Ref. 8, resulta que la central solar pura a receptor central con 6 h de almacenaje produce el kW_eh a un costo competitivo con el producido por centrales convencionales a partir de un costo del combustible que es 1,5 veces menor que aquél a partir del cual la central híbrida sin almacenaje entra en competición con las convencionales. De los datos de la Ref. 18, en cambio, tanto en el modo de operación de base cuanto en el de seguimiento, las centrales solares híbridas sin almacenaje de energía son las que producen el kW_eh a un costo competitivo con la convencional, a partir de un menor costo del combustible. Esta discrepancia es presumiblemente atribuible al hecho de que las comparaciones efectuadas difieren en cuanto al tamaño de las centrales involucradas y a la distinta variación de los precios del kW_eh convencional e híbrido en función del costo del combustible tomado en cada caso.

7. CONVERSION FOTOVOLTAICA

La conversión *directa* de energía solar en electricidad mediante células solares, cuyo funcionamiento se basa en el aprovechamiento del efecto fotovoltaico, constituye un proceso conceptualmente distinto de la conversión fototérmica discutida en el capítulo precedente: en una central fototérmica el subsistema solar sólo reemplaza al generador convencional de energía mecánica (p.ej. vapor de agua) que precede a la etapa turbogeneradora; en una central fotovoltaica, las células solares generan directamente corriente continua.

Las primeras células solares o fotovoltaicas (o baterías solares) se construyeron en 1954, creándose rápidamente un mercado para aplicaciones terrestres (militares y civiles) que luego decayó también rápidamente, para renacer hace pocos años (ver Fig. 4.4). El primer satélite artificial energizado con células fotovoltaicas se lanzó en 1958. Actualmente, la mayor unidad de generación fotovoltaica es la del Skylab, que genera 20 kW_e y, posiblemente, el módulo que por más tiempo funcionó a nivel terrestre sea uno de 100 W-pico[†], montado durante 1961 en Chile y aún en servicio. De lo precedente sigue que la factibilidad tecnológica de la conversión fotovoltaica está demostrada a ultranza desde hace varios lustros, siendo la finalidad de las investigaciones y desarrollos actuales bajar el costo de las células en ~ 50 - 100 veces, lo cual es imprescindible para lograr que la generación masiva de electricidad en centrales fotovoltaicas resulte económicamente competitiva. Como veremos en el resto del presente capítulo, la solución de esta cuestión se traduce en un problema de tecnología de materiales y de procesos de producción: deben hallarse nuevos materiales fotovoltaicos o, al menos, nuevas formas de materiales ya tradicionales y lograr métodos de fabricación de células cada vez más automatizados y carentes de etapas inherentemente costosas (como ser etapas al vacío). Nótese que no es posible lograr la mencionada reducción de precio mediante un aumento de la eficiencia de las células, pues ésta ya alcanza valores experimentales del orden de 20 %, no permitiendo mejorar en factores como los mencionados. En cuanto a centrales fotovoltaicas en sí, los análisis técnico-económicos son mucho más escasos que para las fototérmicas, si bien existen trabajos en marcha en este campo.

[†] El Watt-pico corresponde a la potencia generada a insolación pico, es decir con el Sol en el cenit y ausencia de nubes.

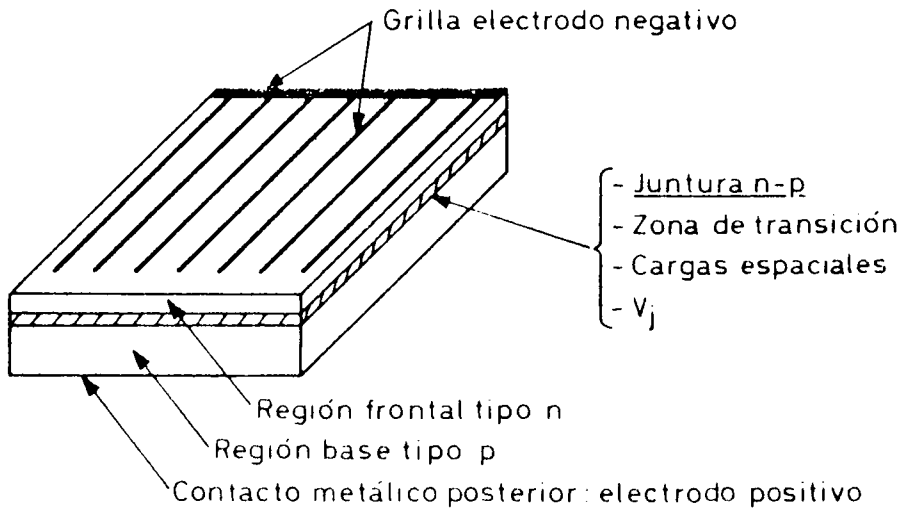


Fig. 7.1: Esquema de una típica célula fotovoltaica de Si. Su área es de pocos centímetros cuadrados. El espesor de la región frontal es del orden de los décimos de micrón y el de la región base de centenares de micrones; este espesor total del semiconductor monocristalino es requerido para conferirle apropiada rigidez mecánica y posibilitar una eficiente absorción de la radiación. No se muestran el encapsulamiento protector de plástico ni una eventual capa antirreflectante.

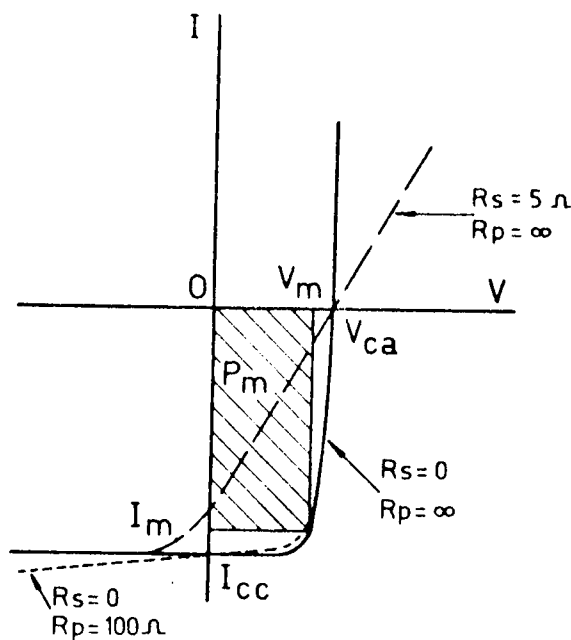


Fig. 7.2: Característica I-V de una célula ideal de Si (línea llena) sometida a radiación solar constante. Se indican la corriente de cortocircuito I_{cc} , la tensión a circuito abierto V_{ca} y la potencia máxima extraíble $P_m = V_m \cdot I_m$. El factor de llenado (o de curva) $F = P_m / (V_{ca} \cdot I_{cc})$ constituye un factor de mérito para determinar la calidad de la célula. Para una célula real con $R_s = 5 \Omega$ (línea cortada), el factor de llenado y la potencia máxima extraíble disminuyen muy significativamente.

7.1. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LAS CELULAS FOTOVOLTAICAS

7.1.1. Principios de funcionamiento

El efecto fotovoltaico consiste en la aparición de una diferencia de potencial entre dos terminales conectados a un dispositivo adecuado cuando sobre éste incide radiación electromagnética. En particular, tiene eficiencia razonable cuando fotones del espectro solar inciden sobre un material semiconductor: todo fotón cuya energía supere la del ancho E_g de la banda prohibida del semiconductor puede llevar un electrón desde la banda de valencia a la de conducción, dejando un "agujero" cargado positivamente en la primera. Si el dispositivo considerado es una célula fotovoltaica, contiene, internamente, una diferencia de potencial apropiada para desplazar a estas cargas, en sentidos opuestos, por, respectivamente, las bandas de conducción y de valencia. En la Fig. 7.1 hemos esquematizado esto para una célula de silicio, construida a partir de un monocristal de Si tipo p de $\sim 300 \mu\text{m}$ de espesor al cual, desde una de sus caras y mediante un proceso térmico ad-hoc, se le difundió una capa delgada de impurezas para formar una región de Si tipo n. Se obtiene así un homojuntura n-p, una zona de transición en el monocristal desde el punto de vista de la distribución de cargas eléctricas dentro de éste, caracterizada por la presencia de cargas espaciales que originan el mencionado campo interno entre las regiones n y p (potencial de juntura V_j). Cerrando el circuito exterior a través de la grilla frontal y el electrodo posterior, circulará una corriente fotogenerada I_L : *una célula fotovoltaica sometida a insolación constituye un generador de corriente continua a través de una carga exterior.* En la práctica sólo pueden contribuir a I_L aquellos fotones incidentes que, por tener energía apropiada, son absorbidos suficientemente cerca de la juntura como para que los electrones o agujeros generados logren difundir hasta la zona de transición antes de recombinarse con cargas de signo opuesto, y así ser impulsados por el campo eléctrico a través de aquélla.

La fracción de la energía del fotón que supera a E_g se transforma en energía vibracional de la red cristalina, es decir, en energía térmica disipada en el material: no produce un aumento de I_L . Por lo tanto, otra diferencia básica respecto de la conversión fototérmica es que *en la fotovoltaica sólo es aprovechable parte de la energía del espectro de radiación solar.*

En la Fig. 7.2 ilustramos la característica I-V para una célula ideal de Si (resistencia interna serie $R_s=0$ y paralela $R_p=\infty$); también se observa que la característica de células reales empeora poco si $R_p \neq \infty$, pero que R_s debe ser mantenida lo más baja posible. Su mayor contribución viene de la

cara frontal, por ser mucho más delgada que la base, por lo cual R_s se reduce mediante aplicación de las grillas colectoras mencionadas.

La posición de la juntura debe ser optimizada para lograr la mayor I_L posible teniendo en cuenta el coeficiente de absorción α del material en función de la longitud de onda y las longitudes de difusión L para electrones y agujeros en cada una de las regiones (las que decrecen al aumentar los centros de recombinación en el material; en general son de 50-200 μm). Por lo tanto, el espesor de la cara frontal de la célula de Si resulta fundamentalmente de un apropiado compromiso entre el valor de α para el extremo azul del espectro (que es el menos penetrante), los valores de L en esa región y la necesidad de mantener baja su R_s (los dos últimos requerimientos son opuestos desde el punto de vista constructivo).

Como segundo ejemplo ilustrativo consideremos las células de $\text{CdS}/\text{Cu}_x\text{S}$. El CdS sólo existe como material tipo n, por lo cual no es posible construir una homojuntura con él. Pero yuxtapuesto a un semiconductor de tipo p, forma una heterojuntura n-p de muy aceptables propiedades conversoras. El material p más usado es el Cu_xS , donde x toma valores muy próximos a 2; su E_g es de $\sim 1,2$ eV, algo mayor que el del Si. El funcionamiento de esta heterojuntura es bastante más complejo que el de una homojuntura, no existiendo aún una comprensión cabal del proceso (p. ej., Refs. 21-23). Aunque los conceptos y parámetros generales introducidos con relación a las células de Si, son igualmente aplicables para las $\text{CdS}/\text{Cu}_x\text{S}$, una diferencia esencial es que, para las longitudes de onda de interés, los coeficientes de absorción del CdS y del Cu_xS son mucho mayores que el del Si. Consecuentemente, los espesores activos de CdS no superan ~ 1 μm , y los de Cu_xS son aún menores: las células se construyen con capas delgadas de semiconductor y las longitudes de difusión L no requieren ser grandes; esto permite una mayor densidad de centros de recombinación, por lo cual los semiconductores pueden ser policristales impuros (~ 1000 veces más que en el caso del Si). El poco espesor y bajo grado de pureza tienen significativas implicancias económicas.

Una consecuencia de lo precedente es que los procesos de fabricación de estas células difieren sustancialmente de los utilizados para las de Si: el más usual hasta ahora consiste en evaporar, al vacío, CdS sobre un sustrato metalizado de algunas decenas de cm^2 y luego sumergir por breve lapso la capa policristalina obtenida en una solución de cloruro cuproso para formar una capa de Cu_xS , y con ella la juntura. El proceso concluye con la colocación de la grilla y el encapsulado de la unidad.

Aún cabe recalcar que en ambos tipos de células V_{ca} es de $\sim 0,5-0,6\text{V}$ (en general $V_{ca} \sim 1/2 E_g$) y que I_{cc} -pico es del orden de pocas decenas de mA/cm^2 .

Eficiencia de conversión

La expresión analítica general para la eficiencia teórica en función del E_G de los materiales semiconductores posee un máximo (Fig. 7.3), cuyo valor y posición dependen de las teorías semicuantitativas aplicadas para el cálculo. La eficiencia de una célula ideal depende de la distribución espectral de la radiación incidente (que es función de las condiciones atmosféricas; Fig. 2.2), de la reflectividad de su cara frontal para cada longitud de onda, de E_G en los dos sentidos ya explicitados, etc.. En una célula real las eficiencias disminuyen por efectos limitativos adicionales: colección incompleta de los pares generados, resistencias internas finitas, otros factores eléctricos que reducen el factor de llenado, transmisión de las grillas menor que 100 %, etc..

Al presente, para células de Si comerciales $\eta \sim 12-14$ %; en laboratorio se logró $\eta > 20$ % para las de Si y $\eta > 8$ % para las de CdS/Cu_xS.

Si sobre la cara frontal de una célula se concentra la radiación incidente sobre una superficie mayor, vecina a la célula, se puede, en principio, extraer mayor potencia. Pero, dado que la eficiencia disminuye al aumentar la temperatura de operación (Fig. 7.4), es necesario refrigerar las células; además (Fig. 7.2), la presencia de una $R_s \neq 0$ provoca una disminución adicional, tanto mayor cuanto mayor sea la concentración.

7.1.2. Estado actual de desarrollo de las tecnologías de fabricación

La selección del tipo de célula fotovoltaica más apropiada para la generación masiva de electricidad depende de una serie de factores técnicos y económicos vinculados entre sí. En particular: (a) la materia prima requerida debe existir en la naturaleza en cantidad suficiente y (b) debe disponerse de una tecnología que asegure la producción de células con características técnicas apropiadas, a precio razonable. Entre estas características técnicas figuran: (a) eficiencia aceptable; (b) estabilidad en las condiciones ambientales bajo las cuales operarán las células; (c) elevada reproducibilidad (o rendimiento de producción); (d) bajo costo energético (es decir, que la energía requerida para la fabricación de las células sea sustancialmente inferior a la que éstas pueden entregar en su vida útil). Actualmente, son las células de Si y de CdS/Cu_xS las que poseen los mejores factores de mérito en relación con el conjunto de parámetros técnico-económicos relevantes para la instalación de centrales fotovoltaicas. Si bien ambas son ofertadas comercialmente, las primeras son las únicas firmemente establecidas en el mercado. De las demás células en desarrollo a nivel de laboratorio, las más avanzadas son las

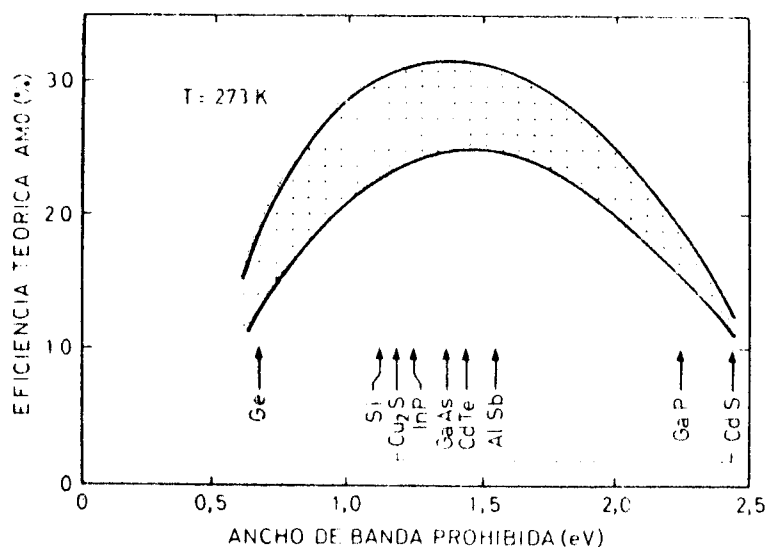


Fig. 7.3

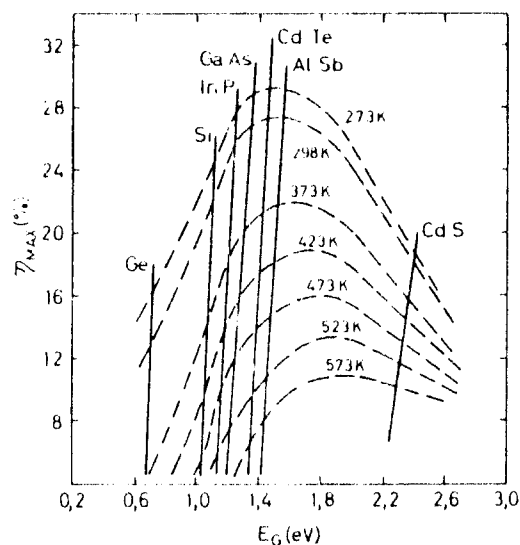


Fig. 7.4

Fig. 7.3: Rango de eficiencias máximas teóricas en función de E_G , para una célula ideal y condiciones AM0. De Ref. 24.

De hecho no se puede calcular una curva de eficiencia en función de E_G , sino que, para cada material, se calcula la eficiencia teórica dando valores a los parámetros característicos del material; se obtiene así un conjunto discreto de puntos a partir del cual se interpola una expresión continua. La amplitud de la zona grisada corresponde a la amplitud del rango de valores atribuidos por distintos autores a dichos parámetros característicos.

A E_G bajo, gran parte de los fotones del espectro solar crea pares, con lo cual la corriente fotogenerada I_L es elevada, pero el correspondiente potencial V_{ca} es bajo. A E_G grande, sucede lo opuesto. El óptimo $P_m = V_m \cdot I_m$ se ubica entre $\sim 1,1$ y $\sim 1,7$ eV.

Fig. 7.4: Eficiencias máximas para células ideales en función de E_G para varias temperaturas. La caída de la eficiencia al crecer T es debida a la disminución de V_{ca} , ya que I_L depende un poco de T . De Ref. 25.

Se observa que: (a) el E_G de cada material es función de T ; (b) cuanto mayor es E_G , menor es la disminución de la eficiencia al aumentar la temperatura: la eficiencia del GaAs supera a la del Si en $\sim 25\%$ a temperatura ambiente, en $\sim 70\%$ a 150 °C y en un factor ~ 10 a 250 °C.

de GaAs.

Al analizar los desarrollos tecnológicos en ejecución para células de Si y de CdS/Cu_xS, corresponde centrarse en aquéllos que pueden llevar a grandes disminuciones de costos por implicar modificaciones profundas en los procesos de producción. Por otra parte, existe una variedad de desarrollos menores que, sumados, pueden tener un efecto económico de cierta magnitud, pero insuficiente para solucionar a fondo la cuestión de la competitividad de costos. Entre esos desarrollos figuran la introducción de técnicas constructivas más baratas dentro de los métodos convencionales de fabricación y todo lo concerniente a un paulatino incremento de las eficiencias.

CELULAS DE Si

Es convicción general que lograr la necesaria reducción de costos en un factor 50-100 sólo es posible mediante la introducción de nuevas tecnologías; en este sentido, se ha señalado^{26,27)} que pretender su obtención simplemente a través de una producción cada vez mayor de células de la actual generación implicaría una inversión total de capital prohibitiva y un costo energético global excesivamente elevado. A continuación consideraremos las principales líneas de investigación, sin intentar agotar la multiplicidad de desarrollos que se han encarado para el abaratamiento de las células de Si (Refs. e, f y g, p. ej.). La mayoría de éstos se efectúan en los EE.UU. de N.A., la URSS, el Japón, Francia y la República Federal Alemana.

Crecimiento Czochralski

Es el método convencional más usual para obtener Si monocristalino de alta pureza. Si bien corrientemente no se lo considera adecuado para concretar la disminución de costos requerida, el mérito de métodos alternativos se juzga normalmente por comparación con este procedimiento; asimismo, la calidad de células fabricadas a partir de material alternativo se establece por comparación con la de las producidas con Si Czochralski. Este se consigue fundiendo Si de alta pureza en un crisol, poniendo luego una "semilla" monocristalina en contacto con la masa fundida y levantándola después lentamente mientras se la rota, con lo cual se forma un lingote cilíndrico del cual se obtienen, por serruchado, las obleas circulares para las células. Es de destacar que ciertas características del proceso introducen una purificación adicional del material inicial, llevando simultáneamente a sus máximos esperables el diámetro de los lingotes y la velocidad de su producción, el área de oblea resultante sólo se incrementaría en un factor 10 respecto de los valores presentes

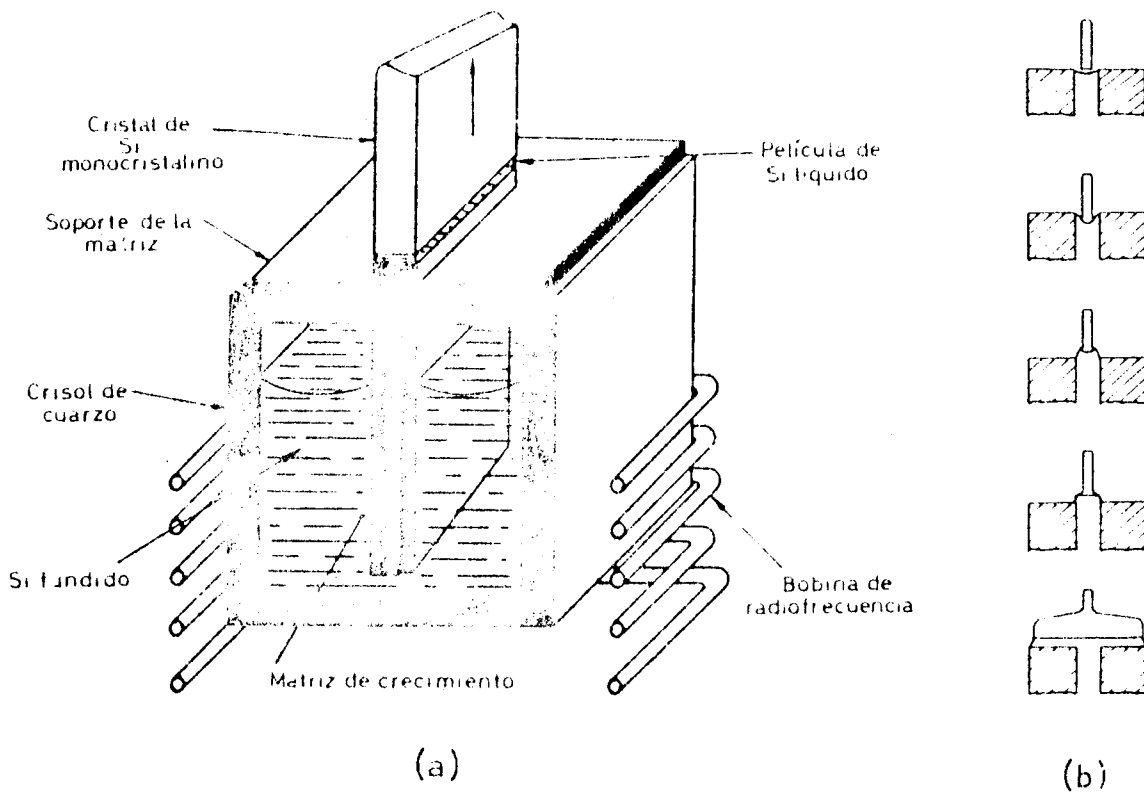


Fig. 7.5: Esquema de dispositivo para la obtención de cintas de Si por la técnica EFG. El Si está contenido en un crisol, montado dentro de un soporte conductor de molibdeno o de grafito. El conjunto se calienta con radiofrecuencia. El Si fundido asciende por capilaridad por la parte central de la matriz de crecimiento hasta la parte superior de ésta. Allí se introduce una semilla que luego se extrae a velocidad apropiada mientras se disminuye la temperatura: la masa fundida se expande hasta el canto exterior de la parte superior del molde (Fig. (b)) y, desde esta película, se crece el monocristal con la forma de dicha parte superior. De Refs. 33 y 52.

(Ref.28), lo cual es decididamente insuficiente desde el punto de vista económico. Otros estudios también señalan ²⁹⁾ que el método es incompatible con los objetivos económicos fijados, por el elevado costo de los cada vez mayores crisoles que se requieren para aumentar la producción por unidad de tiempo.

De lo precedente concluimos que el método incluye una etapa en la que se consumen elevadas cantidades de energía y costosos crisoles de cuarzo (fusión del Si a 1420 C, que en ese estado es químicamente muy activo); una etapa de gran desperdicio de material muy valioso (serruchado) y etapas limitativas de las posibilidades de producción masiva (evaporación en vacío de la grilla, del electrodo posterior y de la capa antirreflectante). Todas estas etapas deben ser reemplazadas por otras más convenientes.

Láminas y cintas de Si monocristalino

Las técnicas capaces de producir directamente monocristales planos de algunas centenas de μm de espesor evitan la etapa de serruchado, como también las ulteriores de pulido y decapado, necesarias porque la sierra produce estructuras cristalinas defectuosas en la superficie de las obleas, disminuyendo la eficiencia de las células. El objetivo es lograr láminas o cintas de Si del espesor adecuado, con el máximo ancho posible y a la mayor velocidad de producción factible. La optimización del proceso llevará a ahorros de tiempo, de materia prima costosa y de equipo.

Con el método del crecimiento dendrítico ^{30,31)} ya en la primera mitad de la década de 1960 se obtuvieron láminas de hasta 3 cm de ancho y $\sim 300 \mu\text{m}$ de espesor, crecidas a $\sim 5 \text{ cm/min}$ y, a partir de ellas, se produjeron células con eficiencia similar a la de células de material Czochralski (10-14 %, AM1). Actualmente se prevé ³¹⁾ pasar a anchos mayores y espesores menores, empleando una metodología que sus autores consideran económicamente competitiva. La dificultad máxima del método consiste en lograr una producción continua a partir de un crisol que debe ser rellenado sin perturbar la estricta estabilidad de los gradientes térmicos en la zona de crecimiento.

La técnica de crecimiento desde una película delimitada por los cantos de un molde o matriz (técnica EFG) ^{32, 33, 34)} constituye un procedimiento alternativo en el cual la distribución de temperaturas es mucho menos crítica que en el crecimiento dendrítico; esto es consecuencia de que, a diferencia de lo que sucede en este último, el cristal no se tira directamente desde la masa fundida sino desde la superficie de un molde, la que está térmica y mecánicamente desacoplada de dicha masa (Fig. 7.5). En principio, este desacopla-

miento, posibilita crecer simultáneamente una multiplicidad de cintas desde un mismo crisol, introduciendo varias matrices en el mismo, lo cual tiene importantes implicancias económicas. Al presente, se lograron cintas de hasta 25 mm de ancho y 20 m de largo, con espesores tan bajos como 100 μm y velocidades de tirado de hasta 4 cm/min. El crecimiento múltiple de cintas aún no se ha concretado. La calidad cristalográfica del Si EFG y, por extensión, la de las células construidas con él, todavía dejan que desear ³⁶⁾; en un caso favorable, para una célula EFG se obtuvo $\eta = 9,4 \%$, en comparación con 11,1 % para una tipo CZ construida en condiciones similares. La mayor dificultad del método reside en encontrar un material apropiado para la matriz de crecimiento: debe ser mojado por el Si fundido sin ser afectado por su fuerte actividad química; el grafito actualmente empleado presenta diversos inconvenientes. Aún es interesante señalar que el método CZ *en su presente estado de desarrollo* produce, por unidad de tiempo, ~ 5 veces más Si monocristalino que el obtenible con una cinta EFG de ancho triple al actualmente usual (Refs. 28 y 34): la implantación del crecimiento simultáneo es imprescindible, lo mismo que la automatización total del proceso; ambos desarrollos requieren ingentes inversiones de capital.

Utilización de Si policristalino

Obtener capas de Si policristalino es más económico y consume menos energía que fabricar elementos monocristalinos a partir de Si fundido bajo estricto control térmico.

El inconveniente principal del uso de Si policristalino es el efecto pernicioso de la superficie de los granos constitutivos de la capa policristalina, la que provoca elevada recombinación de los electrones y agujeros, disminuyendo así la corriente fotogenerada. Cuanto menores los granos, tanto más priman las características de sus superficies sobre las del cuerpo de los mismos. Por ello, deberían obtenerse granos en forma de fibra larga, orientada perpendicularmente a la cara frontal de la capa, de un tamaño medio no menor de 200-400 μm si se desea eficiencia razonable para el extremo rojo del espectro. En la práctica, por razones constructivas de las células, deben tenerse espesores varias veces mayores que el tamaño del grano.

La segunda cuestión en importancia en relación con estas células es la identificación de un sustrato apropiado para el depósito de la capa delgada policristalina: barato y de amplia disponibilidad, con coeficiente de expansión térmica cercano al del Si y elevada inercia química frente a este elemento a temperaturas elevadas, capaz de establecer buen contacto eléctrico con

Si. Los principales materiales en ensayo son grafito, acero inoxidable, Si grado metalúrgico, Al y Cu.

En cuanto al depósito de la capa policristalina en sí, la técnica de depósito químico en fase vapor de compuestos puros de Si se presenta ³⁷⁾ actualmente como la más promisoría.

Hasta hace poco, los tamaños de grano máximos usuales eran de 20-30 μm , con eficiencias de las células correspondientes siempre inferiores a 5 %, si bien, en 1972, un grupo ruso comunicó ³⁸⁾ la construcción de células con granos de $\sim 1\text{ mm}$ y eficiencia similar a la de células monocristalinas. Más recientemente, un grupo alemán fabricó ³⁹⁾ células de 100 cm^2 y $400\text{ }\mu\text{m}$ de espesor, con eficiencia AM1 de 8-10 %.

Producción de Si de pureza grado solar terrestre

Una significativa disminución de costo podría lograrse con la introducción de Si grado solar terrestre, a 5-10 U\$S/kg y con pureza intermedia entre el grado metalúrgico (99 %; $\sim 1\text{ U$S/kg}$) y el semiconductor (99,99999 %; $\sim 70\text{ U$S/kg}$), pero suficiente para tener longitudes de difusión $\gtrsim 50\text{ }\mu\text{m}$. Una tarea primaria a ese fin es caracterizar bien esta materia prima, identificando la tolerancia para diversos tipos de impurezas. Recientemente se estableció ⁴⁰⁾ que para muchas de éstas se puede aceptar una tolerancia 10 veces mayor que para material semiconductor; si la materia prima fuese purificada por un proceso Czochralski o similar, las concentraciones iniciales aceptables podrían llegar a ser hasta 10.000 veces superiores que para material semiconductor.

El esfuerzo volcado a este tema es amplio. Se analizan y experimentan ^{41, 42)} reacciones para obtener Si de calidad solar a partir de SiO_2 y también, ya que el bajo costo inicial del material lo permite, mediante purificación Czochralski de Si grado metalúrgico ⁴³⁾ (habiéndose logrado células de η (AM0) $\sim 2\%$). Material algo mejor se obtuvo combinando ⁴⁴⁾ una purificación química con una Czochralski. Resultados mucho más alentadores son de esperar a corto plazo, pues la multiplicidad de desarrollos posibles es muy grande.

Automatización

La formación convencional bajo alto vacío de la grilla, el electrodo posterior y la capa antirreflectante de las células sólo permite procesar simultáneamente tandas de, a lo sumo, decenas de unidades. La discontinuidad consecuente en el proceso global de fabricación lleva a costos elevados; por otra parte, la construcción de líneas de evaporación al alto vacío de elevada capacidad, continuas y totalmente automatizadas implicaría ingentes inversio-

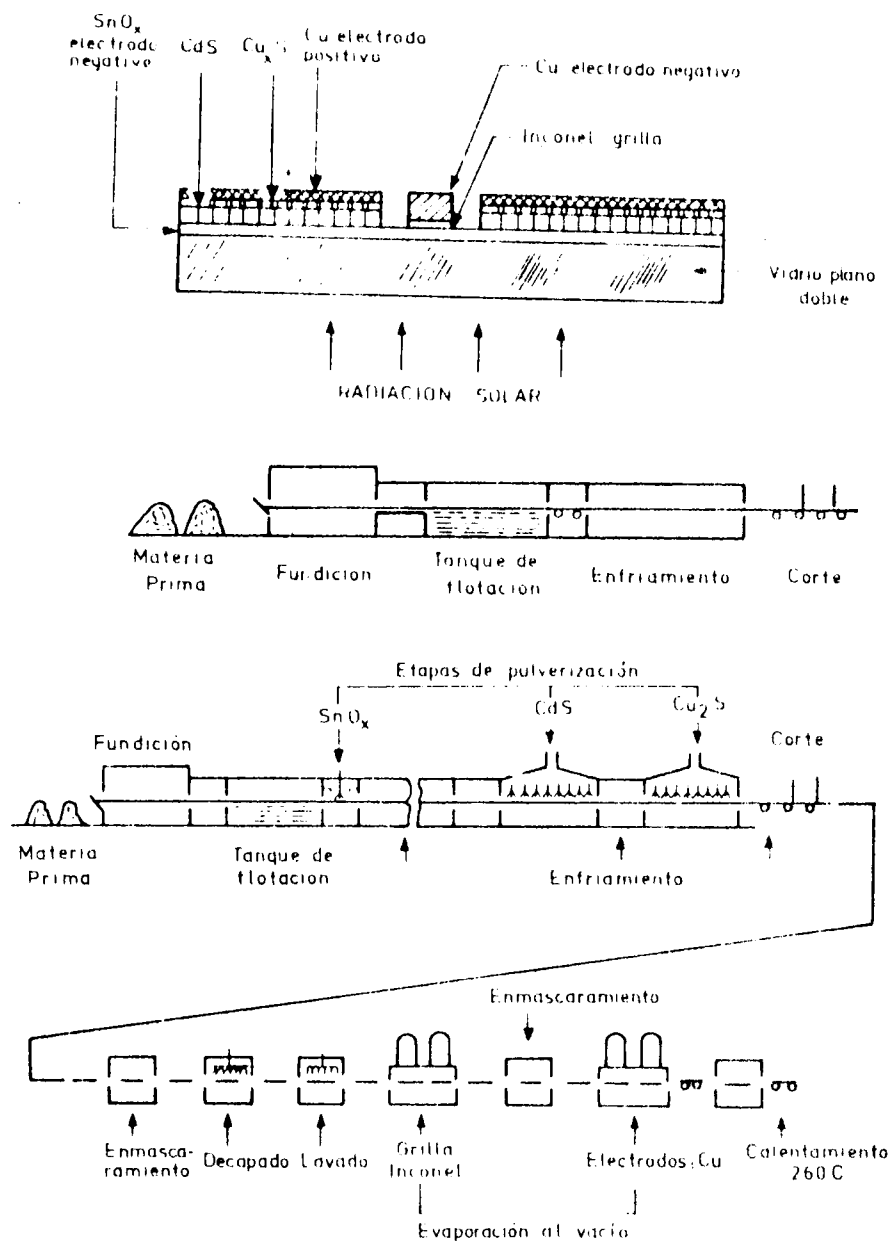


Fig.7.6: Arriba: corte de una célula producida con la técnica de pulverización.

Centro: típico esquema de producción de una planta de fabricación de vidrio plano por flotamiento. La materia prima alimenta en forma continua un horno de fundición y el líquido resultante se vuelca sobre un baño de estaño fundido, formándose una plancha de vidrio de algunos metros de ancho que luego es llevada a una estufa de enfriamiento y, finalmente, cortada a la medida deseada.

Abajo: esquema de la línea de producción propuesta; tres tanques de flotamiento con líquido caliente aseguran el calentamiento uniforme requerido para la obtención de depósitos uniformes de SnO_x , CdS y Cu_2S ; cierran la línea las etapas de evaporación de la grilla y del $\text{electrodo } \overset{x}{\text{positivo}}$ y la del tratamiento térmico final. De Ref. 35.

nes iniciales, incompatibles con costos de producción bajos. Por lo tanto, deben desarrollarse alternativas (quizá la única excepción a esta necesidad sean las células operables con radiación significativamente concentrada, ya que en ese caso lo definitorio suele ser el costo del sistema de concentración).

Un ejemplo de dichas alternativas lo constituye la reciente ³⁵⁾ fabricación exitosa de células a partir de obleas Czochralski en la cual la etapa de evaporación de la capa antirreflectante fue reemplazada por un proceso de decapado que produce una superficie de muy baja reflectividad sobre la cual se depositó, a presión atmosférica, un compuesto antirreflectante no convencional; además, los electrodos frontal y posterior se aplicaron serigráficamente. Se logró $\eta(\text{AM0}) = 10,4 \%$.

Otro ensayo en la misma dirección está dado por la propuesta ²⁹⁾ de un sistema que unifica la purificación de Si grado metalúrgico y la formación de capas policristalinas por depósito químico a partir de una fase vapor. El Si purificado en un crisol se hace reaccionar con SiF_4 para dar 2SiF_2 que, al entrar en contacto con un sustrato a menor temperatura, se descompone depositando el Si y regenerando el SiF_4 . Por lo tanto, éste sólo actúa como transportador de Si, no originándose productos secundarios. Versiones simplificadas del proceso han sido ensayadas con, hasta ahora, éxito relativo.

Otras posibilidades y desarrollos menores

Existe una gran variedad de proposiciones adicionales para abaratar la producción de células de Si (p.ej., Refs. e, f, y g y revistas allí citadas). Entre ellas, la construcción de unidades de sólo 2-3 μm de espesor ⁴⁶⁾, dotadas en su parte posterior de un reflector que multiplica el paso de la radiación por el Si, con lo cual se puede utilizar material de menor pureza, ya que el extremo rojo del espectro será absorbido en la cercanía de la juntura. Asimismo, se intenta ⁴⁷⁾ reemplazar la etapa de difusión para formar la región frontal por un proceso automatizable de implantación de impurezas en cintas monocristalinas mediante descargas en frío.

Entre los desarrollos menores citamos: (a) la introducción ⁴⁸⁾ de un campo adyacente a la superficie posterior de la célula, que aumenta la respuesta en el rojo y el valor de V_{ca} ; (b) el desarrollo ⁴⁹⁾ de la "célula violeta" con eficiencia 30 % superior a la de las convencionales debido a su elevada respuesta en el extremo azul (y también en el rojo, por incluir un campo adyacente a la superficie posterior) y (c) el logro ⁵⁰⁾, en 1974, de la "célula no reflectante", cuya superficie decapada permitió obtener $\eta(\text{AM1}) > 20 \%$, lo cual constituye una mejora del 14 % respecto de la célula violeta.

Tabla 7.1

Características típicas para células de $\text{CdS}/\text{Cu}_x\text{S}$ de la actual tecnología

<u>PARAMETROS GENERALES</u> (Para condiciones AM1: 100 mW/cm ²) η máxima (%) η promedio (%) V_{ca} (mV) J_{cc} (mA/cm ² -activo) Factor de llenado Reproducibilidad (%) ^{b)} Area activa (cm ²) $\Delta V_{ca}/\Delta T$ (mV/C)	~ 8 ~ 7 [>15] 450 - 500 [~ 650] 15 - 25 [~ 30] 0,7 [$\sim 0,8$] ~ 75 [>95] hasta ~ 50 1,5 - 2 (0,3-0,4 %)
<u>SUBSTRATOS</u>	Transparentes-opacos; Flexibles-rígidos Plásticos-vidrio-cuarzo-metálicos
<u>ELECTRODOS NEGATIVOS</u> (substrato no conductor)	Depósitos metálicos: Cu, Ag, etc. Resinas expoxi o poliimídica cargadas con Ag
<u>CONTACTOS OHMICOS</u>	Opacos: Zn, Ni, Al, Cu Transparentes: CdSnO_4 , Sn_xO , In_xO
<u>CAPA n DE CdS</u> Espesor evaporada (μm) Espesor pulverizada (μm) $T_{\text{substrato}}$ (C) Evaporación ($\mu\text{m}/\text{min}$)	20 - 50 2 - 7 180 - 250 1 - 3
<u>CAPA p DE Cu_xS</u> Espesor (μm) $T_{\text{solución CuCl}}$ (C) de inmersión (seg) Tratamiento térmico final	0,2 - 0,5 75 - 95 3 - 10 180 - 250 C, por algunos minutos, en aire
<u>GRILLAS</u> Transmisión (%)	Cementadas-evaporadas-electrodepositadas, serigrafadas Diversas combinaciones de Cu y Au; grafito. 80 - 95
<u>ENCAPSULADOS</u>	Plásticos(Aclar, Teflon, etc.)-vidrio

a) Entre corchetes: valores esperables como consecuencia de desarrollos futuros según conclusiones de una reciente reunión de trabajo (Ref. 53).

b) Cociente entre la cantidad de células cuya eficiencia difiere menos de 1% de la eficiencia media de un conjunto fabricado bajo condiciones especificadas, y la cantidad total del conjunto.

CELULAS DE CdS/Cu_xS

Hasta hace pocos años, la falta de estabilidad que caracterizaba estas células, hizo que fuesen totalmente descartadas para aplicaciones tanto terrestres cuanto espaciales. Desde entonces se hicieron progresos muy significativos y, si bien el problema no está resuelto en forma totalmente general, hoy en día no queda duda de que las células de CdS/Cu_xS pueden trabajar exentas de degradación por períodos de más de 10 años en condiciones normales de uso terrestres ^{23,51)}, siempre que se las opere a $\sim 70^\circ\text{C}$ y se tenga un valor de x algo menor que 1,995, dopado adecuado de ambas capas semiconductoras y encapsulado apropiado.

En cuanto a la disminución de costos, los esfuerzos se centran en la eliminación de la etapa de evaporación en alto vacío de la capa de CdS (pag. 11-28), como también de la grilla y de un eventual contacto óhmico entre el substrato y la capa de CdS. En el enfoque más avanzado ^{35,51)}, una solución de una sal de Cd y de un compuesto de S se pulveriza en aire sobre un substrato metalizado caliente, en cuya superficie reaccionan entre sí, formando una capa policristalina de CdS. En la Fig. 7.6 se muestra una propuesta para la automatización de este proceso, basada sobre el aprovechamiento pleno de una tecnología industrial ya experimentada como lo es la fabricación automática de vidrio plano por flotamiento; el método ha sido ensayado a escala de laboratorio, obteniéndose células con $\eta(\text{AM1}) \sim 5\%$ y, gracias a la lisura del substrato, con sólo $2\ \mu\text{m}$ de espesor para la capa de CdS, lo cual es económicamente muy favorable. Se espera poder llegar pronto a eficiencias mayores y áreas de $1000\ \text{cm}^2$.

Por otra parte, mientras se buscaba solución a la falta de estabilidad de estas células, se introdujeron técnicas constructivas nuevas para sus componentes: substratos, grillas, encapsulados, capas semiconductoras, etc., tendientes a lograr una paulatina disminución de costos y/o aumento de η . En la Tabla 7.1 resumimos el estado de desarrollo así alcanzado.

La mayor parte de los trabajos sobre células de CdS/Cu_xS se efectúa en los EE.UU. de N.A., Francia, el Japón, Gran Bretaña y la URSS.

OTROS TIPO DE CELULAS

Como ya mencionamos, ninguna de estas células se encuentra en producción comercial. Por otra parte, el esfuerzo de investigación conjunto dedicado a estos nuevos tipos de células crece significativamente año a año, habiéndose

Tabla 7.2

Características de algunas células no convencionales
en su actual estado de desarrollo

TIPO ^{a)}	η_{AM1} (%)	η_{AMO} (%)	AREA (cm ²)	REFEREN- CIAS
<u>HOMOJUNTURAS</u>				
$p^+Ga_{1-x}Al_xAs/pGaAs/nGaAs$ b)	19	14,7	-	54
" " c)	-	12	0,9	55
GaAs b)	9	-	0,4	56
<u>HETEROJUNTURAS MATERIAL SEMICONDUCTOR</u>				
$pGa_{1-x}Al_xAs/nGaAs$ c)	-	11	0,2	57
$nGaP/pGaAs$	7		0,04	58
$nCdTe/pCu_2Te$ c)	6	-	6	59
$pCdTe/nCdS$ c)	7	6	0,1	60,61
$pCdTe/nCdTe/nCdS$	5,8		-	42
nIn_2O_3/pSi	6	-	0,05	62
$pInP/nCdS$ c)	12,5 (AM2)	9,8	0,2	63
$pCuInSe_2/nCdS$ c)	12 (AM2)	-	0,008	63
<u>BARRERA SCHOTTKY</u>				
$Au/nGaAs_{0,78}P_{0,22}$ c)	12	9	0,17	64
Cr/pSi c)	9,5	-	1,0	65
<u>MOS</u>				
$Au/nGaAs$ c)	15	-	0,17	66,67
<u>OTROS TIPOS</u>				
JVM (Si)	-	9,9	4	68
BANDA VARIA- BLE $\left(\begin{array}{l} GaAs_{1-x}P_x \\ Cd_{1-x}Hg_xTe \end{array} \right.$ b)	4,7		-	59
	4	-	0,01	70

a) Las células a heterojunturas de $nCdTe/pCu_2Te$ y de $pCdTe/nCdS$ y la capa n de la célula de nIn_2O_3/pSi son de material policristalino; en todos los demás casos el material es monocristalino.

b) Célula sin película antirreflectante.

c) Célula con película antirreflectante.

dose decuplicado de 1970 a 1975. La mayoría de los semiconductores utilizados en ellos tienen características de absorción para el espectro solar que permiten utilizar espesores delgados de material en la construcción de las células y, asimismo, tolerar longitudes de difusión relativamente bajas; es decir, se requiere poca cantidad de material semiconductor y de una calidad no necesariamente óptima. Pero la mayoría también está afectada por problemas de disponibilidad de materia prima, complicada tecnología o baja eficiencia intrínseca, siendo las de barrera Schottky la excepción más evidente.

Homojunturas

Dentro de este tipo, las más desarrolladas son las de GaAs, material con eficiencia teórica próxima al máximo de la Fig. 7.3 y 10-20 % por encima de la teórica del Si según las estimaciones. En la fig. 7.4 se observa que la disminución de eficiencia al aumentar la temperatura es mucho menor para el GaAs que para el Si, por lo cual células construidas con aquel material pueden trabajar a radiación altamente concentrada, mientras que las de Si a lo sumo admiten concentraciones medianas. Por otra parte, el GaAs es escaso, costoso y poco investigado en comparación con el Si, que es abundante y barato. Por ahora, en laboratorio, ya se obtuvieron eficiencias AM0 y AM1 similares a las de células convencionales de Si, pero con áreas de sólo décimas de cm^2 (excepcionalmente de hasta pocos cm^2). La superficie pequeña no constituye mayor inconveniente si se considera que la aplicación lógica de estas unidades es operarlas a concentraciones elevadas. Variantes de estas células, con una capa GaAlAs depositada sobre la cara frontal han dado $\eta(\text{AM1}) = 15-19\%$ (Tabla 7.2). Según nuestra información, estas células se desarrollan principalmente en EE.UU. de N.A., la URSS y Gran Bretaña (p.ej., Refs. 54, 56 y 71).

Heterojunturas

Después de las células de $\text{nCdS/pCu}_x\text{S}$ (donde hemos indicado que el CdS forma la región n y el Cu_xS la p), las células a heterojuntura más desarrolladas son las que tienen una capa de GaAs, CdTe o InP, materiales con E_g en la vecindad del correspondiente al máximo de la eficiencia teórica (Fig. 7.3). Pero existe una muy abundante bibliografía que informa sobre las numerosas otras combinaciones de diversos materiales semiconductores en ensayo (p.ej., Refs. f y g), sobre todo en los EE.UU. de N.A. y, en menor grado, en la URSS, Francia, el Japón y México. La forma de los materiales puede ser mono o policristalina; en las heterojunturas policristalinas no aparece la dificultad que surge en las homojunturas de ese tipo al efectuar la etapa de difusión de im-

purezas desde la cara frontal, consistente en que éstas difundan por los bordes de grano hasta el electrodo posterior, cortocircuitando la unidad.

Estas células tienen eficiencias teóricas menores que las que se obtendrían a partir de homojunturas fabricadas con cada uno de los materiales constitutivos; sin embargo, no siempre es posible formar estas homojunturas, pues no todos los materiales fotovoltaicos admiten ser convertidos en materiales tipo n y tipo p. Las eficiencias experimentales de las células de heterojuntura (Tabla 7.2) se mantienen por ahora significativamente por debajo de sus valores teóricos.

Barreras Schottky y estructuras MOS

En las células a barrera de Schottky el potencial de juntura se establece por el contacto entre una capa metálica y un semiconductor, con lo que V_{ca} queda establecido por la altura de la barrera de potencial en esa interfase y no por el E_G del semiconductor; en general es menor que en una homojuntura del mismo material, razón por la cual se desarrollan métodos para elevar dicha barrera de potencial. Por otra parte, el campo interno es más intenso que en una homojuntura típica, lo cual lleva a corrientes fotogeneradas comparativamente elevadas al disminuir las recombinaciones de agujeros y electrones. Los semiconductores más usados son Si y GaAs y los metales más usuales Au, Cr y Pt.

La presencia de una muy delgada ($\geq 0,005 \mu m$) capa de óxido interfacial provoca un favorable incremento de la barrera de potencial, sin disminuir la corriente fotogenerada; por lo tanto, es de esperar mayor eficiencia de conversión de las estructuras MOS (metal/óxido/semiconductor) que de las barreras Schottky convencionales (Tabla 7.2).

Tratándose de una heterojuntura, el uso de semiconductores policristalinos goza de las mismas ventajas comparativas mencionadas en la sección precedente; más aún, se argumenta que la construcción de células metal/semiconductor es potencialmente más simple y económica que la de células de homojuntura. Hasta ahora, las mayores superficies alcanzadas son de pocos cm^2 .

Otras células

En la Parte IV de este estudio hacemos breve referencia a las células de juntura vertical múltiple (JVM), de ancho de banda variable, de estructura p-intrínseco-n (PIN), de soluciones electrolíticas y de materiales orgánicos. En la Tabla 7.2 damos datos característicos para algunas de ellas.

7.2. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION

Todos los sistemas fotovoltaicos de generación masiva propuestos son del tipo "distribuido", en los que, a diferencia de lo que ocurre con sistemas fototérmicos distribuidos (pag. 11- 7), no existe problema en el transporte de la energía generada hacia un punto central de utilización o almacenaje. En los sistemas sin concentración, los paneles de células se inclinan en un ángulo cercano a la latitud del lugar con eventual ajuste estacional . Si se usan concentradores, se requiere un sistema de seguimiento del Sol y, generalmente, disipadores de calor en las células; el calor extraído puede ser aprovechado ulteriormente, en cuyo caso se tendrá uno de los denominados "sistemas de energía total". El sistema fotovoltaico completo puede incluir subsistemas de regulación, de almacenaje de energía y de conversión de corriente continua a alterna.

Una diferencia adicional con las centrales fototérmicas consiste en que en éstas el turbogenerador está afectado por un fuerte factor de escala y otros subsistemas lo están en menor grado, mientras que en las fotovoltaicas dicho factor esencialmente sólo aparece para el almacenaje de la energía.

Operación de células con radiación solar concentrada

El funcionamiento de las células solares varía al modificarse la temperatura a la cual operan o la intensidad de la radiación incidente.

En la Fig. 7.4 mostramos la variación de la eficiencia teórica al incrementarse T por encima de la temperatura ambiente mientras se mantiene la iluminación constante. En la práctica se han conseguido $\eta \sim 5\%$ operando células de Si a $\sim 150^\circ\text{C}$ y de GaAs a $\sim 310^\circ\text{C}$, lo cual desde el punto de vista de los requerimientos de refrigeración constituye una diferencia importante. Estos dos materiales semiconductores son los candidatos primarios para operación comercial de células con radiación concentrada (como mencionamos, las de CdS/Cu_xS presentan problemas de estabilidad a más de $\sim 70^\circ\text{C}$).

Al crecer la intensidad incidente sobre una célula ideal mantenida a temperatura constante, la corriente I_{cc} generada crece proporcionalmente a aquélla mientras que la tensión de circuito abierto V_{ca} lo hace a menor ritmo. Para células reales de GaAs, el comportamiento de I_{cc} fue comprobado hasta concentraciones de 5000 y para células especiales de Si (de JVM), hasta 10.000; en cambio, el crecimiento de V_{ca} se limita por aumento de la T de operación y también el factor de llenado F disminuye por la presencia de resistencias serie $R_s \neq 0$ (ver Fig. 7.2).

De lo que antecede se concluye que la operación óptima de células ba-

jo radiación concentrada se logra con un apropiado balance entre potencia incidente, temperatura de operación y resistencia serie. Para concentrar la radiación se pueden utilizar cualquiera de los métodos descritos en la Secc. 6.1. Los métodos de refrigeración se dividen en "pasivos", que no consumen parte de la potencia generada por el conjunto fotovoltaico y "activos", que sí la consumen; los principales funcionan a convección libre o forzada de aire o agua. La resistencia serie se mantiene baja aumentando el reticulado de las grillas hasta un límite compatible con su transmisión y costo o, en las de GaAs, aplicando un depósito frontal de GaAlAs; también cabe la utilización de las células juntura vertical múltiple, que tienen R_s particularmente baja.

En general, al aumentar la concentración deberán mejorar la calidad óptica del sistema concentrador y la mecánica del sistema de rastreo, lo cual conduce a adoptar un compromiso económico. En cuanto a los aspectos vinculados a la utilización del terreno y a la interferencia causada por un concentrador sobre otro, son similares a los discutidos en la pág. 11-11. Finalmente, la eficiencia mínima aceptable para células a ser operadas con radiación concentrada depende fuertemente de la relación existente entre el costo por unidad de área de la célula misma, por una parte, y del sistema completo formado por la célula, el concentrador y el dispositivo de refrigeración, por la otra.

Se sostiene frecuentemente que la operación de células monocristalinas de Si o de GaAs con concentraciones elevadas es la solución más viable para la generación masiva de energía eléctrica a nivel terrestre, como también que resulta impracticable basar un sistema de generación masiva de electricidad sobre células de GaAs operadas sin concentración, ya que el GaAs tiene escasa abundancia.

En un desarrollo reciente ⁷²⁾ con células de GaAs se lograron $\eta(AM1) = 23\%$ a concentración 10 y $\eta(AM1) = 19\%$ a concentración 1735, que constituye resultados técnicamente muy alentadores; para el segundo caso, se podrían generar 24 MW_e a partir de 850.000 células con 100 m^2 de área activa total.

Almacenaje, conversión a corriente alterna y distribución de la energía generada

Las razones para la incorporación de sistemas de almacenaje a centrales eléctricas solares fueron dadas en la pág. 11-13. De los métodos allí citados, entre los más frecuentemente mencionados en relación con la conversión fotovoltaica figuran los basados sobre procesos electroquímicos o eléctricos puros: (a) baterías, usualmente de Pb-ácido, suponiéndose para las de gran capacidad una vida de ~ 10 años y una eficiencia de $\sim 80\%$; (b) electrólisis del

agua con vistas al almacenaje de H_2 ; (c) anillos superconductores, capaces de conducir indefinidamente elevadas densidades de corriente, si son mantenidos a ~ 5 K; (d) centrales de bombeo, en regiones con una conjunción meteorológica-orográfica apropiada.

Para concretar una planta de generación fotovoltaica a una red de distribución existente, será necesario convertir su salida y la del sistema de almacenaje de corriente continua a alterna, lo cual se logra con una eficiencia cercana al 80 %. Tratándose de sistemas fotovoltaicos directamente conectados al consumidor final, eventualmente deberán proveerse dispositivos para el uso alternativo de electricidad convencional de la red existente. Finalmente, para algunos usos específicos y ámbitos geográficos limitados, será posible utilizar directamente corriente continua: producción de Al, hidrógeno y soda cáustica; alumbrado público; etc..

Eficiencias, tamaños y comportamiento de centrales fotovoltaicas

La eficiencia global del sistema solar resulta de multiplicar la eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos por la del subsistema de conversión de corriente continua a alterna. Si para los paneles se acepta una eficiencia de 8-15 %, la global resulta de ~ 7 -13 %.

En cuanto a tamaños, las consideraciones generales hechas en la Secc. 6.2 para centrales fototérmicas con eficiencias entre 11 y 19 % son directamente aplicables a centrales fotovoltaicas y las áreas cubiertas por las superficies colectoras consignadas en la Tabla 6.2 equivalen a las áreas a cubrir con células en sistemas fotovoltaicos de la misma potencia y eficiencia (para eficiencias distintas, las áreas varían proporcionalmente).

Análisis de sistemas fotovoltaicos

Están en ejecución trabajos ⁷³⁾ destinados a identificar las aplicaciones más apropiadas de la conversión fotovoltaica para demandas localizadas (residenciales, comerciales, industriales, de pequeñas comunidades, etc..), centrales de potencia conectadas a redes de distribución y centrales de potencia afectadas específicamente a la producción de combustibles (p. ej., hidrógeno). Asimismo, existen ^{73,74,75)} análisis de operación simulada por computadora que evalúan las posibilidades energéticas y económicas de los sistemas.

Igual que en el análisis de Secc. 6.3 se impone como condición que la confiabilidad del sistema fotovoltaico debe igualar a la del convencional.

Centrales ubicadas en el espacio

En 1968 se propuso ⁷⁶⁾ colocar una muy amplia superficie de células fotovoltaicas de Si como satélite geosincrónico, portador, además, de un siste-

ma de conversión de la energía generada en microondas y de una antena adecuada para su transmisión a la Tierra, donde sería reconvertida a energía eléctrica. Las células estarían expuestas prácticamente siempre a radiación solar. La principal desventaja del proyecto es su enorme envergadura (una central capaz de entregar 5000 MW_e a nivel de tierra implica una estructura de ~ 12 km por ~ 4 km), lo cual lleva a una gran inversión inicial de capital. Las opiniones sobre su viabilidad están divididas^{76,77,78,79}). Por el intenso haz de microondas generable, este tipo de centrales posee potencialidades bélicas implícitas, siendo, por otra parte, destructible por un enemigo poseedor de tecnología avanzada. Asimismo, dicho haz podría tener efectos ecológicos diversos.

7.3. ANALISIS ECONOMICO

El costo final del kW_{eh} en las barras de salida de una futura central fotovoltaica o de sistemas para la alimentación de unidades residenciales y otras de envergadura relativamente pequeña, depende de gran cantidad de parámetros. Parte de éstos son idénticos a los que se tienen en cuenta al analizar los costos de la generación fototérmica de electricidad. Otros son específicos de los sistemas de conversión fotovoltaicos, como los que caracterizan a los paneles de células y a los dispositivos para la conversión de corriente continua a alterna, el almacenaje de la energía generada, el aprovechamiento de la energía térmica disponible como consecuencia de la baja eficiencia de la conversión fotovoltaica, y, en cierta medida, la concentración de la radiación sobre las células.

Igual que en el Capítulo 6, *la mayoría de los costos presentes y proyectados están dados en U\$S de los años 1972-1974 y, sólo ocasionalmente, en U\$S de años más recientes.*

7.3.1. Costo de componentes

Estando las centrales solares fotovoltaicas basadas sobre las características de un elemento esencial, la célula fotovoltaica, el costo de fabricación de ese elemento constituye el parámetro fundamental al evaluar la viabilidad de la generación masiva de electricidad en sistemas terrestres. El costo adicional de montar las células en paneles apropiados no es sin embargo, despreciable, razón por la cual también es usual considerar al panel de células como el constituyente básico de todo sistema fotovoltaico. El costo de los dispositivos de concentración debe ser considerado junto con el de las células a.

ser operadas con ellos y, como ya mencionamos, es la suma de ambos la que, sobre la base del costo del kWh generado, debe ser comparada con la alternativa de células operadas sin concentración; en particular, el costo de concentradores es un factor decisivo para la viabilidad económica del uso de células de GaAs. En cuanto al costo de sistemas de almacenaje, dependerá del modo de operación de la central.

CELULAS, MODULOS Y PANELES

El costo total de un sistema fotovoltaico se puede expresar como $K_{sist} = K_{inst} + K_{col} + K_{alm} + K_{transf}$, donde los dos primeros costos, referidos a la instalación del sistema y a los dispositivos colectores de la radiación, son, en muy buena aproximación, proporcionales al área cubierta por éstos; en cambio, los dos últimos, relativos al almacenaje y a la transformación de la energía generada, son, en primera aproximación, proporcionales a la potencia del sistema. Descomponiendo K_{col} en sumandos, uno de los cuales es el costo $k_{cél}$ de los paneles de células en sí y haciendo varias simplificaciones no demasiado drásticas, es posible obtener el valor máximo admisible para $k_{cél}$ tal que K_{sist} no exceda el valor máximo que permita la competitividad del sistema con los convencionales de generación eléctrica. En 1974, suponiendo ⁷⁹⁾ que en una central de seguimiento convencional el costo de la energía fuese de 20 mills/kWh y un valor de 10 % para la eficiencia de las células, se obtuvo $k_{cél} = 5,30 \text{ U\$S/m}^2$, valor que es 240 veces inferior al precio vigente en ese año para células terrestres. De ahí la aseveración de que es necesario bajar los costos de las células en aproximadamente dos órdenes de magnitud para posibilitar su aplicación terrestre masiva. Cambiando las suposiciones simplificadoras efectuadas, se obtienen ²⁹⁾ resultados numéricos sólo escasamente distintos.

Siendo las células de Si las de más avanzado desarrollo presente, la mayoría de los análisis generales sobre políticas de promoción, investigación y desarrollo a seguir para alcanzar las metas económicas de, por ejemplo, 500 U\\$S/kW-p-p y 100 U\\$S/kW-p-p [†], fijadas ^{82,83)} en los EE.UU. de N.A. para, respectivamente, 1985 y fines de siglo, están referidos a sistemas de Si. La política actualmente aceptada opta por efectuar fuertes inversiones en investi-

[†] Abreviamos kW-pico-panel y kW-pico-células como kW-p-p y kW-p-c respectivamente. El Watt-pico está definido al pie de la pág. 11-25. Supuesta una eficiencia nominal $\eta(AM) = 10\%$, los valores dados equivalen a 50 y 10 (U\\$S/m²) pico respectivamente.

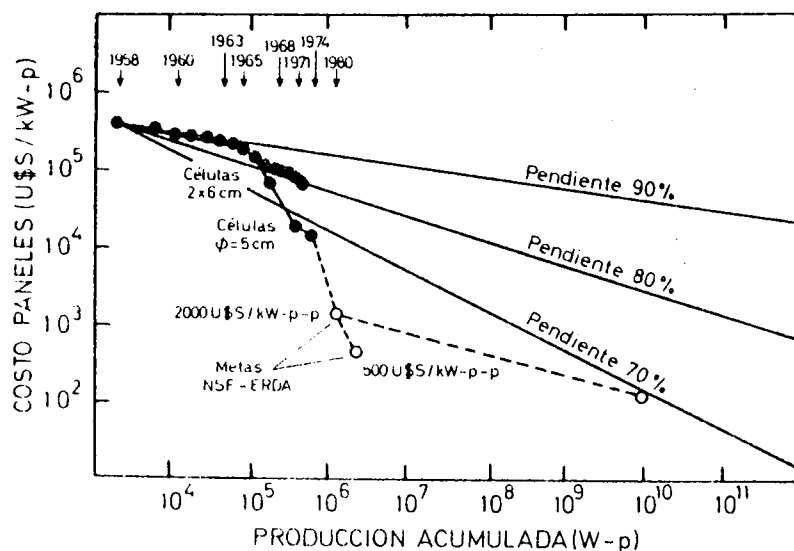


Fig. 7.7: Evolución de costos de paneles de células de Si en función del volumen de producción acumulada en el lapso 1968/74 y estrategia para forzar una reducción rápida de costos. Los puntos llenos representan costos reales para paneles espaciales y terrestres; los círculos, las metas especificadas por NSF⁸³⁾ y ERDA⁸²⁾, a ser alcanzadas mediante un programa intenso de investigación y desarrollo. En 1974 el costo era de ~ 20 U\$S/W-p-panel y la producción (en los EE.UU. de N.A.) de ~ 100 kW-pico/año, lo cual equivale a un volumen de ventas en ese país de sólo ~ 2 MU\$S/año. Las líneas llenas son curvas de aprendizaje cuya pendiente (en %) indica a qué fracción de valor inicial cae el costo cada vez que se duplica la producción. El parámetro determinante de la curva real es la producción anual en función del tiempo; el valor de ésta en un año dado supera lo acumulado hasta pocos años antes. De Ref. 27.

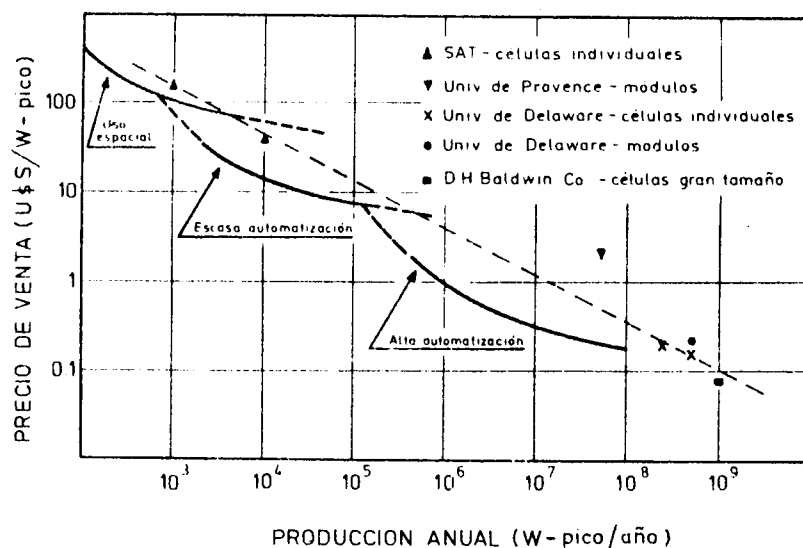


Fig. 7.8: Precios de venta estimados para exclusivamente unidades y pequeños módulos de células de CdS/CuS, en función de la producción anual según Mytton y otros autores. No se incluyen montaje en paneles, instalación y dispositivos de almacenaje de energía eléctrica. Dólares de 1973-74.

Toda la información corresponde a procesos en los que la capa de CdS es evaporada al vacío, excepto el punto en 10^9 W-pico/año, que corresponde a un proceso en el cual dicha capa se obtiene por pulverización. De Ref. 35.

Los puntos correspondientes a células individuales caen sobre una curva de aprendizaje con pendiente del 70 % (línea punteada).

gación y desarrollo de nuevas tecnologías a fin de lograr una disminución drástica de costos de producción a corto plazo, como para bajar de los ~ 20.000 U\$S/kW-p-p a 500 U\$S/kW-p-p en 1985, y de ahí en adelante lograr una caída adicional de costos de fabricación mediante una política de incentivación basada en compras oficiales hasta llegar a 100-200 U\$S/kW-p-p en la última década del siglo. El costo total de este programa sería de ~ 2000 millones de U\$S. En una discusión de esta política ²⁷⁾ (Fig. 7.7) se supuso que la segunda fase (de compra incentivada) se efectuaría a lo largo de una curva de aprendizaje de $\sim 82\%$ (ver leyenda de Fig. 7.7).

CELULAS DE Si

Como ya señalamos en la Secc. 7.1.2, ninguno de los desarrollos pre-visibles en la técnica de crecimiento de Si monocristalino por el método Czochralski (pág. 11-31) puede llevar a costos compatibles con la reducción de precios en un factor 50-100 requerida en las células. Por otra parte, aún un gran incremento en la producción anual de células de Si por este método ^{29, 84)} no podría reducir su costo en más de un factor 2.

Los trabajos referidos al desarrollo de la técnica de crecimiento dendrítico (pág. 11-33) no incluyen análisis de costos de detalle. Un panel de especialistas concluyó ⁸⁴⁾ que a lo sumo se podría llegar a un precio sólo 5 veces por debajo del costo de Si Czochralski.

La producción de cintas de Si por el procedimiento EFG (pág. 11-33), constituye el método más promisorio para la obtención de Si monocristalino para células solares, pues se considera que será extensible, sin excesivas complicaciones, al crecimiento simultáneo de algunas decenas de cintas del espesor apropiado desde un mismo crisol y a alta velocidad ($\sim 7 \text{ m}^2/\text{h}$). Todas las proyecciones de costos se efectúan suponiendo un proceso de crecimiento múltiple totalmente automatizado. Por otra parte, se indicó ²⁸⁾ que para alcanzar las metas fijadas para 1985 y el año 2000, es necesario producir cintas que reúnan respectivamente dos y tres de las condiciones siguientes: cintas anchas, cintas múltiples, materia prima policristalina de bajo costo. Las estimaciones concretas de costos efectuadas ^{26, 28, 33, 84)}, muestran una gran gama de suposiciones técnicas y de valores finales; en general se suponen anchos, velocidades de crecimiento y rendimientos de producción muy superiores a los actualmente logrados, mientras que los costos finales barren el intervalo 60-500 U\$S/kW-p-célula. El panel de especialistas ya mencionado, estimó ⁸⁴⁾ en 1973 que la .

Tabla 7.3

Fabricación de obleas de Si grado semiconductor ^{a)}

ETAPA DEL PROCESO DE FABRICACION		PUREZA (%)	USO PRINCIPAL	COSTO AÑO 1972 ^{b)}		DISTRIBUCION COSTOS PRODUCCION MASIVA c) (%)
				(US\$/kg)	(US\$/kW-p)	
	Arena	~ 90	Construcción	< 0,005	< 0,01	52
Producción de Si grado metalúrgico por reducción de sílice con carbono en horno de arco a > 1000 C (proceso de elevada eficiencia; materiales baratos). $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + 2 \text{CO}$	Si grado metalúrgico	~ 99	Acero	0,60 ^{d)}	1,40	
Producción de compuesto intermedio (en general, por razones económicas, triclorosilano) por reacción de Si grado metalúrgico pulverizado con HCl en reactor de lecho fluidizado, a ~ 250 C. $\text{Si} + 3 \text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$	Triclorosilano	> 99	Siliconas	6,00	14,00	
Separación del SiHCl_3 de otros clorosilanos por destilación fraccionada y purificación del SiHCl_3 mediante destilación adicional.		> 99,99999	-	-	-	
Producción de Si policristalino de alta pureza por reducción de SiHCl_3 con H ₂ de alta pureza, poniendo una mezcla de dichos gases en contacto con una lámina de Si o de grafito a ~ 1000-1200 C (deposición química en fase vapor). $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3 \text{HCl}$	Si policristalino	> 99,99999	Dispositivos semiconductores	60,00	140,00	24
Producción de Si monocristalino por método Czochralski a partir de Si fundido.	Si monocristalino	> 99,999	Dispositivos semiconductores	250,00	600,00	24
Producción de obleas por corte y remoción de daños mediante decapado.		> 99,999	Células solares	1300,00	3000,00 ^{e)}	-

a) De Refs. 26, 29, 37, 43, 85-89

b) Según Refs. 26 y 89, suponiendo un gasto de 2,3 kg de Si por kW-pico generado mediante células de 100 µm de espesor, operando con insolación AMI a $\eta(\text{AMI}) = 10\%$.

c) Según estimaciones de Ref. 79.

d) Alrededor de 1,00 en 1974-75 (Refs. 37, 40, 43 y 86).

e) Alrededor de 2500 en 1975 (Ref. 90).

inversión total necesaria para alcanzar costos del orden de 100 U\$S/kW-p-célula sería de 250 millones de U\$S hasta 1985, y una suma menor de ahí hasta fin de siglo.

En la Tabla 7.3 figuran las sucesivas etapas inherentes a la fabricación del Si de pureza grado semiconductor utilizado para la construcción de células convencionales de Si monocristalino. En cada etapa, el costo crece en aproximadamente un orden de magnitud. Por otra parte, aún un incremento de 10^5 en la cantidad de Si grado semiconductor requerido por la industria fotovoltaica (a ~ 100 GW/año) no produciría una disminución significativa de los costos tabulados ($< 50\%$), pues el volumen total continuaría siendo poco importante frente al consumo global de la industria de dispositivos semiconductores (Refs. 26 y 88). Es necesario obviar esta situación ya que, a medida que el proceso de fabricación de las células se automatice más, la materia prima Si contribuirá una fracción cada vez mayor al costo final de aquéllas; en última instancia, se convertirá en el factor limitativo de la disminución de costos: alcanzar la meta de 100 U\$S/kW-pico-panel implica²⁷⁾ que el costo del silicio policristalino a utilizar (Tabla 7.3) no puede exceder ~ 5 U\$S/kg ó $1,5$ U\$S/m² (suponiendo células de $100\ \mu\text{m}$ de espesor y $\eta = 10\%$, construidas y controladas en forma totalmente automática). Dado que es posible⁴⁰⁾ reducir en un orden de magnitud el precio del Si policristalino si se aumenta en cuatro órdenes la tolerancia en el contenido de impurezas, se encara la producción de Si policristalino de grado solar terrestre, con un costo de 5-10 U\$S/kg (pág. 11-35).

Si bien la eficiencia de células de Si policristalino presumiblemente será algo inferior a la de las hechas con Si monocristalino, en numerosos grupos de trabajos existe la convicción de que las primeras darán costos de producción por unidad de potencia generada sensiblemente menores^{60,91,92)}. En este sentido, se estimó que a mediados de la próxima década será posible producir $10\ \text{km}^2/\text{año}$ de células policristalinas de $\eta = 10\%$ a un costo < 500 U\$S/kW-pico, para lo cual es necesario disponer de un substrato con precio $< 0,50$ U\$S/m² y encontrar nuevas formas de producción de Si policristalino (pág. 11-35) a fin de reducir su costo en un orden de magnitud.

Para los posibles procesos de automatización propuestos no se han dado aspectos económicos concretos. Cabe mencionar que en la tecnología convencional de células espaciales, para pasar de la oblea de Si monocristalino a la célula, el costo aumenta entre 12 y 25 veces, mientras que en las proyecciones de costo efectuadas para la tecnología EFG, pasar de la cinta monocristalina a la célula terminada sólo significaría un factor 1,5.

CELULAS DE CdS/Cu_xS

En la Fig. 7.8 se condensa una buena fracción de la información disponible sobre proyecciones de costos para células de CdS/Cu_xS. El punto más significativo es que el costo de ~ 100 U\\$/kW-p-célula se alcanza al cabo de un volumen de producción anual prácticamente igual al dado en la Fig. 7.7 para células de Si (10^{10} W-pico/año)). El primer tramo de la figura corresponde a la tecnología actual, mientras que el segundo representa un desarrollo en el cual se han mejorado y mecanizado hasta cierto grado los procedimientos presentes, incluyendo procesos de serigrafía, electrodeposición, etc. y el uso de materiales nuevos. El último tramo, en cambio, ilustra tecnologías como la de pulverización de una solución de iones de Cd y de S sobre un sustrato rígido de grandes dimensiones (pág. 11-36) y también algunas evaluaciones basadas sobre procesos de producción masiva totalmente automatizados para la evaporación en vacío de la capa de CdS ($> 10^6$ m²/año; $> 10^8$ W-p/año).

La contribución del costo de la materia prima al costo total de la célula varía según el volumen de producción: según algunas estimaciones^{35,96} iría del 15 % para una producción de 10^3 W-pico/año hasta 70 % para una de 10^9 W-p/año. Por otra parte, el desperdicio de material es mucho mayor en los métodos convencionales basados sobre la evaporación al vacío del CdS que en el de pulverización.

Igual que para células de Si, en 1973 se estimó⁹⁴⁾ en 243 millones de U\\$ la inversión inicial para una planta que, por evaporación al vacío, produjese anualmente una cantidad de células capaz de generar $5 \cdot 10^8$ W-pico.

PANELES

Al disminuir el costo de las células en sí, el proceso convencional de armado y encapsulamiento de las mismas en paneles se convertirá en una fracción muy importante del precio total. Actualmente existe una relación ~ 2 entre el costo de un conjunto de células de Si y el de un panel armado con ellas, y la misma se mantiene en estimaciones de costos futuros; esto último supone una disminución muy fuerte en el costo absoluto del armado de paneles. Lograrlo no es fácil dado que en la construcción de paneles se utilizan materiales cuyos costos ya fueron comprimidos anteriormente (vidrios, metales, plásticos); por otra parte, los numerosos pasos de su fabricación ofrecen un campo de reducción de costos, y sobre él se centrarán los esfuerzos mediante la unificación de etapas constructivas; además, la construcción de células a partir de

cintas o depósitos policristalinos permitirá un mejor aprovechamiento del área total del panel.

COSTO ENERGETICO

Para todo sistema generador de energía interesa conocer el denominado "costo energético", definible como el cociente entre el tiempo que requiere el sistema para entregar una energía igual a la consumida en su construcción y la vida útil del sistema. Para el caso de la generación fotovoltaica de electricidad, este tema se limita al costo energético de paneles de células. Dado que no existe acuerdo sobre la vida útil esperable para las diversas alternativas de células en desarrollo, comúnmente el costo energético en sí se reemplaza por el "tiempo de recuperación de la energía consumida en la construcción del panel". Para células de Si de tecnologías actuales emplazadas en Tierra, se han dado ^{79,90)} para esta magnitud valores que van desde 3,5 años hasta 20 años. Para procesos de fabricación futuros las estimaciones son aún menos precisas pero se ha indicado < 6 meses para cintas EFG ⁹²⁾. Para células de CdS de tecnología avanzada se dan valores del orden del año ^{95,96)}.

SISTEMAS CONCENTRADORES

Recordemos (pág. 11-46) que para comparar económicamente sistemas de generación fotovoltaica con y sin concentración de la radiación solar, corresponde comparar la contribución al costo total del kWh generado en cada uno de los sistemas de, en un caso, los paneles de células y, en el otro, el sistema completo de concentración incluidas las células; para esto, es necesario tener en cuenta costos de operación y mantenimiento, que pueden diferir sustancialmente de un subsistema al otro. La comparación de distintos sistemas con concentradores se hace sobre las mismas bases expuestas. Es de destacar aún, que el sistema de concentración económicamente más competitivo no tiene necesariamente que ser el mismo para generación fotovoltaica que para generación fototérmica, ya que su costo es una fracción distinta del costo total de cada uno de dichos sistemas de conversión.

Uno de los grupos más activos en sistemas concentradores con células de Si tiene por objetivo demostrar que "los sistemas fotovoltaicos pueden alcanzar el rango de costos competitivos de 500-1000 U\$S/kW-p-p sin requerir innovaciones tecnológicas trascendentales en la fabricación de células solares",

y que esto se logrará con factores de concentración relativamente bajos, del orden de 100. En un trabajo reciente ⁷⁵⁾ estimaron costos bajo cierta cantidad de suposiciones simplificadoras razonables, dando valores también razonables a la insolación, al costo del terreno y a su factor de aprovechamiento, a la reflectividad de los concentradores, y suponiendo, además, una eficiencia de conversión de 15 % en las células y diversos sistemas de refrigeración pasivos y activos (pág. 11-44). Concluyeron preliminarmente que: (a) si las mencionadas células son producibles a un costo de 50 U\$S/m² no se justifica introducir sistemas de concentración; (b) en cambio, éstos pueden ofrecer apreciables ventajas económicas mientras el precio de las células supere significativamente aquel valor; (c) en todos los ejemplos analizados, los menores costos obtenidos siempre están por encima de los menores costos estimados para sistemas fototérmicos (Secc. 6.3); (d) para células relativamente baratas, los costos mínimos de generación en sistemas concentradores corresponden a factores de concentración bajos, lo cual implica que se podría tolerar una calidad óptica en los concentradores señaladamente inferior que la necesaria en sistemas fototérmicos.

Otro grupo considera ⁹⁷⁾ factible alcanzar 500 U\$S/kW-pico mediante el uso de células de Si de JVM (pág. 11-42), operadas a concentración 1000.

Para sistemas a células de GaAs, se utilizan corrientemente concentraciones mayores (del orden de 1000 y más), lo cual implica mayor calidad óptica de los concentradores. Por otra parte, los requerimientos de refrigeración, como ya señalamos, son menos críticos. Evaluaciones más o menos detalladas de costos del kW-p producido no fueron publicadas.

SISTEMAS DE ALMACENAJE Y CONVERSION

El desarrollo de convertidores de corriente continua a alterna se efectuará, en buena medida, independientemente de la introducción masiva de la conversión fotovoltaica al parque energético mundial y lo mismo vale, en grado menor, para sistemas de almacenaje de energía eléctrica. Los costos dados para los primeros van desde 100-200 U\$S/kW para unidades pequeñas en el rango de las decenas de kW a $\sim$ 30 U\$S/kW para las grandes en el rango de los MW. En lo concerniente a dispositivos de almacenaje, nos limitamos a considerar el costo de baterías. El de las unidades a Pb-ácido es función de su capacidad y varía en el rango 15-45 U\$S/kWh, según la vida supuesta para las unidades (entre 3 y 30 años). Las de diseño avanzado y gran capacidad, cuya disponibilidad se espera ⁹⁸⁾ para $\sim$ 1980 con eficiencias de $\sim$ 80 % y vida de

~ 10 años, tienen costo predominantemente dependiente de la potencia nominal: 80 U\$S/kW y un adicional de 2 U\$S/kW por cada hora de almacenaje deseada.

7.3.2. Costo comparativo del kWh producido en sistemas fotovoltaicos

En la Secc. 6.3, al discutir el costo del kWh generado por una central fototérmica, introdujimos una serie de conceptos que se aplican igualmente a centrales fotovoltaicas. Además, al comienzo de esta Sección hicimos referencia a los parámetros intervinientes en el cálculo del kWh que son comunes a la generación fotovoltaica y a la fototérmica, como también los que son específicos de los sistemas fotovoltaicos.

Sin embargo, de acuerdo con nuestras consideraciones previas sobre la generación fotovoltaica de electricidad, tiene escaso sentido discutir el real valor absoluto del kWh generado en centrales fotovoltaicas sobre la base de los costos actuales o proyectados de células solares. Lo único que puede (y debe) hacerse son evaluaciones comparativas en las que, se determinen los costos máximos admisibles para paneles de células en función del tipo de sistema del cual formarán parte. Esto permitirá identificar los sistemas más atractivos (por requerir una menor reducción de costos de los paneles) y determinar sobre qué líneas y qué componentes deben concentrarse los esfuerzos de investigación y desarrollo.

Existen varios ejemplos de este tipo de análisis (79,81,99). En uno de ellos se comparan una central terrestre instalada en Arizona con una central solar satélite, obteniendo resultados económicos mucho más favorables para la segunda. Hemos analizado críticamente este trabajo y concluido que una modificación perfectamente razonable de las suposiciones iniciales conduce a invertir los resultados a favor de la central terrestre.

En cuanto a sistemas fotovoltaicos para utilización in situ de la electricidad generada (residencias particulares, edificios colectivos de vivienda, centros comerciales e industriales, etc.), existe una cantidad de trabajos en los cuales se consideran sus aspectos económicos con mayor o menor profundidad, para sistemas a células de Si y de CdS/Cu_xS. En algunos casos se considera la influencia de desgravaciones impositivas para los particulares que instalen sistemas solares en los techos de sus casas o la de una política fiscal promotora con efectos también sobre los fabricantes. Asimismo, diversos autores examinaron los aspectos económicos de sistemas domiciliarios en los cuales se

combina la generación de electricidad con el aprovechamiento de la energía térmica del proceso fotovoltaico.

7.3.3. Disponibilidad y toxicidad de materiales fotovoltaicos

Las reservas y los recursos de las materias primas requeridas para la fabricación de los distintos tipos de células solares en desarrollo, constituyen un factor decisivo para la viabilidad de la producción masiva de éstas, ya sea a nivel mundial o nacional. De hecho, para un elemento dado, desde un punto de vista económico-industrial no es la abundancia natural la que interesa sino su real disponibilidad que, entre otros factores, depende de la distribución del elemento en el yacimiento (ley), de la ubicación de éste y de la tecnología de extracción disponible. Por ejemplo, la abundancia natural del Ga es diez veces superior a la del Cd, pero el correspondiente recurso es aproximadamente cuatro veces menor. Por otra parte, la abundancia natural del Si (sólo superada por la del oxígeno) y su fácil obtención, lo eximen de todo problema de disponibilidad, si bien en aplicaciones fotovoltaicas suelen ser usados con otros de disponibilidad sensiblemente menor: Cd, In y Ga. Finalmente, para un incremento sustancial a corto plazo en la potencia fotovoltaica instalada el factor determinante ¹⁰⁰⁾ es la producción anual *actual* de los materiales fotovoltaicos esenciales, ya que el volumen de las explotaciones mineras no es susceptible de ser aumentado abruptamente costos aparte, sólo el CdS y el Si permiten concretar a corto plazo una contribución significativa de la conversión fotovoltaica a la generación eléctrica global; el GaAs sólo podría hacerlo con concentraciones del orden de 1000.

La toxicidad de los materiales utilizados pesa económicamente, ya que los costos de fabricación serán mayores si se deben procesar materiales de este tipo. El Si es un elemento no tóxico y el Ga tiene toxicidad de muy bajo nivel, si bien la información disponible sobre este último es aún escasa. Para As, la máxima concentración aceptada en aire está entre 0,1 y 0,5 mg/m³, según la fuente. El Cd es un metal tóxico con propiedades similares a las del As y del Hg. La mayoría de sus compuestos lo son en igual medida, excepto el CdS que, debido a su insolubilidad, lo es en grado algo menor; sin embargo, en contacto con vapores ácidos o a temperaturas elevadas, este compuesto puede originar H₂S, que es sumamente tóxico. Las concentraciones máximas permitidas en aire son de 0,1 mg/m³ para Cd y CdS y de 20 ppm para H₂S.

Obviamente, la exposición de grandes superficies de compuestos de Cd y de As a cielo abierto implica una relativamente elevada posibilidad de escape de estos elementos al medio ambiente y de allí a las vías respiratorias y al aparato digestivo de los humanos; asimismo, el As puede penetrar al cuerpo humano por contacto con la piel. Por lo tanto, es preciso utilizar encapsulantes de muy baja permeabilidad inicial y de elevada resistencia a la corrosión.

8. SINTESIS Y CONCLUSIONES

A la fecha, en la mayoría de los responsables de la toma de decisiones referentes a la problemática energética en general, existe la convicción de que las aplicaciones de la energía solar a nivel terrestre constituyen una solución parcial muy importante.

Ya al presente existen ejemplos concretos de esta solución en dispositivos y sistemas de envergadura relativamente pequeña y el camino hacia las instalaciones de significativo impacto económico se está recorriendo con seriedad y solidez, tras una postergación de varios lustros⁺. Indicadores claros de esto son, p.ej., los presupuestos cada vez mayores (tanto absoluta cuanto relativamente) que las naciones del más variado grado de desarrollo asignan a investigación, desarrollo, construcciones o adquisiciones en el campo de la energía solar aplicada (ver, Parte I, Figs 4.4 a 4.6); la cada vez mayor participación de la industria privada de numerosos países en todos los aspectos del desarrollo de las aplicaciones de la energía solar, desde simples calentadores de agua para uso domiciliario a grandes centrales de potencia eléctrica; el hecho de que en todo el mundo muchos institutos oficiales hasta hace poco dedicados exclusivamente a investigaciones y desarrollos en otros campos energéticos (particularmente, el nuclear) ahora participen activamente en el aprovechamiento de la energía solar. Este conjunto de decisiones es facilitado por las características particularmente favorables de la energía solar: gratuita; inagotable; superabundante; prácticamente sin efectos ecológicos; de libre disponibilidad; de máxima intensidad en las regiones de poco o mediano desarrollo; aprovechable mediante tecnologías que, por una parte, son relativamente simples per se y en comparación con las ligadas a otras fuentes de energía y, por otra, son desarrollables ya sea por métodos intensivos en capital o en mano de obra; muchas veces disponibles en el lugar de la demanda. Estas ventajas no son invalidadas por los inconvenientes existentes: intermitencia del recurso, que implica la necesidad de incorporar sistemas de almacenaje de energía; baja densidad energética, que lleva a elevadas inversiones iniciales y requiere el uso de superficies grandes; costos actuales aún demasiados elevados.

+ En este contexto, el premio Nobel H. Alfven señaló¹⁰¹⁾ que el gran impulso, recibido por la industria nuclear de postguerra no estuvo basado sobre razones técnicas o económicas globales, sino sobre el deseo de amortizar la gran inversión efectuada en este campo con fines bélicos durante el conflicto mundial.

En lo concerniente al campo específico de las centrales solares de potencia, es interesante considerar las estimaciones realizadas en los EE.UU. de N.A. para su instalación, resumidas en la Tabla 8.1. Además de las conversiones fototérmicas y fotovoltaicas discutidas en los capítulos precedentes, consignamos los valores correspondientes a la energía eólica y al gradiente térmico de los océanos (ver Capítulo 5). La importancia de estas cifras resulta de

Tabla 8.1

Estimaciones de la energía eléctrica a ser suministrada
en los EE.UU. de N.A. a partir de energía solar ^{a)}

FUENTE	POTENCIA INSTALADA (GW_e) ^{b)}		
	1985	2000	2020
Conversión fotovoltaica	0,1	30	80
Conversión fototérmica	0,05	20	70
Energía Eólica	1,0	20	60
Gradiente térmico océanos	0,1	10	40
Total	1,3	80	250

a) De Ref. 82.

b) Las cifras representan potencias nominales equivalentes de plantas convencionales operadas con un factor de planta de 0,6 para 1985 y de 0,7 para las dos columnas siguientes.

su comparación con otras que caracterizan al parque eléctrico de la R. Argentina: la potencia total instalada al año 1973 era ¹⁰²⁾ de $8,4 \text{ GW}_e$ (10 % de la contribución solar eléctrica total al año 2000 en los EE.UU. de N.A.); para el año 2000 se estima una potencia total instalada en nuestro país de 60 GW_e (sólo 20 % más que la contribución conjunta de las conversiones fototérmicas y fotovoltaicas en ese mismo año en aquel país); el recurso hidroeléctrico

total de todas nuestras posibilidades fluviales se estimó ²⁰⁾ en 45 GW_e (sólo 18 % de la contribución solar al parque eléctrico de los EE.UU. de N.A. en el año 2020).

Conclusiones

De los trabajos analizados en este estudio, tanto para conversión fototérmica cuanto fotovoltaica, se concluye que:

- (a) la conversión térmica de la energía solar para generar electricidad constituye una alternativa claramente factible y que, para aproximadamente 1990, fecha de entrada en operación de las primeras centrales solares, éstas producirán el kW_eh a precios compatibles con los correspondientes a centrales convencionales a carbón o combustible nuclear;
- (b) la conversión fotovoltaica de la energía solar en electricidad constituye una alternativa totalmente demostrada en sus aspectos técnicos, que al presente ya es económicamente competitiva para aplicaciones seleccionadas; su efectiva implementación masiva requiere disminuir en aproximadamente dos órdenes de magnitud el costo de fabricación de los paneles de células solares, existiendo opinión generalizada de que esto se logrará antes de finalizar el presente siglo, época en que funcionarán centrales fotovoltaicas que, como en el caso de las fototérmicas, producirán el kW_eh a precios compatibles.

Para ambos sistemas de conversión es necesario desarrollar subsistemas de acumulación masiva de energía a costos razonables. A continuación señalaremos algunas conclusiones específicas.

FACTIBILIDAD: Los elementos requeridos para la construcción de centrales fototérmicas o fotovoltaicas son conocidos. La tecnología implicada no es de gran complejidad, especialmente si se la compara con las conectadas a fuentes nucleares (fisión, fusión); más concretamente, está al alcance de países con desarrollo tecnológico medio como la República Argentina.

Aunque salvo para ciertos componentes, en lo referente a la conversión fototérmica, todavía no se ha entrado en la etapa de comprobación experimental del comportamiento de partes de las futuras centrales ('proof-of-concept') las afirmaciones precedentes están avaladas, por ejemplo, por el funcionamiento del sistema de producción de vapor a partir de energía solar existente, desde 1968, en St. Ilario de Nervi, Génova y por el del horno solar de Odeillo, Francia, en operación desde 1970. Para la conversión fotovoltaica, desde el punto de vista exclusivamente técnico, para ninguno de los subsistemas existe un factor de escala que implique la necesidad de comprobaciones adicionales de

factibilidad antes de pasar paulatinamente de los pequeños sistemas actuales a las centrales futuras. La factibilidad de las células de Si monocristalino está demostrada desde varios lustros y las de Si policristalino se están obteniendo con eficiencia razonable. Para las células de $\text{CdS/Cu}_x\text{S}$ el problema de la inestabilidad ha sido solucionado en buena medida por algunos grupos. Las células de GaAs han sido experimentadas exitosamente en condiciones de concentración elevada. Existe además, una cantidad de otros tipos de células en ensayo.

Referente a la abundancia de materiales, para las centrales fototérmicas, en particular las que funcionan con receptor central, que es el caso más estudiado, no se necesita material crítico alguno. Para las fotovoltaicas, la disponibilidad de Si es prácticamente ilimitada, la de S vasta, la de As grande y la de Cd seguramente aceptable si las células a construir con él son de pocos μm de espesor; dada la baja ley con que se lo encuentra en la naturaleza, el empleo del Ga, sólo es factible en células que se operen a concentración elevada.

En cuanto a la implementación de acciones tendientes a desarrollar sistemas solares de generación de electricidad en la República Argentina, para el caso de conversión fototérmica la información analizada indica que hay suficientes elementos de juicio para iniciar ya tareas en una de las líneas; para la conversión fotovoltaica, en cambio, a la fecha está poco definido cuál es la vía de desarrollo destinada a lograr la disminución de costos de fabricación requerida, y siendo todas ellas de implementación relativamente costosa, consideramos adecuado un período de espera de algunos años antes de invertir en el país sumas *cuantiosas* para desarrollar experimentalmente una o más de dichas vías; hasta entonces, será valiosa la existencia de grupos que efectúen desarrollos de poco requerimiento de capital y/o tareas de seguimiento de técnicas desarrolladas en el extranjero.

EFICIENCIA: Para la conversión fototérmica, las eficiencias de los subsistemas solares más convenientes cubren el rango aproximado de 50-65 %. Dado que la eficiencia del subsistema convencional (turbogenerador) normalmente no supera el 40 %, las eficiencias globales de las centrales solares fototérmicas resultan aproximadamente 17-23 %. Las eficiencias de los paneles solares a ser utilizados en centrales fotovoltaicas probablemente será de 8-15 %; la utilización de convertidores de corriente continua a alterna podría llevar ese rango a 7-13 %.

COMPETIVIDAD: Tanto para conversión fototérmica cuanto fotovoltaica se considera que para antes de fin de siglo las centrales solares producirán el

kW_eh a precios competitivos con el del generado por centrales convencionales.

En el caso de conversión fototérmica, la competitividad establecida es válida para los sistemas a receptor central operados en el modo de seguimiento de carga; sin embargo, para los otros sistemas o modos de operación, el kW_eh se producirá a un costo, a lo sumo, doble del producido por centrales convencionales; en particular, para el sistema con concentradores cilíndricos fijos a espejo facetado se predice una disminución de costos que hará que el kW_eh producido (ver Fig. 6.5) resulte de un costo similar al producido en los sistemas a receptor central.

Para conversión fotovoltaica, los esfuerzos hacia el logro de dicha competitividad se centra fuertemente en obtener una disminución del costo de las células mismas. Se considera actualmente a los semiconductores usados en las células de $\text{CdS/Cu}_x\text{S}$, Si y GaAs como los materiales más promisorios tanto desde el punto de vista técnico como económico. Es de destacar que dicha disminución de costos no es lograble a través de sólo aumentar la eficiencia de las células, siendo imprescindible introducir nuevos procesos de producción.

Por otra parte, debe destacarse que el mayor inconveniente para la implementación de centrales solares reside en la elevada inversión inicial de capital requerida.

Finalmente, al evaluar la competitividad en términos no estrictamente numéricos, debe considerarse los ya mencionados hechos de que las centrales solares no producen contaminación y de que emplean una fuente de energía primaria que es inagotable y, en muy elevado grado, de libre disponibilidad.

EFFECTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE: En el conjunto de evaluaciones efectuadas no se ha individualizado ningún efecto pernicioso sobre el medio ambiente; cabe acotar que en lo referente al balance térmico global en sí, éste únicamente es alterado ligera y localmente por la concentración de la energía solar incidente sobre áreas extensas en áreas que son órdenes de magnitud menores. Las centrales térmicas convencionales y nucleares, en cambio, producen contaminación térmica mucho más significativa y, por el quemado de sus combustibles, también química o radiactiva. Para el caso fotovoltaico, la exposición a cielo abierto de grandes superficies de células fabricadas con compuestos de Cd o As de elevada toxicidad, requeriría que éstas estuviesen encapsuladas en forma particularmente confiable.

EVOLUCIONES NECESARIAS Y ESPERABLES: Están en ejecución y serán intensificados los trabajos vinculados al estudio de todos los sistemas de conversión tanto fototérmicos como fotovoltaicos enunciados en

los capítulos anteriores, no pudiendo descartarse la aparición de nuevos conceptos. Consecuentemente, algunas de las conclusiones precedentes deben ser consideradas como provisionarias y deberán estar sujetas a constante revisión.

En el campo de los subsistemas básicos, es imprescindible concentrar esfuerzos en el estudio y desarrollo de las facilidades de almacenaje de energía a ser utilizadas en conjunción con centrales solares.

Referente a la conversión fotovoltaica, es deseable que se efectúen más estudios comparativos de sistemas con y sin concentración y que se profundicen las evaluaciones de los costos energéticos involucrados en la construcción de los sistemas. Asimismo, sería conveniente que se efectuase una evaluación internacional sobre las implicancias de construir centrales solares satélites.

Para concluir, destacamos algunas diferencias existentes entre los dos sistemas de conversión analizados en el presente estudio:

- (a) 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 de un convertidor de corriente continua a 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 célula utilizada;
- (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, es conveniente que trabajen a temperatura elevada (500 C), lo cual requiere sistemas de enfriamiento que en zonas desérticas pueden llegar a ser sumamente costosos; los sistemas fotovoltaicos, en caso de operarse 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 más 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 servicio para su correcto funcionamiento; los fotovoltaicos, si se alcanza el nivel de costos necesarios sin el empleo de concentradores,

prácticamente carecen de partes móviles;

- (f) los sistemas fototérmicos producen directamente energía térmica que parece más factible de acumular económicamente en grandes cantidades que la energía eléctrica producida directamente por el sistema fotovoltaico;
- (g) los sistemas fototérmicos se han analizado con bastante detalle hasta el nivel de centrales, habiéndose obtenido costos estimados del $\text{kW}_e \text{ h}$ que los presentan como competitivos con los convencionales; para los sistemas fotovoltaicos, el análisis se ha hecho a fondo hasta el nivel de paneles de células, siendo aún necesario lograr una disminución de costos de aproximadamente dos órdenes de magnitud para que éstos sean competitivos con los convencionales.

REFERENCIASConvenciones

- |a| "Congreso París": trabajo presentado en el Congreso Internacional "El Sol al Servicio del Hombre", auspiciado por la UNESCO; París, Francia (Julio 1973).
- |b| "Reunión Fort Collins": trabajo presentado en la Reunión Anual de la Sección de EE.UU. de N.A. de la Sociedad Internacional de Energía Solar; Fort Collins, Colorado, EE.UU. de N.A. (Agosto 1974).
- |c| "Conferencia Seattle": trabajo presentado en la 8ª Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos; Seattle, EE.UU. de N.A. (Agosto 1970).
- |d| "Conferencia Silver Spring": trabajo presentado en la 9ª Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos; Silver Spring, EE.UU. de N.A. (Mayo 1972).
- |e| "Reunión Cherry Hill": trabajo presentado en la Reunión de Trabajo sobre Conversión Fotovoltaica de la Energía Solar para Aplicaciones Terrestres, organizada por el Jet Propulsion Laboratory del Instituto de Tecnología de California; Cherry Hill, EE.UU. de N.A. (Octubre 1973).
- |f| "Conferencia Hamburgo": trabajo presentado en la Conferencia Internacional sobre Generación de Potencia por Medios Fotovoltaicos; Hamburgo, República Federal Alemana (Setiembre 1974).
- |g| "Conferencia Scottsdale": Trabajo presentado en la 11ª Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos; Scottsdale, EE.UU. de N.A. (Mayo 1975).
- |h| "Congreso Los Angeles": trabajo presentado en el Congreso Internacional de la Sociedad Internacional de Energía Solar; Los Angeles, EE.UU. de N.A. (Julio 1975).

-
- 1) P. de Vago, "La planta solar económica". Construcciones vol. 18 N° 207, 403 (1967); vol. 18 N° 208, 461 (1967).
 - 2) L.E.Funes, "Aspectos técnicos y económicos de la transformación de la energía solar en energía eléctrica", Informe del Departamento de Electromecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo para la Empresa Nacional de Agua y Energía Eléctrica, San Juan, Rep. Argentina (1970).
 - 3) G.Francia, Solar Energy 12, 51 (1968).
 - 4) F.Trombe y A.le Phat Vinh, Solar Energy 15, 57 (1973).
 - 5) A.D.Meinel y M.P.Meinel en "The Energy Crisis", 99 (1972), editado por R.S.Lewis y B.I.Spinrad (Educational Foundation for Nuclear Science, Chicago, Illinois, EE.UU. de N.A.).

- 6) A.D.Meinel y M.P.Meinel, Physics Today, pág 44 (Febrero 1972).
- 7) A.D.Meinel, M.P.Meinel, D.B.McKenney y B.O.Seraphin, "Photothermal Conversion of Solar Energy Large-Scale Electrical Power Production", E 13, Congreso París (1973).
- 8) P.B.Bos, W.A.Kammer y E.Blond, "Solar-Thermal Conversion Mission Analysis - Southwestern United States", Informe ATR-74 (7417-16)-2, Vol. I The Aerospace Corporation, California, EE.UU. de N.A. (1975).
- 9) R.E.Athey, "Evaluation of the Flat Plate Solar Collector System for Electric Power Generation", Reunión Fort Collins (1974).
- 10) W.C.Dickinson, A.F.Clark, J.A.Day y L.F.Wouters, "The Shallow Solar Pond Energy Conversion System", Informe UCRL-75780 del Lawrence Livermore Laboratory, California, EE.UU. de N.A. (1974) y Reunión Fort Collins (1974).
- 11) R.C.Jordan, E.R.G.Eckert, J.W.Ramsey, R.N.Schmidt, E.M. Sparrow y G.K.Wehtner, "Terrestrial Solar Thermal Power Systems", E 137, Congreso París (1973).
- 12) J.L.Russel, 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).
- 13) T.A.Chubb, "Analysis of Gas-Dissociation Solar-Thermal Power System", Reunión Fort Collins (1974) y Solar Energy 17, 129 (1975).
- 14) F.A.Blake, "Solar Thermal Power", Informe de la Martin Marietta Aerospace Corporation, Colorado, EE.UU. de N.A. (1975)
- 15) F.A.Blake y J.D.Walton, "Update on the Solar Power System and Component Research Program", Reunión Fort Collins (1974).
- 16) V.A.Baum, R.R.Aparissi y B.A.Gark, Solar Energy 1, 6 (1957).
- 17) J.C.Powell y G.M.Kaplan, "Dynamic Conversion of Solar Generated Heat to Electricity-A Survey of Results", Reunión Fort Collins (1974).
- 18) A.C.Skinrood, T.D.Brumleve, C.T.Schäfer, C.T.Yokomizo y C.M.Leonard Jr., "Status Report on a High Temperature Solar Energy System", Informe SAND74-8017 de Sandia Laboratories, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 19) J.M.Hammer et al., Honeywell; J.C.Grosskreutz et al., Black and Veatch; "Dynamic 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).
- 20) B.J.Csik, H.M.Marrero y H.Sarraillet, "Análisis Electroenergético Argentino", Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Rep.Argentina (1974).
- 21) F.P.Califano, en Actas del "1st Course on Solar Energy Conversion", Pro-cida, Italia (1974), p. 363, editado por A.N.Mancini e I.F.Quercia, del International College on Applied Physics, Italia.
- 22) G.H.Hewig, F.Pfisterer y W.H.Bloss, "Optical Properties and Theoretical Model of the $\text{Cu}_x\text{S}-\text{CdS}$ Heterojunction", Conferencia Scottsdale, 441 (1975).

- 23) K.Boer, "Assesment of the International Workshop on CdS Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 514 (1975).
- 24) H.Fisher, "Festkörperprobleme/Advances in Solid State Physics" XIV, 153 (1974), editado por H.J.Queisser (Pergamon Press Ltd., Oxford).
- 25) P.Rappaport, RCA Review 20, 373 (1959).
- 26) C.G.Currin, K.S.Ling, E.L.Ralph, W.A.Smith y R.J.Stirn, "Feasibility of Low Cost Silicon Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 363 (1975).
- 27) P.D.Maycock y G.F.Wakefield, "Business Analysis of Solar Photovoltaic Energy Conversion", Conferencia Scottsdale, 252 (1975).
- 28) A.Kran, "High-speed Silicon Processing for Low Cost Solar Cells - A Comparative Analysis", Conferencia Hamburgo, 177 (1974).
- 29) M.Wolf, "Progress in New Low Cost Processing Methods", Conferencia Scottsdale, 306 (1975).
- 30) R.K.Riel, "Status of Silicon Web Solar Cells", Reunión Cherry Hill, Vol. II, 36 (1973).
- 31) R.G.Seidensticker, L.Scudder y H.W.Brandhorst, Jr., "Dendritic Web: A Viable Material for Silicon Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 299 (1975).
- 32) T.F.Ciszek, Materials Research Bulletin 7, 731 (1972).
- 33) A.I.Mlavsky. "The EFG Growth of Silicon Ribbon for Solar Cells", Reunión Cherry Hill, Vol. II, 22 (1973).
- 34) T.F.Ciszek y G.H.Schwuttke, "Silicon Ribbons - A New Approach to Low Cost Single Crystal Silicon Solar Cells", Conferencia Hamburgo, 159 (1974).
- 35) J.F.Jordan, "Development of Very Low Cost Solar Cells for Terrestrial Power Generation", Conferencia Hamburgo, 221 (1974).
- 36) M.Leipold, R.Stirn, J.Zoutendyk y R.De Angelis, "Evaluation of Silicon Ribbon Material for Solar Cell Fabrication", Conferencia Scottsdale, 290 (1975).
- 37) T.L.Chu, H.C.Mollenkopf, K.N.Singh, S.S.Chu y I.C.Wu, "Polycrystalline Silicon Solar Cells for Terrestrial Applications", Conferencia Scottsdale, 303 (1975).
- 38) P.P.Artyshhevskii, V.V.Zadde, A.K.Zaitseva, L.M.Zatulovskii, D.Ya. Kravetskii, V.I.Strel'tsova y P.M.Chaikin, Izv. Akad. Nauk SSSR 36, 522 (1972).
- 39) R.Buhs y H.Gochermann, "German Activities in the Terrestrial Application of Solar Cell Arrays", Informe de la EAG-Telefunken, Space Technology Department, Wedel, Alemania (1976).
- 40) G.F.Wakefield, P.D.Maycock y T.L.Chu, "Influence of Impurities on Silicon Solar Cell Performance", Conferencia Scottsdale, 49 (1975).

- 41) L.P.Hunt, "Feasible Reactions for the Synthesis of Silicon as Determined by a Thermodynamic and Economic Screening Process", Conferencia Scottsdale, 259 (1975).
- 42) A.Uehara, Technocrat 9, N° 3, 16 (1976).
- 43) J.R.McCormick, L.D.Crossman y A.Raucholz, "Directional Freezing for Upgrading Metallurgical-Grade Silicon for Solar Cell Applications", Conferencia Scottsdale, 270 (1975).
- 44) V.D.Dosaj, L.P.Hunt y L.D.Crossman, "Single Crystal Silicon Ingot Pulled from Chemically Upgraded Metallurgical-Grade Silicon", Conferencia Scottsdale, 275 (1975).
- 45) E.Ralph, "Recent Advances in Low Cost Solar Cell Processing", Conferencia Scottsdale, 315 (1975).
- 46) D.Redfield, "Enhanced Photovoltaic Performance of Thin Silicon Films by Multiple Light Passes", Conferencia Scottsdale, 431 (1975).
- 47) J.P.Ponpon y P.Siffert, "Silicon Solar Cells Made by Ion Implantation and Glow Discharge", Conferencia Scottsdale, 342 (1975).
- 48) J.Mandelkorn y J.H.Lamneck, "Advance in the Theory and Application of BSF Cells", Conferencia Scottsdale, 36 (1975).
- 49) J.Lindmayer y J.F.Allison, COMSAT Technical Review, 3, 1 (1973).
- 50) J.Haynos, J.Allison, R.Arndt y A.Meulenberg, "The COMSAT Non-reflective Silicon Solar Cell: a Second Generation Improved Cell", Conferencia Hamburgo, 487 (1974).
- 51) J.Besson, T.Nguyen Duy, A.Gauthier, W.Palz, C.Martin y J.Vedel, "Evaluation of CdS Solar Cells as Future Contender for Large Scale Electricity Production", Conferencia Scottsdale, 468 (1975).
- 52) H.E.La Belle, Jr., Materials Research Bulletin 6, 581 (1971).
- 53) J.J.Loferski, Proceedings of the IEEE 51, 667 (1963).
- 54) H.Hovel y J.Woodall, "Diffusion Length Improvements in GaAs Associated with Zn Diffusion During $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Growth", Conferencia Scottsdale, 433 (1975).
- 55) V.M.Andreev, T.M.Golovner, M.B.Kagan, N.S.Koroleva, T.L.Lyubashevskaya, T.A.Müller y D.N.Tret'yakov, Soviet Physics-Semiconductors 7, 1525 (1974).
- 56) A.A.Gavrilov, G.A.Kachurin y L.S.Smirnov, Applied Solar Energy (Gelioteknika) 11, N° 5-6, 87 (1975).
- 57) Zh.I.Alferov, V.M.Andreev, M.B.Kagan, I.I.Protasov y V.G.Trofim, Soviet Physics - Semiconductors 4, 2047 (1971).
- 58) R.K.Purohit, Physica Status Solidi 24, K57 (1967).
- 59) J.Lebrum, "A New CdTe Thin Film Solar Cell", Conferencia Seattle, 33 (1970).
- 60) P.H.Fang, "Low-Cost Silicon Solar Cells for Terrestrial Applications", Congreso Paris, 111 (1973).

- 61) D.Bonnet y H.Rabenhorst, "New Results on the Development of a Thin Film p-CdTe-n CdS Heterojunction Solar Cell", Conferencia Silver Spring, 129 (1972).
- 62) S.W.LAI, S.L.Franz, G.Kent, R.L.Anderson, J.K.Clifton y J.V.Masi, " $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Si}$ Heterojunction Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 398 (1975).
- 63) J.L.Shay, S.Wagner, K.Bachmann, E.Buehler y H.M.Kasper, "Preparation and Properties of InP/CdS and CuInSe/CdS Solar Cells", Conferencia Scottsdale 503 (1975).
- 64) Y.M.Yeh y R.J.Stirn, "Improved Schottky Barrier Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 391 (1975).
- 65) W.A.Anderson y R.A.Milano, Proceedings IEEE 63, 206 (1975).
- 66) R.J.Stirn y Y.C.M.Yeh, "The AMOS Cell-An Improved Metal-Semiconductor Solar Cell", Conferencia Scottsdale, 437 (1975).
- 67) R.J.Stirn y Y.C.M.Yeh, Applied Physics Letters 27, 95 (1975).
- 68) W.W.Lloyd, "Fabrication of an Improved Vertical Multijunction Solar Cell", Conferencia Scottsdale, 349 (1975).
- 69) L.E.Stone et al., Progress in Astronautics and Rocketry: Energy Conversion for Space Power, Vol. 3, 299 (1960).
- 70) G.Cohen-Solal, L.Svob y Y.Marfaing, "Advances in Graded Gap Solar Cell Research", Conferencia Silver Spring, 28 (1972).
- 71) J.Ewan, S.Kamath y R.C.Knechtli, "Large Area GaAlAs/GaAs Solar Cell Development", Conferencia Scottsdale, 497 (1975).
- 72) L.W.James y R.L.Moon, "GaAs Concentrator Solar Cells", Conferencia Scottsdale, 402 (1975).
- 73) S.L.Leonard, "Mission Analysis of Photovoltaic Conversion of Solar Energy for Terrestrial Applications", Conferencia Scottsdale, 245 (1975).
- 74) M.Wolf, "Photovoltaic System Model for Terrestrial Applications", Reunión Cherry Hill, Vol. 11, 122 (1973).
- 75) D.L.Evans y L.W.Florschuetz, "Cost Studies on Terrestrial Photovoltaic Power Systems with Sunlight Concentration", Congreso Los Angeles (1975).
- 76) P.E.Glaser, Science 162, 857 (1968).
- 77) "The Future of Terrestrial Use of Photovoltaic Power: a Round Table Discussion", Congreso París, 663 (1973).
- 78) E.H.Appelman et al., "Solar Energy Evaluation Group Report", Informe ANL-8045* del Argonne National Laboratory, EE.UU. de N.A. (1973).
- 79) M.Wolf, Energy Conversion 14, 49 (1975).
- 80) E.L.Ralph y F.Benning, "The Role of Solar Cell Technology in the Satellite Solar Power Station", Conferencia Silver Spring, 370 (1972).

- 81) P.E.Glaser, O.E.Maynard, J.Mackociak, Jr., y E.L.Ralph, "Feasibility Study of a Satellite Solar Power Station", Informe NASA CR-2357 de la National Aeronautics and Space Administration, Washington. D.C., EE.UU. de N.A. (1974).
- 82) "National Solar Energy Research, Development and Demonstration Program", Informe ERDA-49 de la Energy Research and Development Administration, Washington, D.C., EE.UU. de N.A. (1975)
- 83) H.R.Blieden, "The Status of the National Science Foundation Photovoltaic Program", Reunión Fort Collins (1974).
- 84) P.Rappaport, "Single-Crystal Silicon", Reunión Cherry Hill, Vol. I, 9 (1973).
- 85) C.D.Ouwens y H.Heijligers, Applied Physics Letters 26, 569 (1975).
- 86) M.Wolf, "Process Development for Low Cost Integrated Solar Arrays", Conferencia Hamburgo, 699 (1974).
- 87) M.Kobayashi, "A Proposal for a Consistent Process of Manufacturing Silicon for Solar Cells from Silica by Use of Solar Energy", Congreso Los Angeles (1975).
- 88) E.L.Ralph, "Material Factors in Manufacturing Solar Cells", Informe Spectrolab Division, de Textron Inc., Sylmar, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 89) L.D.Crossman y L.P.Hunt, "Proposal for Low Cost Silicon Processes", Reunión Cherry Hill, Vol. II, 74 (1973).
- 90) J.Lindmayer, "Recent Developments in Terrestrial Photovoltaics", Conferencia Scottsdale, 317 (1975).
- 91) T.L.Chu, "Polycrystalline Silicon", Reunión Cherry Hill, Vol. I, 17 (1973).
- 92) P.A.Iles, "Polycrystalline Silicon Solar Cells: the Centralab-Dow Corning Program", Reunión Cherry Hill, Vol. II, 71 (1973).
- 93) J.Besson, L'Onde Électrique 55, 21 (1975).
- 94) K.W.Boer, "Flat Plate Collectors with CdS Solar Cells and First Indications of Feasibility of Their Large Scale Use", Congreso París, 643 (1973).
- 95) W.Palz, "Solar Electricity", presentado en el Simposio sobre Energía Solar organizado por la UNESCO y la Unión Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza (Agosto 1976).
- 96) W.H.Bloss y G.H.Hewig, "CdS-Cu S-Dünnschichtsolarzellen für terrestrische Anwendungen", presentado en el Seminario sobre Utilización de la Energía Solar, organizado por la Sociedad de Institutos para la Utilización Técnica de la Energía Solar, Stuttgart, República Federal Alemana (Setiembre 1975).
- 97) B.L.Sater y C.Goradia, "The High Intensity Solar Cell-Key to Low Cost Photovoltaic Power", Conferencia Scottsdale, 356 (1975).

- 98) C.E.Backus, "Systems", Reunión Cherry Hill, Vol. 1, 38 (1973).
- 99) A.E.Spakowski y L.I.Shure, "Large-Scale Terrestrial Solar Cell Power Generation Cost - A Preliminary Assesment", Informe NASA TMX-2520 de la National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., EE.UU. de N.A. (1972).
- 100) J.M.Woodall y H.J.Hovel, Journal of Vacuum Science and Technology, 12, 1000 (1975).
- 101) H.Alfven, Science and Public Affairs 30, 4 (1974).
- 102) "Statistical Yearbook 1973", United Nations, New York, EE.UU. de N.A. (1974).

