

Cuadernos CDTI

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

La conversión fotovoltaica  
de la energía solar



**2.ª EDICION**

Depósito legal: M. 13881-1981  
Impreme, PRAL, S. A.  
Belmonte de Tajo, 12  
MADRID-19

**CDTI, enero 1982**

Cuadernos CDTI

Abril, 1981

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

La conversión fotovoltaica  
de la energía solar

## PRESENTACION

*De todos es conocida la convulsión, en diferentes grados de intensidad, que ha producido y previsiblemente seguirá produciendo la incontrolable carrera de precios de los crudos petrolíferos y, lo que es peor aún, la progresiva reducción en la extracción de los mismos. España, país de limitados recursos energéticos convencionales, sigue sufriendo los efectos de esta situación con especial dureza.*

*Somos conscientes de que a corto plazo es muy difícil, por no decir imposible, modificar sustancialmente los parámetros que conforman el estado de cosas; sin embargo, la perentoriedad que exige la solución de los problemas actuales no nos ha de impedir buscar posibles soluciones para el futuro. Es más, diría que estamos obligados a ello.*

*La tecnología de la conversión fotovoltaica de la energía solar se presenta hoy en día como una tecnología aún incipiente, aunque con aplicaciones prácticas cada vez más numerosas, que puede suponer, en el futuro, una apreciable mejora de la situación energética mundial. Las inversiones en I + D en este campo han adquirido en los últimos años volúmenes considerables por parte de gran número de países. España, que ya quedó descolgada en otras carreras, debe encontrar un puesto razonable en ésta.*

*El desafío que supone el desarrollo de una nueva tecnología, necesita una adecuada respuesta en el momento oportuno.*

*Este Cuaderno CDTI, que me complace en presentar, recoge no sólo los principios, técnicas y posibilidades del aprovechamiento de la energía solar mediante la conversión fotovoltaica, sino que desarrolla una estrategia cara al futuro que pueda ayudar a mejorar la situación energética en este área. Más que en los proyectos específicos que lo componen y en su cuantía económica, la importancia de este programa estriba, en mi opinión, en la metodología utilizada para su elaboración. Es, en definitiva, fruto de la coordinación de esfuerzos e intereses de la Administración y de las empresas con la finalidad común de potenciar este tipo de energía.*

*Este tipo de actuación, fundamentalmente integradora, que aúna voluntades y por la que se administran con criterios racionales una serie de recursos económicos, debería servir de modelo para otros casos análogos.*

*Las bases de partida están fijadas y se está poniendo en marcha el plan ya trazado. La conversión fotovoltaica de la energía solar abriga, pues, una esperanza y, al mismo tiempo, una incógnita que sólo nosotros mismos, con nuestra capacidad y empeño, podremos desentrañar en un futuro próximo.*

**LUIS MAGAÑA**

Comisario de Energía  
y Recursos Minerales

**INDICE**

	<i>Pág.</i>
• Objetivos de este Cuaderno .....	7
• Conclusiones y Recomendaciones .....	8
I. Perspectivas de la Energía Fotovoltaica .....	8
II. Recomendaciones para el caso español .....	9
II.1. Programas de I + D y proyectos de demostración .....	9
II.2. Medidas estratégicas para la potenciación en España de la energía fotovoltaica .....	10
III. Actuaciones españolas en este campo .....	10

## **DOCUMENTO BASE**

• El aprovechamiento de la energía del Sol .....	15
• ¿Qué es la energía fotovoltaica? .....	17
• Características especiales del aprovechamiento de la energía solar por vía fotovoltaica .....	19
• Componentes principales de un sistema fotovoltaico .....	20
Células y Paneles .....	20
Almacenamiento de energía y acondicionamiento de potencia .....	21
Baterías .....	22
Centrales de bombeo .....	24
Equipos de acondicionamiento de potencia .....	24
Perspectivas .....	24
• Tipos de aplicaciones fotovoltaicas .....	25
Aplicaciones remotas en funcionamiento autónomo .....	25
Aplicaciones de tamaño intermedio conectadas a la red .....	25
Centrales de potencia .....	26
• El problema de los costos .....	28
¿Cuánto cuesta una planta completa? .....	30
Estimaciones prudentes .....	30
• Las posibilidades de mercado .....	34

• Los países industrializados y la energía fotovoltaica . . . . .	37
La experiencia USA . . . . .	37
Hacia una Europa Fotovoltaica . . . . .	38
Siempre Japón . . . . .	39
• Perspectivas y actuaciones españolas en este área . . . . .	40
• Futuro de la energía fotovoltaica . . . . .	51

## ANEXO

• La física del efecto fotovoltaico . . . . .	55
• Técnicas de producción de materiales . . . . .	60
Células de silicio monocristalino . . . . .	60
Células de silicio policristalino y metalúrgico . . . . .	62
Células de películas delgadas cristalinas y amorfas . . . . .	64
a) Células CdS/Cu <sub>2</sub> S . . . . .	64
b) Células de silicio amorfo . . . . .	65
Células de concentración . . . . .	66
Conceptos avanzados . . . . .	66
• Almacenamiento y acondicionamiento de potencia . . . . .	68
• Amortización de la energía de fabricación y disponibilidades de silicio . . . . .	70
• Perspectivas de diferentes tipos de células solares . . . . .	72
• Otros datos de interés . . . . .	73
• Bibliografía utilizada en la redacción de este documento . . . . .	74
• Bibliografía sobre energía fotovoltaica disponible en el CDTI . . . . .	75

## OBJETIVOS DE ESTE CUADERNO

Hasta comienzos de la década de los setenta, quizás hasta 1973, como fecha expresiva, el desarrollo industrial vivió una carrera desenfrenada en materia energética. Fue preciso que la OPEP cuadruplicara, en unos meses, el precio del crudo, para que se tomara conciencia, públicamente, de la existencia de la crisis energética. Claro está que en un siglo tan crítico en muchos aspectos, la conciencia del peligro no se generó de la noche a la mañana. Todavía en 1977, Paul Rappaport, asesor del Gobierno americano en temas energéticos, especialista en tecnologías solares, advertía a su auditorio, en Denver, de la existencia de una crisis "difícil de comprender por ser todavía invisible". Se trataba, naturalmente, de la crisis energética y lo menos que podemos añadir hoy en día es que la misma ha ganado en visibilidad. Sin duda, Rappaport estaba en lo cierto cuando afirmaba que "la energía es el problema crucial para la estabilidad económica futura y para la calidad de vida, no sólo en nuestro país sino en todo el mundo".

Si el cambio de actitud en los países productores de petróleo acabó con el mito de la energía abundante y barata, no ha sido ese el único elemento de la crisis. Desde una preocupación ecológica, en los países industrializados se han generado movimientos de opinión que enjuician determinadas alternativas energéticas como la nuclear y las centrales de carbón, por su impacto degradante sobre el ambiente. Tanto por su carácter de recurso alternativo como su condición de "tecnología limpia", la energía solar cuenta cada cada vez más con numerosos adeptos.

Entre el escepticismo y la esperanza, entre la realidad y la utopía, la tecnología solar se ha ido desarrollando en los últimos años. Sin embargo, ¿cuáles son sus posibilidades reales? ¿Qué porcentaje del actual consumo energético puede ser sustituido por esta fuente en los próximos años? ¿Cuáles son los costes actuales y los previsibles? ¿Cuál es el techo actual de estas tecnologías y cuál es la situación en la que se encuentra España respecto a su desarrollo?

El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), especialmente sensibilizado por la problemática que determinadas tecnologías de punta plantean, y a través de este Cuaderno, primero de la Serie Amarilla, relativa al análisis de tecnologías específicas, trata de encontrar respuesta a las preguntas anteriormente formuladas.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **I. PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

La energía fotovoltaica ha experimentado unos avances notables y unas reducciones de precios espectaculares en los últimos años.

Se están siguiendo una gran variedad de líneas de investigación y desarrollo de una serie de conceptos muy prometedores de células fotovoltaicas.

En la actualidad la célula de silicio monocristalino está establecida como solución comercial para pequeños consumidores aislados, como pueden ser faros, repetidores de televisión, etc., y hay una serie de proyectos de plantas de demostración para aplicaciones intermedias.

Los costos actuales (7-10 \$/wp) se esperan reducir a 0,70 \$/wp en 1986, lo que abrirá el mercado a una serie de aplicaciones en el rango intermedio de potencias.

Hay un acuerdo prácticamente total de que a finales de la década de los ochenta se llegarán a conseguir costos del orden de 2,0-0,7 \$/wp lo que dará lugar a un importante mercado que en España podría cifrarse en 2.500 millones de pesetas anuales a partir de aquellas fechas.

Los análisis económicos coinciden en que si se llegan a conseguir costos de 0,5-0,2 \$/wp para los módulos fotovoltaicos, y teniendo en cuenta los predecibles aumentos de costo de los combustibles fósiles y nucleares, la electricidad de origen fotovoltaico sería competitiva para suministro en gran escala.

La planificación actual es que este objetivo se alcance en el año 2000. Como término de referencia se considera que las inversiones necesarias para llegar en esa fecha en España a un suministro del 1 % del consumo eléctrico de origen fotovoltaico, se precisarían unas inversiones totales de 64.000 millones de pesetas/año, a partir de 1995, lo que supondría la creación de una industria muy importante.

Las opiniones sobre si se saltará la "barrera" de los 0,5 \$/wp están divididas, teniendo en cuenta que este precio (4.000 pesetas/m.<sup>2</sup>) corresponde a un producto muy sofisticado que debe tener una vida de 30 años, sujeto a la acción del viento, radiación solar, lluvia, corrosión, etc. Junto a una mayoría de opiniones francamente optimistas, existen algunas otras más precavidas.

La predicción a largo plazo es difícil, pues depende no sólo de los logros de los programas de I + D fotovoltaicos, sino también de los de otras fuentes alternativas, de factores económico-políticos, como pueden ser los precios y disponibilidades del petróleo y el carbón, y de actitudes sociales, como por ejemplo la aceptación o rechazo de las centrales nucleares y la contaminación producida por las centrales térmicas de carbón.

En cualquier caso, parece seguro que la utilización de sistemas fotovoltaicos tendrá un mercado importante a medio plazo (1990) y que es una de las alternativas más prometedoras para constituir una aportación importante al suministro energético a largo plazo (2000).

Estos hechos se reflejan en el aumento de los presupuestos dedicados por la mayoría de países industrializados a programas fotovoltaicos de I + D en los últimos años, que es muy superior al experimentado en los presupuestos destinados en este concepto a otras energías alternativas.

## **II. RECOMENDACIONES PARA EL CASO ESPAÑOL**

No parece prudente que España quede fuera del desarrollo tecnológico en este campo tan prometedor, que supondrá una fuente de energía inagotable, de costo cero e impacto ambiental mínimo. Se dan circunstancias favorables para que ello no ocurra, como son la existencia de equipos de investigación altamente cualificados en este tema, el gran interés manifestado por la industria electrónica, así como nuestra capacidad de producción de silicio metalúrgico y, en general, nuestra industria química de base.

La climatología nos es propicia y el grado de dependencia del exterior, en materia de suministro energético, es excesivo, puesto que el 76 % de la energía primaria ha de ser importada.

### **II.1. Programas de I + D y proyectos de demostración**

Si se analizan los esfuerzos realizados por otros países en este campo, parece razonable el establecimiento de un plan español de inversión en I + D fotovoltaica del orden de los 400 millones de pesetas anuales, por un período mínimo inicial de tres a cuatro años.

A fin de dar contenido y delimitar el objetivo de cada uno de los programas y proyectos que deben integrar este plan, bien pudiera servir el formulado por la Comunidad Económica Europea como punto de referencia relevante. En este sentido, las líneas del plan fotovoltaico español podrían incluir:

- Estudio de técnicas de producción, encapsulamiento y módulos, vida de células, etc., en el campo de células de silicio cristalino y silicio metalúrgico de grado solar.
- Investigación básica para desarrollo de células fotovoltaicas, en el campo de células de lámina delgada y otros conceptos avanzados.
- Desarrollo de componentes específicos solares (baterías, inversores, concentradores, dispositivos de seguimiento).
- Proyectos de demostración en el rango de 1-5 Kw.
- Proyectos de demostración en el rango de 25-100 Kw.
- Prediseño y análisis de viabilidad técnica y económica en el rango de 1-10 MW.
- Estudios detallados de mercado, según tipo de aplicaciones a medio y largo plazo.
- Estudio de las medidas complementarias que permitan iniciar en España la fabricación comercial de células fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino.

## **II.2. Medidas estratégicas para la potenciación en España de la energía fotovoltaica**

Del análisis de la documentación sobre políticas y programas en este campo de diversos países ha sido posible extraer la filosofía que impregna las acciones tendentes a favorecer un desarrollo más amplio de la energía fotovoltaica.

A continuación, en base también a nuestra propia casuística, se definen, entre otras, las siguientes medidas estratégicas:

- Existencia de una entidad única de la Administración para coordinar todas las actividades con apoyo de la Administración en el campo fotovoltaico.
- Establecimiento de programas de un mínimo de cuatro años a fin de permitir a Centros de Investigación y Empresas una adecuada planificación de recursos.
- Definición de medidas de apoyo tales como desgravaciones fiscales, acceso a créditos preferentes, amortización rápida y subvenciones.
- Fijación de una política de la Administración que favorezca la implantación de la energía fotovoltaica, incluyendo, por ejemplo, la obligatoriedad del uso de instalaciones fotovoltaicas en Entidades de la Administración cuando éstas sean económicamente justificables.
- Difusión de las técnicas de valoración de inversiones que tienen en cuenta el costo de la producción durante el ciclo de vida de la instalación. No hay que olvidar que las instalaciones fotovoltaicas tienen un costo de instalación muy elevado, con un costo de operación menor al ser cero el costo del combustible, y que los previsibles aumentos del costo de la energía acentuarán la importancia futura de este último factor.
- Disminución progresiva de cualquier tipo de subvención a fuentes de energía no renovable.
- Formulación de las adecuadas acciones legislativas que favorezcan la autogeneración de electricidad. Para evitar los problemas de almacenamiento sería deseable que las instalaciones fotovoltaicas estuvieran directamente conectadas a la red, acordándose precios justos para la venta y compra de energía entre la compañía eléctrica y las inicialmente pequeñas instalaciones fotovoltaicas independientes.
- Desarrollo de la legislación sobre los "derechos al sol", dado que las posibles "sombras" de un edificio o estructura, que están muy ligadas a la altura y distancia entre los mismos, pueden incidir negativamente en la captación de las radiaciones solares.
- Apoyo a la participación española en proyectos internacionales de I + D en el campo fotovoltaico, por ejemplo, dentro de los programas de la Agencia Internacional de la Energía y de la Comunidad Económica Europea, puesto que con ello se reducen los gastos notablemente y se consigue una parte importante de la experiencia.

### III. ACTUACIONES ESPAÑOLAS EN ESTE CAMPO

En el terreno de las realizaciones concretas, hay que destacar los trabajos realizados en distintos departamentos universitarios, algunos de ellos con la colaboración de empresas, y contando con el apoyo de diferentes organismos, como la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica del Ministerio de Universidades e Investigación, el Centro de Estudios de la Energía del Ministerio de Industria y Energía y la Fundación Ramón Areces.

Por otra parte, a fin de dar continuidad a estas experiencias y conseguir nuevos desarrollos y con la intención de auñar esfuerzos, se ha articulado un programa fotovoltaico con la participación tanto de empresas como de organismos oficiales, con un presupuesto de unos 400 millones de pesetas y con una duración de tres años. El programa inicial comprende veintiún proyectos de investigación básica y aplicada y de desarrollo, permitiendo su carácter abierto la incorporación de otros nuevos.

La financiación del presupuesto se realiza mediante fondos públicos de los organismos oficiales que lo patrocinan y fondos de las empresas participantes.

Los organismos públicos que intervienen en el programa fotovoltaico son los siguientes:

Ministerio de Industria y Energía:

- Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
- Centro de Estudios de la Energía.
- Dirección General de la Energía.
- Dirección General de Innovación Industrial y Tecnología.

Ministerio de Universidades e Investigación:

- Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica.
- Dirección General de Política Científica.

En el documento base se incluye una descripción completa del mencionado programa y de los proyectos que lo componen.

**DOCUMENTO BASE**

## EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL SOL

La radiación solar recibida en la superficie de la tierra es de aproximadamente un kilovatio por metro cuadrado, durante las horas en las que el sol se encuentra en la vertical. Para tener una idea aproximada de la magnitud de este recurso en España, la media anual de insolación en la Península es de 2.500 horas, si bien no todas ellas representan la radiación punta mencionada. Esta energía importante y distribuida ha interesado desde el final del siglo pasado, para sus aplicaciones térmicas, termomecánicas, termoeléctricas, termoiónicas y cuánticas o fotovoltaicas. Ya en 1910 se realizaron en Francia y en Rusia ciertos sistemas que utilizaban uniones termoeléctricas. En 1913, Shuman-Boys utilizaba en Meadi, Egipto, espejos cilíndricos parabólicos concentradores, con una superficie de 1.200 metros cuadrados, para obtener 45 Kw durante cinco horas al día, energía que estaba destinada a mover bombas de irrigación.

En la actualidad, las *aplicaciones térmicas para uso doméstico*, agua caliente sanitaria y calefacción, están demostradas técnicamente; su viabilidad económica depende del desarrollo del mercado, sobre el cual pueden incidir determinadas políticas y estímulos gubernamentales. En Japón e Israel estas instalaciones son muy utilizadas.

Los *generadores termoiónicos* han sido utilizados también con energía solar. El efecto termoiónico (emisión de electrones a temperaturas de 1.100 a 2.600 grados centígrados) ha sido experimentado para convertir calor solar en electricidad, aunque por el momento la fiabilidad de estos sistemas es baja por trabajar a tan alta temperatura.

Las *aplicaciones termomecánicas* consisten en utilizar el calor producido por la radiación solar como foco caliente de un motor térmico. Motores de este tipo fueron numerosos en los años treinta, con miras a la generación de electricidad. Uno de los últimos proyectos conocidos, en esta línea, fue realizado en México, por una compañía francesa, hace tan sólo cuatro años. Con esta tecnología se instalaron, en Italia, en 1923, sistemas de irrigación que más tarde se aplicarían en Libia.

Dentro del campo de las *centrales termomecánicas solares* existen dos tipos de tecnologías.

Las de *colector distribuido* consisten en un conjunto de heliostatos o espejos que concentran los rayos del sol en un tubo central por el que circula un líquido que se calienta hasta unos trescientos grados centígrados. Cada heliostato o colector gira alrededor de un eje, siguiendo la dirección del sol, guiado por una célula solar.

Las de *torre central* se diferencian de las otras porque cuentan con cientos de espejos planos, con superficie del orden de cuarenta metros cuadrados cada una, que se orientan con gran precisión, de manera que concentren los rayos del sol sobre una torre central en la que se calienta el fluido. En el mundo hay algunas centrales experimentales de ambos tipos. Los Estados Unidos están construyendo en Barstow, California, una central que entrará en funcionamiento este mismo año, con una potencia de 10 Mwe. La Agencia Internacional de la Energía construye en Almería una planta de cada tipo y el Centro de Estudios de la Energía desarrolla una tercera, de la modalidad "torre central".

Las centrales termomecánicas solares están todavía en una fase previa a su viabilidad operativa. Los expertos consideran que existen una serie de puntos críticos que deben ser resueltos para disminuir los costos de explotación.

Estos puntos son: aumentar la reflectancia y mejorar la focalización de los heliostatos; reducir las pérdidas térmicas; aumentar el rendimiento del ciclo termodinámico y garantizar la fiabilidad del sistema para muchos años de operación.

## ¿QUÉ ES LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA?

En términos generales, la conversión fotovoltaica consiste en la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica, a temperatura próxima a la del ambiente. Cuando la intensidad solar es de un kilovatio por metro cuadrado sobre un sistema fotovoltaico, la potencia que éste suministra se denomina "pico" o "cresta" y se expresa con la simbología de  $w_p$  o  $Kw_p$ . Ahora bien, la intensidad de la radiación solar es variable según la hora del día, la estación y las condiciones meteorológicas o ambientales, lo cual determina idénticas variaciones de la potencia instantánea. En consecuencia, para calcular los Kw por hora que es capaz de generar anualmente un sistema de este tipo, no se puede apelar directamente los  $Kw_p$ , sino que es preciso definir un coeficiente en base a datos estadísticos sobre insolación.

El efecto fotovoltaico es la producción de una fuerza electromotriz por acción de un flujo luminoso.

Para que se produzca el efecto fotovoltaico es necesario:

- que la radiación solar sea absorbida por un material semiconductor y dé origen a portadores de carga libres, de dos tipos, electrones (negativos) y huecos (positivos);
- que el material semiconductor posea una discontinuidad en su composición que dé lugar a un campo eléctrico interno que separe los dos tipos de cargas, de modo que se acumulen de cada lado de la discontinuidad y den lugar a una fuerza electromotriz y una corriente eléctrica;
- que unos contactos eléctricos superficiales con ambas partes de la discontinuidad (o "unión p-n") hagan posible la colección de los dos tipos de carga eléctrica para su utilización (bornes de la célula).

El dispositivo en el que se produce eficientemente el efecto fotovoltaico es una "célula solar".

Como la radiación solar tiene una composición determinada, en cuanto a la energía y número de los fotones que la componen, es necesario que el semiconductor o semiconductores que componen la unión absorban fuertemente la luz solar y que los portadores creados tengan un tiempo de vida superior al de su migración a la unión y su separación en la misma.

El desarrollo de la energía fotovoltaica para usos espaciales y terrestres puede considerarse simultáneo al desarrollo de los semiconductores.

En 1941 fue descubierto el efecto fotovoltaico en Silicio y la primera célula solar de Silicio fue fabricada en laboratorio en 1954 por Pearson, Fuller y Chapin.

Las décadas de los cincuenta y sesenta fueron testigos de los más importantes desarrollos en materia de aprovechamiento de la energía solar por vía fotovoltaica, fundamentalmente en la carrera espacial.

La primera aplicación espacial de evaluación fue realizada en 1958 en el satélite Americano "Vanguard" y desde entonces los satélites, tanto científicos como de aplicación, han utilizado con plena satisfacción sistemas de alimentación, con potencias desde 100 watt hasta 20 K-watt, de tipo fotovoltaico con células monocristalinas de silicio, incluso en sistemas operacionales de telecomunicación (Intelsat) y en sistemas científicos de gran tamaño (Skylab).

Los programas de satélites artificiales, con una vida en órbita de varios años, según las previsiones, requerían un sistema muy fiable y de poco peso, para alimentar de energía a todos los restantes sistemas del ingenio, en un ambiente con alto nivel de radiación.

Las células de material policristalino fueron asimismo candidatas para usos espaciales y aunque teóricamente ofrecían ventajas comparativas tales como coste bajo de fabricación y eficiencias considerables, presentaron problemas de estabilidad de fases que reducían la vida de las células, por lo que no llegaron a ser utilizadas en satélites.

Después de este origen vinculado a la tecnología espacial, las células solares comenzaron a ser estudiadas, durante la década de los setenta, para sus aplicaciones terrestres, contando con el estímulo de la crisis de los crudos petrolíferos y el carácter renovable de la energía solar. Las barreras conceptuales al aprovechamiento fotovoltaico de la energía solar han desaparecido y existen hoy día multitud de instalaciones en telecomunicaciones (repetidores en lugares remotos, radio balizas, radiotelefonos, etc.), refrigeración de medicamentos en comunidades aisladas, bombeo de agua, protección catódica de tuberías y otros usos similares.

Raro es el país industrializado que no tiene un programa de investigación y una industria de fabricación de células y sistemas fotovoltaicos, con vistas a la utilización masiva, tanto para usos domésticos, como para centrales conectadas a la red nacional. Como índice del interés alcanzado en América y Europa está la organización de dos conferencias fotovoltaicas regionales que han tenido lugar en 1980 en San Diego y Cannes, y a las que han asistido más de 1.000 científicos e ingenieros, principalmente de industrias.

## **CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR POR VÍA FOTOVOLTAICA**

La energía solar es distribuida, gratuita y renovable pero tiene bajo nivel de flujo. Lo primero sugiere su utilización en lugares remotos de alto costo de tendido de línea; el bajo flujo obliga a que los sistemas fotovoltaicos presenten grandes superficies colectoras que, en cambio, se adaptan al concepto modular, ya que las eficiencias de conversión son constantes, independientemente del tamaño del sistema, con lo que se abaratan notablemente los ensayos previos a la fabricación de centrales de potencia. La fiabilidad de las células solares empleadas con este fin es consecuencia de la gran estabilidad química y resistencia a la oxidación del silicio y demás componentes, incluso en condiciones extremadamente adversas de utilización.

Un inconveniente de los sistemas autónomos de aprovechamiento de la energía solar es que el sol no ilumina las 24 horas del día y que su intensidad es afectada por las variaciones meteorológicas, por lo que el perfil de producción no sigue al de carga. Esto obliga a tener que utilizar superficies de captación grandes y un almacenamiento de la energía eléctrica obtenida durante el día o un sistema de apoyo de otro tipo.

Se ha mencionado que son necesarias grandes superficies para captar la energía solar, lo que, desde el punto de vista de la conservación del medio ambiente, pudiera entrañar actitudes y juicios de valor adversos. Sin embargo, esta cuestión no debe ser considerada crítica ya que el informe elaborado en enero de 1979 por el Grupo de Estudio sobre conversión de la energía solar por vía fotovoltaica (GECES), organizado por la American Physical Society, muestra que la superficie ocupada por una central fotovoltaica de potencia intermedia será, en la próxima década, de dos a cinco veces menor que la ocupada por una central de carbón o nuclear de la misma potencia, si se incluye la mina.

Asimismo, el mencionado grupo de trabajo, refiriéndose a la amortización de la energía empleada en la fabricación de un panel solar, indica que es requisito esencial que la energía consumida en tal operación sea pequeña comparada con la que el panel produzca en la vida esperada de operación. Sus cálculos realizados sobre fabricación de paneles a partir de silicio metalúrgico dan una cifra de 369 Kwh/m<sup>2</sup> que, comparada con los 320 Kwh/m<sup>2</sup> año que el panel produce, con eficiencia del 16% e insolación anual de 2.000 Kwh/m<sup>2</sup>, supone un tiempo de amortización algo superior al año.

Un detalle mayor de estos cálculos e incluso otras estimaciones a partir de métodos distintos utilizados en la fabricación pueden ser contemplados en el Anexo.

## COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico se compone de tres tipos principales de elementos: 1) paneles de captación de la energía solar, 2) subsistema de acondicionamiento de potencia y 3) subsistema de almacenamiento, en el caso de que se trate de un sistema autónomo, puesto que si está conectado a la red podrá prescindir del mismo.

### CÉLULAS Y PANELES

Como se ha dicho anteriormente, la célula solar es el dispositivo en el que tiene lugar el efecto fotovoltaico y está diseñada para obtener el máximo de potencia según la composición espectral de la luz y el tipo de sistema.

Las células comerciales más usadas han sido las monocristalinas de silicio; recientemente también son ofrecidas células policristalinas de Si con grandes granos columnares de colada y células en lámina delgada de  $\text{Cu}_2\text{S}$ -CdS integradas en módulos.

Para formar los paneles de captación, las células son asociadas en paralelo y serie para formar un módulo, lo que requiere seleccionar células de características similares. Los módulos se asocian para formar un panel solar, que tendrá características análogas a las de las células seleccionadas.

Los módulos son la asociación más elemental de las células solares, con encapsulado y protección comunes. Para la captación de la energía sin concentración, los módulos consisten, por lo general, en un soporte, metálico, un número de células conectadas en serie o serie paralelo, material flexible de relleno, una placa transparente y estanca y un marco encapsulante (Figura 1).

Los paneles de captación de los sistemas fotovoltaicos pueden ser: 1) planos, integrados por células baratas, en posición fija, que colectan las componentes directa y difusa de la radiación solar, y 2) de concentración, con células caras de alta eficiencia y un subsistema óptico focalizante que utiliza principalmente la componente solar directa y que obliga a utilizar un seguimiento en uno o dos ejes, por lo general.

La ventaja económica de una u otra clase de sistemas está pendiente de desarrollos tecnológicos que influyan en los rendimientos y en los costos de fabricación que aparecen reflejados en el apartado correspondiente.



## COMPONENTES DE UN MODULO SOLAR

FIGURA 1

Los subsistemas de acondicionamiento y almacenamiento no varían esencialmente con el tipo de panel de captación, ya sea plano o de concentración.

Aunque de aspecto sencillo, el módulo tiene que ser concebido de forma que pueda resistir la intemperie veinte años, las temperaturas extremas, durante insolación y enfriamiento por radiación nocturna, la erosión por arena, el granizo y los vientos de aproximadamente 150 Km/h. Además ha de resistir las tensiones inversas eventuales, producidas por otros paneles o por fallos de células en el mismo panel, y las transitorias que se generan en los sistemas eléctricos, por lo que ha de incluir elementos de protección, como diodos de bloqueo, para estas eventualidades. Un módulo mal diseñado puede degradar altamente la eficiencia del sistema, como se ha observado en alguna instalación reciente. Sin embargo, existen módulos en funcionamiento en condiciones extremas durante más de cinco años sin degradación aparente.

La eficiencia de módulo suele ser 1-2% inferior a la de la célula en cubrimientos compactos, debido al área requerida para las conexiones eléctricas, protección y marco de encapsulado.

## ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

Uno de los problemas más importantes para el aprovechamiento de la radiación solar es que su disponibilidad está limitada a una serie de horas al día y su intensidad está sujeta a variaciones. Más aún, puede haber períodos de varios días en los que la posibilidad de su aprovechamiento sea casi nula. Esto hace que sus disponibilidades no coincidan con la demanda. Es mayor la necesidad de calefacción y energía eléctrica en invierno que en verano, justamente cuando la radiación solar es menor. Como consecuencia de esto, las instalaciones de energía solar cuentan generalmente con una fuente suplementaria de energía convencional. Es fácil comprender que esta duplicación de instalaciones representa una desventaja económica por cuanto exige una inversión mayor en capital inmovilizado.

Si se desea que la instalación solar sea autónoma, es preciso contar con una gran capacidad de almacenamiento de energía, con el objeto de reducir las posibilidades de interrupción del suministro. El problema, como veremos, es que los actuales sistemas de almacenamiento de energía tienen rendimientos bajos, son voluminosos y requieren inversiones considerables.

Para lograr la utilización más eficiente de la energía solar es fundamental mejorar los métodos

de almacenamiento. Por esta razón, la investigación y desarrollo en este campo registran una notable actividad. Resumimos a continuación los principales métodos que se encuentran en fase de investigación o de desarrollo.

- Calentamiento de materias que conserven el calor y lo devuelvan sin cambio de estado. Un ejemplo es el de los aceites térmicos.
- Fusión o vaporización de sólidos o líquidos que devuelven el calor al solidificarse o condensarse.
- Reacciones químicas reversibles endotérmicas.

Estos tres primeros sistemas no son adecuados para la conversión fototérmica que da directamente una forma de energía más noble: la eléctrica.

- Almacenamiento inercial: método que consiste en almacenar la energía no consumida, mediante un motor-generador reversible, en un volante de inercia que gira a elevada velocidad. Con este método es posible conseguir una favorable relación energía/peso, si lo comparamos con las baterías de plomo. Sin embargo, este procedimiento está en etapa de desarrollo y no parece razonable esperar que a corto plazo se pueda contar con él para atender, por ejemplo, las necesidades de pequeñas poblaciones rurales. En cambio, su característica potencial, de gran capacidad de almacenamiento por unidad de peso, lo hacen adecuado para instalaciones móviles (por ejemplo, submarinos).
- Baterías eléctricas: este método consiste en almacenar la energía eléctrica no consumida, en un banco de baterías, mediante un regulador de voltaje. Estos equipos requieren, normalmente, una instalación adicional para convertir la corriente continua acumulada, en alterna.
- Centrales hidráulicas de bombeo: este método consiste en utilizar la energía excedente disponible, para bombear agua a la parte superior de una central hidráulica. Gracias a esta acumulación de agua, el procedimiento inverso permite generar electricidad en los momentos de punta de demanda.

Estas dos últimas opciones son, a juicio de los técnicos, las más viables a corto plazo. Por esta razón se incidirá a continuación sobre las mismas.

## **Baterías**

Las baterías recargables de plomo son el procedimiento de almacenamiento de energía completamente comprobado y más adecuado actualmente para la energía fotovoltaica.

La batería más conocida es la empleada para arranque en automoción. Están diseñadas para tolerar descargas fuertes repetidas y de corta duración. Los factores eficiencia y autodescarga no están muy cuidados, y si sufren descargas profundas, 90 % por ejemplo, se acorta su vida apreciablemente.

Hay baterías para usos industriales, diseñadas para aceptar mayores porcentajes de descarga, con mejores eficiencias, vida más larga y que requieren un menor mantenimiento, siendo adecuadas para aplicaciones solares. Existen en el mercado versiones mejoradas de las baterías industriales, diseñadas especialmente para aplicaciones solares. Hay otra variedad de baterías, ya desarrolladas o en estudio, que tienen por objeto mejorar las características y precio de las baterías de plomo.

En la Tabla 1 se presentan las características actuales y deseables de los diversos tipos de baterías.

TIPO DE BATERIA	PLOMO	NIQUEL CADMIO	NIQUEL HIERRO	OBJETIVO PROPUESTO
DISPONIBILIDAD	COMERCIAL	COMERCIAL	EN DESARROLLO	
Wh/Kg TEORICO CONSEGUIDO	250 50 - 60	235 45 - 60	300 45 - 60	100 - 300
NUMERO DE CICLOS DE CARGA Y DES- CARGA	1500 A 2000	2000 A 8000	1500 A 2500	15000
COSTO \$/Kwh	70 - 100	200 - 350	---	25
VIDA, AÑOS	5	4 - 8	1 - 2	15

**CARACTERISTICAS TECNICAS Y ECONOMICAS DE LAS BATERIAS ACTUALES  
EN DESARROLLO Y FUTURAS**

TABLA 1

Vemos en la tabla que el peso de las baterías es uno de sus problemas principales. Es de notar que para una aplicación fotovoltaica de 5 Kw, con una capacidad de almacenamiento de diez horas, las baterías pesarían 1 tonelada y tendrían un volumen de 0,5 m<sup>3</sup>. En cuanto a la eficiencia media de estos sistemas de almacenamiento, puede estimarse en un 70 %, ya que existen pérdidas continuas en las baterías, que el voltaje de carga es superior al de descarga y que el equipo de acondicionamiento de potencia tiene una eficiencia que oscila entre el 92 y el 95 %.

A pesar de los inconvenientes señalados, existen en el mercado internacional ciertos acumuladores solares específicamente desarrollados para la aplicación fotovoltaica en base a esta tecnología que, sin embargo, es susceptible de mayores desarrollos. En efecto, las investigaciones actuales se dirigen hacia la mejora de la eficiencia, a la prolongación de su vida útil y al desarrollo de modelos que requieran menor mantenimiento.

Para que la tecnología base de este tipo de batería pueda ampliar su campo de aplicación a consumidores medios es preciso desarrollar otras líneas de investigación con objetivos a más largo plazo. Existen varios tipos de estas "baterías avanzadas":

- Sistemas acuosos, tales como la batería cinc-cloruro. En fecha próxima entrará en servicio una planta de este tipo, de 10 Mwh, con carácter experimental. Los costos actuales son de 2.000 \$/Kwh y se espera conseguir su reducción hasta los 40-50 \$/Kwh.
- Baterías a alta temperatura, como la de sodio/azufre, con las que se pretende conseguir eficiencias del 77 % y profundidad de descarga del 90 %. Su estado de desarrollo es semejante al de los sistemas acuosos.
- Baterías Red-Ox, basadas en la difusión de un ión a través de una membrana semipermeable. Su desarrollo podría dar lugar a sistemas de muy bajo costo, ya que se confía en obtener eficiencias de hasta el 85 %. Su estado de desarrollo es similar a los anteriores. El objetivo en este tipo de sistemas es conseguir costos inferiores a 10 \$/Kwh.

## **Centrales de bombeo**

Las centrales de bombeo se utilizan principalmente para aprovechar la energía barata de las centrales de base, durante las horas de baja carga, obteniendo así energía suplementaria durante las horas de punta. Desde el punto de vista tecnológico, estas centrales no ofrecen dificultades y sus características son muy adecuadas para la conversión fotovoltaica, si bien el número de posibles emplazamientos es limitado. La eficiencia media de estos sistemas es del 70 %. La realización de depósitos subterráneos artificiales con este propósito da costos de 270 a 350 \$/Kwh.

## **Equipos de acondicionamiento de potencia**

Los objetivos de este tipo de dispositivos son:

- Regular la velocidad de carga de las baterías, con el fin de no acortar su vida útil.
- Convertir la corriente continua suministrada por las baterías en corriente alterna, para la que están preparadas las instalaciones de la mayoría de los usuarios. Este tipo de aparato se llama inversor estático.
- Servir como sistema de interconexión, en instalaciones no autónomas, para determinar qué cargas se suministran por la red y cuáles por el sistema fotovoltaico.

La mayor parte de los inversores pueden ser utilizados para rectificar la corriente de la red, con el objeto de cargar las baterías del sistema fotovoltaico en el caso de que sea necesario realizar esta operación, como podría ocurrir durante períodos de muy baja radiación solar.

Estos elementos están ya desarrollados para otras aplicaciones y únicamente requieren que se profundice la fase de "ingeniería de aplicación", cuyo objetivo es optimizar los diseños existentes con el fin de adaptarlos a las condiciones especiales de las aplicaciones fotovoltaicas.

## **Perspectivas**

Parece estar claro que, en el estado actual del desarrollo de esta tecnología, los objetivos a corto plazo han de estar relacionados con las necesidades de aquellos usuarios ubicados en emplazamientos poco accesibles. En consecuencia, se debe favorecer el desarrollo de sistemas de baterías "sin mantenimiento" y capaces de operar sin conexión a la red.

Para aplicaciones intermedias no se puede pensar aún en utilizar esta misma solución, ya que la eficiencia de las baterías es todavía muy baja y sus costos, por el contrario, son muy altos. Esto hace necesaria la conexión directa de estas instalaciones con la red, con el fin de lograr el intercambio de energía de modo continuo. Sin embargo, esta solución crea nuevos problemas tales como perturbaciones en la red y la dificultad de establecer precios adecuados para el kilovatio/hora. La filosofía actual de las compañías eléctricas es muy reacia al concepto de pequeños productores conectados a la red, debido a la complicación que tal posibilidad entraña.

Pensando en el largo plazo, la aplicación masiva de sistemas fotovoltaicos encontraría en las centrales de bombeo y en las baterías avanzadas los sistemas de almacenamiento más idóneos.

## TIPOS DE APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

Las aplicaciones fotovoltaicas, según su desarrollo a lo largo del tiempo, se pueden clasificar en 1) aplicaciones remotas en funcionamiento autónomo, 2) conectadas a la red de tamaño intermedio y 3) centrales de potencia.

### APLICACIONES REMOTAS EN FUNCIONAMIENTO AUTÓNOMO

Las instalaciones fotovoltaicas en puntos de difícil acceso y alejados de la red han resultado competitivas económicamente con los sistemas alternativos de generadores diesel. Repetidores de televisión, de microondas, balizas y radio-balizas, radioteléfonos, señales de tráfico en carreteras y trenes, barcos, televisión rural, refrigeración de medicinas, control de corrosión de tuberías, etc., requieren potencias de unas centenas de watts y alta fiabilidad de suministro, incorporando, aparte del panel, almacenamiento con baterías y acondicionamiento de potencia. Existen cientos de instalaciones de este tipo funcionando satisfactoriamente. Se citan a título ilustrativo algunas de ellas. El MIT-Lincoln Laboratory, en colaboración con la Universidad de Nebraska, instaló un sistema de 28 Kw<sub>p</sub> en 1977, para irrigación de treinta y dos hectáreas durante doce horas diarias, secado de grano y producción de fertilizantes, produciéndose en veintiocho meses de funcionamiento el fallo de un módulo. Asimismo, un sistema fotovoltaico de 15 Kw<sub>p</sub> ha sido construido para alimentar una emisora de radio comercial en Bryan, Ohio, llegando a suministrar el 86% de la energía consumida en los meses de septiembre a noviembre. El proyecto SOLERAS consiste en una instalación de 500 Kw<sub>p</sub>, utilizando sistema de concentración con lentes de Fresnel, para suministro de energía a un pueblo de 3.500 habitantes en Arabia Saudita.

La bomba de riego es, de las aplicaciones remotas que no requieren almacenamiento de electricidad, la que ofrece mayores ventajas para instalaciones descentralizadas y mercados potenciales, para uso en poblados y plantaciones aisladas. El sistema más simple es el panel fijo conectado directamente a la bomba. De las instalaciones en funcionamiento, la mayor de ellas tiene una potencia de 21,8 Kw<sub>p</sub> y produce una extracción de 1.500 m<sup>3</sup> de agua por día a unos 20 metros de profundidad.

Otro tipo de instalaciones autónomas que es objeto de interés creciente es el de las aplicaciones unifamiliares. No obstante, al requerirse el suministro durante varios días nublados seguidos, se ha tenido que acudir a baterías de almacenamiento, que suponen, hoy día, un costo igual o superior al de los paneles solares. Esto ha traído consigo que actualmente se estudien estos sistemas en conexión a la red.

## APLICACIONES DE TAMAÑO INTERMEDIO CONECTADAS A LA RED

La instalación de sistemas fotovoltaicos con panel integrado en el tejado de edificios y conectada a la red se prevé como el sistema que encontrará mayor mercado en USA. En la actualidad se construyen innumerables edificios con estas características.

El hecho de existir una ley que obliga a las compañías eléctricas estadounidenses a comprar esta energía a un "precio justo" y las facilidades financieras y fiscales parecen asegurar la viabilidad económica de estas aplicaciones a muy corto plazo en casas unifamiliares. Una constructora norteamericana ejecuta el proyecto de cien casas con paneles fotovoltaicos, para intercambiar energía con la red, que serán habitadas a comienzos de 1981.

De las aplicaciones conectadas a la red quizá la más importante por su tamaño sea la instalación en la estación de radar de Mt Laguna, California, de un sistema 60 Kwatt, con paneles planos y módulos encapsulados en resina transparente. Aunque el acondicionamiento de potencia ha funcionado con plena satisfacción y la interfase con la red ha sido satisfactoria, no puede decirse lo mismo de los módulos, que debido a una encapsulación inadecuada y una protección eléctrica insuficiente, han generado "puntos calientes" que han destruido células y degradado la eficiencia de la instalación de forma anormal (1%/mes).

A continuación se indican los proyectos americanos, en diferente estado de desarrollo, financiados por el Department of Energy (DOE) americano y las compañías contratantes (Tabla 2).

<b>INSTALACIONES DE POTENCIA INTERMEDIA</b>		
<b>PANELES CONCENTRADORES</b>		<b>Kw</b>
• <b>WILCOX HOSPITAL/ACUREX</b> .....		60
KAVAI, HAWAII		
• <b>SKY HARBOR AIRPORT/ARIZONA PUBLIC CENTER</b> .....		225
PHOENIX, ARIZONA		
• <b>BDM CORPORATION</b> .....		50
ALBURQUERQUE, NUEVO MEXICO		
• <b>DALLAS-FT WORTH AIRPORT/E SYSTEMS</b> .....		27
DALLAS, TEXAS		
• <b>SEA WORLD/GE</b> .....		110
ORLANDO, FLORIDA		
<b>PANELES PLANOS</b>		
• <b>LOVINGTON SHOPPING CENTER/LEA COUNTRY ELECTRIC</b> .....		100
LOVINGTON, NUEVO MEXICO		
• <b>EL PASO ELECTRIC/NEW MEXICO STATE UNIV.</b> .....		20
EL PASO, TEXAS		
• <b>OKLAHOMA CENTER FOR SCIENCE AND ARTS/SCIENCE APPLICATIONS INC</b> .....		135
OKLAHOMA CITY, OKLAHOMA		
• <b>BEVERLY HIGH SCHOOL/SOLAR POWER</b> .....		100
BEVERLY, MASSACHUSETTS		
• <b>SAN BERNARDINO CONCRETEPLANT</b> .....		35
SAN BERNARDINO, CALIFORNIA		

TABLA 2

Con estos proyectos se intenta identificar las aplicaciones idóneas, recogiendo datos de su funcionamiento, y proporcionar, así, la información necesaria para el desarrollo de nuevos proyectos de sistemas y nuevas tecnologías.

## **CENTRALES DE POTENCIA**

Las instalaciones de potencia intermedia constituyen, en realidad, ensayos de módulos de centrales de potencia conectadas a la red. Hay que recordar que, a diferencia de otros tipos de generación de energía eléctrica, la energía fotovoltaica es modular, ya que no se consiguen ganancias notables en eficiencia aumentando el tamaño del sistema, lo que abarata notablemente los costos de ensayo necesarios para el diseño y construcción de centrales de potencia superior al Mwatt.

El interés de las compañías americanas generadoras de energía eléctrica, por medio de su Electric Power Research Institute, en el campo de la energía solar fotovoltaica, puesto de manifiesto en la Conferencia Fotovoltaica de la CEE de Cannes (1980) tiene como objetivos principales ganar experiencia en la integración de esta energía, evaluar el estado de desarrollo de la tecnología y sus perspectivas futuras y propiciar el intercambio de información con el Gobierno.

En 1980 se han emprendido 48 proyectos fotovoltaicos con participación de 32 Compañías Eléctricas. Se está interesado en participar en el desarrollo de componentes y subsistemas de uso operacional ("hardware") y en su calificación para determinar especificaciones de diseño. Las centrales intermedias de 100 Kw en ensayo proporcionarán no sólo una evaluación de la fiabilidad del sistema, sino también una verificación de sus prestaciones, así como posibilidades industriales de fabricación y datos económicos de las condiciones de competitividad en el mercado.

## EL PROBLEMA DE LOS COSTOS

Los datos acerca de costos de sistemas fotovoltaicos están basados, en su mayoría, sobre experiencias realizadas en otros países.

Durante la etapa en la cual el desarrollo de las células fotovoltaicas estuvo vinculado a los programas de investigación aeroespacial, el precio de estos dispositivos no tenía importancia, en función de otros objetivos prioritarios. En aquel momento se optó por las fotocélulas de silicio, ya que las mismas permitían el suministro continuo de energía eléctrica sin consumo de combustible, con gran fiabilidad y sin mantenimiento. Los costos eran realmente altísimos, ya que al principio el  $W_p$  se obtenía a 300 \$. Hacia 1968 los costes se redujeron a unos 80 ó 90 \$ el  $W_p$ .

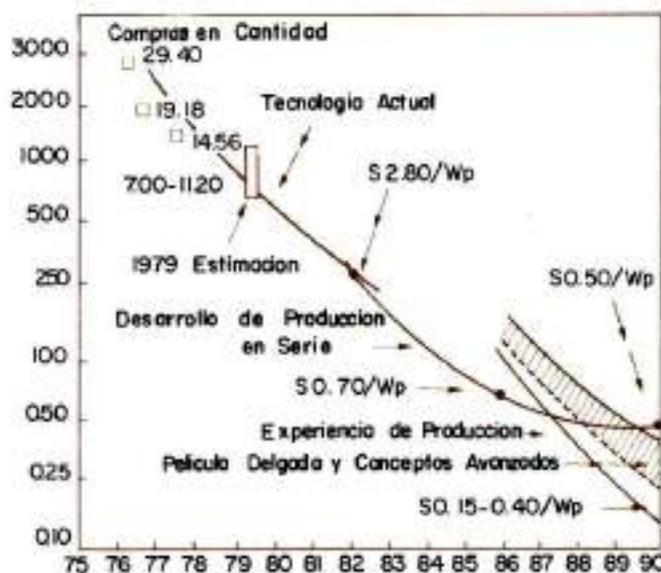


FIGURA 2

Con los años setenta llegó el encarecimiento de las materias primas energéticas. Esto estimuló un gran interés por las fuentes alternativas y, dentro de ellas, por la energía fotovoltaica, lo que se tradujo en un aumento de los programas de investigación, plantas de demostración, etc. Esto

trajo consigo, además, una nueva expansión del mercado y la reducción de los costos. En la Figura 2 se presentan algunos datos de reciente publicación.

En 1975 el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) puso en marcha un programa a largo plazo, de investigación y desarrollo, que establecía algunos objetivos de precios, resumidos en la Tabla adjunta:

AÑO	\$/W <sub>p</sub> (1980)	AÑO	\$/W <sub>p</sub> (1980)
1977	22.00	1983	2.00
1978	15.00	1984	1.20
1979	8.00	1985	0.85
1980	6.00	1986	0.70
1981	4.00	1990	0.50
1982	2.80	2020	0.20

EVOLUCION PREVISTA DE PRECIOS DE W<sub>p</sub> EN DOLARES  
( AÑOS 1977 - 2020)

TABLA 3

Los datos anteriores nos merecen algunos comentarios:

- En cinco años, la industria fotovoltaica ha conseguido reducir sus costos unas treinta veces, en valor nominal, ya que si se calculara en valor constante, las reducciones de costo serían, aproximadamente, de unas cincuenta o sesenta veces. En honor a la verdad, sin embargo, no toda esta espectacular reducción se debe a la investigación sino que, además, los requisitos de calidad para las aplicaciones terrestres son inferiores a los de la industria aeroespacial.
- Una segunda observación es que la reducción de los costes se va ajustando a los objetivos establecidos previamente por el DOE, en 1975. Esta observación es importante, de cara al futuro.
- También es preciso matizar que el mercado está, por el momento, garantizado por el gobierno, lo que permite, en ocasiones, la sospecha de que se trate de precios que no recojan completamente los costos de producción.
- Sin embargo, es menester tener en cuenta que esta industria se encuentra en plena evolución tecnológica y de mercado, razón por la cual carece de una estructura de costos muy consolidada. La tendencia a la reducción de los mismos debería, lógicamente, acentuarse.
- Existe una mayoría de opiniones relativas a poder alcanzar los objetivos del DOE para el año 2000, esto es, precios de 0,5-0,2 \$/W<sub>p</sub>. Sin embargo, hay que reconocer que existen sobre este punto opiniones autorizadas más cautas.
- A estos niveles de precio, es decir, 0,5 \$/W<sub>p</sub>, el uso de concentradores, estáticos o con seguimiento, no supondrá mayores ventajas, pues no parece posible reducir el costo de los concentradores por debajo de este valor.

## ¿CUÁNTO CUESTA UNA PLANTA COMPLETA?

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha de servirnos, una vez más, de referencia para calcular el costo de plantas completas. El DOE adjudicó contratos para diseños de plantas fotovoltaicas a la General Electric Company, Westinghouse y Spectrolab Incorporated. Posteriormente contrató con METREK una revisión de los distintos diseños que le fueron presentados, así como un análisis de los costos de operación y mantenimiento para cada alternativa. En el Anexo se sintetizan las características de los diseños evaluados por METREK. Los costos aparecen en la Tabla 4. Como se puede ver en la misma, con valores de 1976, el costo del Kw h con silicio plano era de 0,08 \$, lo que equivaldría, poco más o menos, a unas 5,7 pesetas. Este valor, naturalmente, corresponde a centrales sin almacenamiento, ya que en centrales completas el costo asciende hasta los 0,19 \$, es decir, a unas 14 pesetas. Es preciso, sin embargo, complicar el panorama, puesto que el valor del Kw h fotovoltaico no es el mismo que el convencional, bien sea para el usuario directo o para una compañía eléctrica debido a la necesidad de mantener equipos de generación o distribución parcialmente inactivos, a fin de garantizar el suministro en todo momento, lo que representa una carga económica adicional.

En relación a costos de instalación y de acuerdo con la Tabla 4, los costos de instalaciones fotovoltaicas varían entre 900 y 4.600 \$/Kw<sub>p</sub>. Los técnicos consideran que para 1986 el costo de instalación de una central nuclear puede ser de unos 1.320 \$ el Kw instalado.

Es interesante comparar esta cifra con la correspondiente a centrales de carbón, que será, según se estima, de unos 931 \$ el Kw instalado. Por otra parte, el factor de servicio de las centrales nucleares y térmicas de carbón es del orden del 0,5. Esto quiere decir que una central de 100 MW<sub>p</sub> produciría un valor medio equivalente a una de 50 MW que trabajara al 100 % de su capacidad. Una central fotovoltaica, en cambio, trabajaría con un factor de servicio de sólo 0,23, debido a las variaciones diarias y estacionales de la radiación solar. Así, para comparar directamente el costo de instalación de centrales fotovoltaicas con centrales nucleares o térmicas, habría que multiplicar el costo de las primeras por dos.

Como posible término de comparación, el costo total de infraestructura de una central térmica de carbón importado, incluyendo mina, transporte terrestre, cargueros y terminales de carga y descarga es de 320 \$ el Kw. Teniendo en cuenta los datos expuestos, los costes de instalación de las centrales fotovoltaicas serían superiores a los de las nucleares o térmicas, si bien esta desventaja inicial es parcialmente compensada por su "costo cero" de combustible. Hay que tener en cuenta, además, que el análisis económico citado se basa en supuestos más bien optimistas, en el límite de lo previsible. Esto hace que, introduciendo las necesarias matizaciones, se considere poco probable que la conversión fotovoltaica sea un factor importante para el suministro masivo de energía eléctrica, en un plazo medio (menor a diez años). Esta consideración no invalida otras aplicaciones, tales como aquellas en las cuales los costos de distribución de energía convencional son excesivos.

## ESTIMACIONES PRUDENTES

Con respecto a la esperanza de que la investigación consiga reducir el coste de las instalaciones fotovoltaicas es preciso ser también prudentes, ya que el módulo fotovoltaico (0,5 \$ W<sub>p</sub>) representa sólo de un 15 a un 35 % del costo total de la planta y, aunque se logran importantes reducciones futuras, no se modificaría sustancialmente la economía total del sistema, ya que en el resto de los elementos no son de esperar reducciones comparables de precio. El objetivo

COSTO DE KWHR EN BORNES DE CENTRAL ( 1976 )

Diseño típico N°	Tipo	Factor de servicio	Almacenamiento GW h	Acondicionamiento potencia MW	Energía producida por año: GW <sup>h</sup> /año	Costo Instalación S/ Kwp	Costo operación, mantenimiento mills/Kwh	Cargas financieras mills/Kwh	Costo S/Kwh
1	Si, plano	0,28	---	100	245	900	7,6	73	0,08
2	Película delgada, plano	0,26	---	100	228	1000	10,7	87,7	0,099
3	Concentrador Si	0,3	---	100	263	1900	8,0	144,5	0,152
4	Si, plano	0,3	0,25 (2,5 hr)	133	263	1400	14,4	106,5	0,121
5	Película delgada, plano	0,3	0,25 (2,5 hr)	144	263	1600	19,1	121,7	0,141
6	Si, plano	0,45	0,6 (6 hr)	213	394	2300	20,9	116,7	0,137
7	Película delgada, plano	0,45	0,6 (6 hr)	228	394	2700	28,3	137,0	0,165
8	Si, plano	0,7	1,25 (12,5 hr)	349	613	4000	29,8	130,5	0,160
9	Película delgada, plano	0,7	1,25 (12,5 hr)	374	613	4600	41,6	150,1	0,192
10	Concentrador silicio	0,39	0,232 (23,2 hr)	128	342	2600	12,3	152	0,164

Los cargos financieros han sido calculadas en base a los siguientes datos amortización -5%; intereses -12% operación y mantenimiento 3%

TABLA 4

prioritario, en este tema, es lograr un aumento en la *eficiencia* de los módulos, lo cual permitiría reducir la superficie necesaria y, con ello, disminuir la cantidad de elementos estructurales auxiliares.

No todas las opiniones son, sin embargo, tan precavidas. Muchas opiniones señalan que con un coste de 0,5 \$/W<sub>p</sub> (unas 4.000 pesetas el m.<sup>2</sup>) esta energía podría competir en una gran cantidad de aplicaciones con las fuentes convencionales. El coste señalado no parece utópico sino

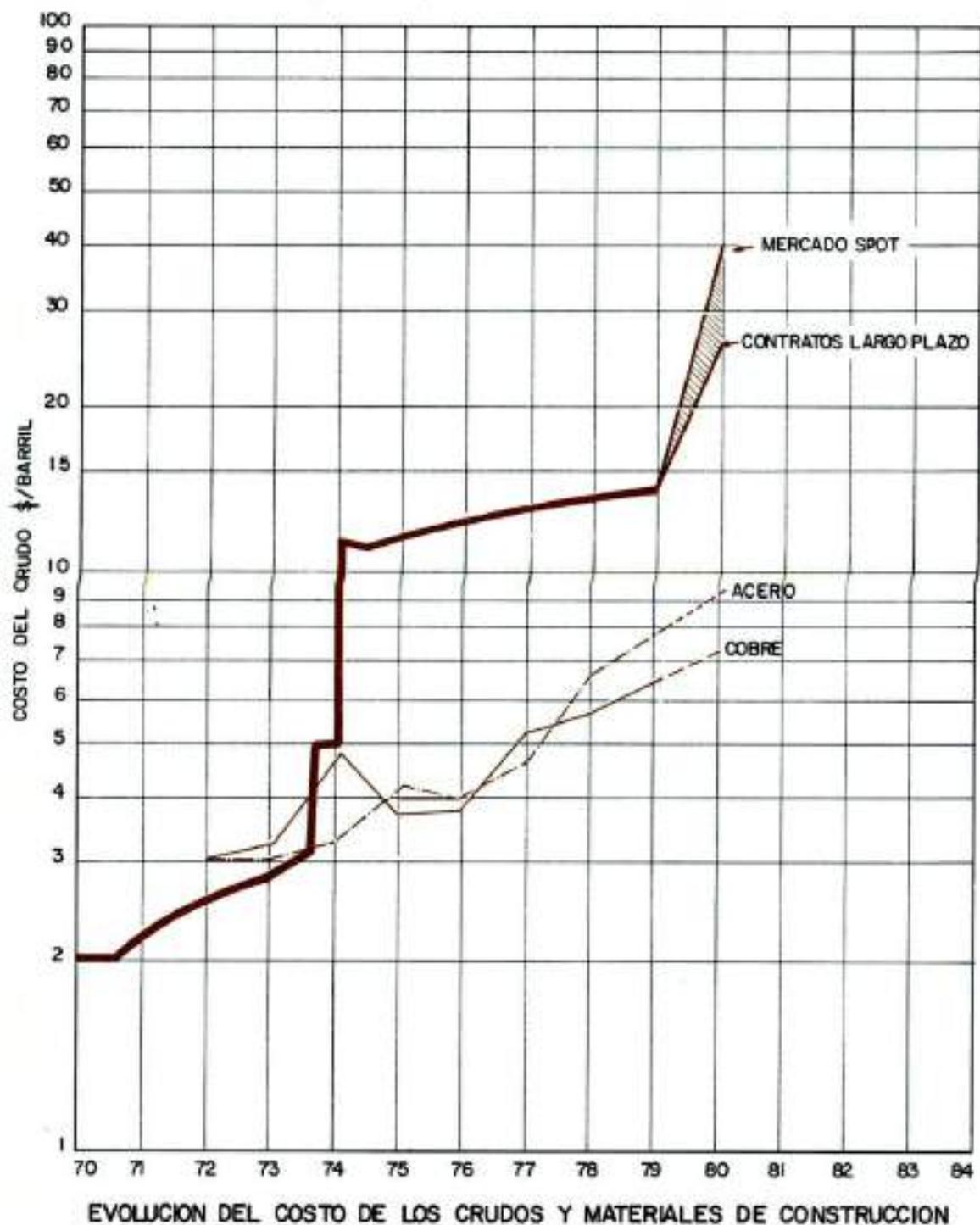


FIGURA 3

alcanzable. Hay opiniones optimistas que señalan la existencia actual de un mercado importante en núcleos urbanos aislados. Una central fotovoltaica de 100 Kw —se afirma— es competitiva si la red eléctrica se encuentra a más de quince kilómetros.

La Figura 3 muestra la evolución del precio de los crudos durante los últimos años, así como la del cobre y el acero durante el mismo período. Estos índices corresponden, de un modo aproximado, a los aumentos de costo que han experimentado las instalaciones generadoras de energía. Resulta ocioso comentar que las perspectivas de la energía fotovoltaica mejoran si se tienen en cuenta los aumentos previsibles del costo de los combustibles.

Resumiendo, la energía fotovoltaica es ya competitiva, o lo será a corto plazo, para ciertas aplicaciones en las cuales el costo del transporte de la energía convencional es alto. Para que sea competitiva, sin embargo, en el suministro eléctrico a gran escala, es necesario rebajar la barrera de los 0,5  $\$/W_p$  y que se mejore notablemente la eficiencia de los módulos, objetivos ambos que se pueden considerar posibles, aunque de hecho existan opiniones no tan optimistas sobre este tema. En cualquier caso, parece seguro que con un soporte oficial adecuado para la I + D, ha de abrirse un mercado muy importante para la energía fotovoltaica en una serie de aplicaciones en las cuales sus características especiales la hacen competitiva.

## LAS POSIBILIDADES DE MERCADO

Es difícil realizar un estudio de mercado cuando quedan tantas incógnitas por despejar. Sin embargo, es preciso realizar previsiones de algún tipo. La Tabla 5 resume las conclusiones de algunos estudios. En ella se muestran las previsiones de volumen de ventas (medidas en Mw) de módulos fotovoltaicos, realizadas por la Administración americana y algunas de las grandes multinacionales del sector, a condición de que se alcancen determinados precios del  $W_p$ .

ESTUDIOS DE MERCADO	Precio de módulos en \$ por watio pico (w p)				
	10	3	1	0.5	0.1 - 0.3
<b>1. BOM/FEA</b>					
Aplicaciones militares (DOD)*	10	75	100	--	--
Mercado Mundial, Aplicaciones comerciales	1.5	20	70	100	--
<b>2. Intertechnology Corporation.</b>	0.5	13	126	270	--
<b>3. Motorola</b>	1.5	20-30	--	--	--
<b>4. Texas Instruments</b>	0.4	2.6	30	100	20,000
<b>5. RCA</b>	0.8	13	200	2000	100,000
<b>6. Westinghouse</b>	--	--	--	--	96,000
<b>Objetivos del DOE</b>	1.0	8	75	500	5,000

\* (DOD, Department of Defense)

TABLA 5

Vemos, así, que si se llegase a costos del orden de los 0,1 a los 0,3  $\$/W_p$  se podría contar con un mercado muy importante, ya que tales precios estarían en línea con los de producción eléctrica en gran escala. Sin embargo, es también evidente que la dispersión entre los distintos estu-

dios es muy grande y se pone de manifiesto el problema de que, para conseguir bajos costos, es preciso contar con un gran mercado, lo que a su vez depende de haber conseguido los bajos costos. A primera vista, un círculo vicioso que sin duda habrá de ser roto por el encarecimiento de las energías convencionales y los resultados de la I + D fotovoltaica.

Otros estudios revelan que los dos campos con mayor volumen, a largo plazo, serán el suministro de núcleos rurales y las instalaciones de bombeo de agua, con gran hegemonía por parte de estas últimas. Estas tendencias habrán de acentuarse en países en desarrollo, con bajo porcentaje de electrificación. Otro elemento a tener en cuenta para cualquier estrategia de mercado es que los diversos estudios parecen coincidir en que el volumen de ventas de módulos fotovoltaicos será del orden del 35 al 50% del de las instalaciones completas, contando con un costo de 2 \$/W<sub>p</sub>. También muestran los estudios una tendencia futura hacia la disminución relativa de la participación de los módulos, a favor de los sistemas completos, en la misma relación en que se abarate el precio del W<sub>p</sub>.

Algunas fuentes dan para España una previsión de 70 a 375 Kw<sub>p</sub> instalados, en 1986, con un valor más probable de 180 Kw<sub>p</sub>. Esto equivaldría a unos 90.000 \$ en módulos fotovoltaicos y unos 500.000 \$ en sistemas, si se alcanzara el valor crítico de 0,5\$/W<sub>p</sub>, en 1986, en base a costos de 1976. Las cifras anteriores, corregidas en precios de 1980, arrojarían valores de 300.000 y 1.100.000 \$, respectivamente. Es curioso señalar, no obstante, que las previsiones para España se apoyan en el hecho de que la amplia red nacional y los programas de electrificación en curso harán difícil la utilización de energía fotovoltaica para uso extensivo en núcleos rurales, protección catódica, bombeo de agua y equipo de comunicaciones, dado que habrá relativamente pocos lugares alejados de la red eléctrica nacional (Figura 4).

Para 1986, la componente más importante del mercado sería los sistemas de protección catódica para conducciones, debido al extenso programa de gasoductos. De todas maneras, se esti-

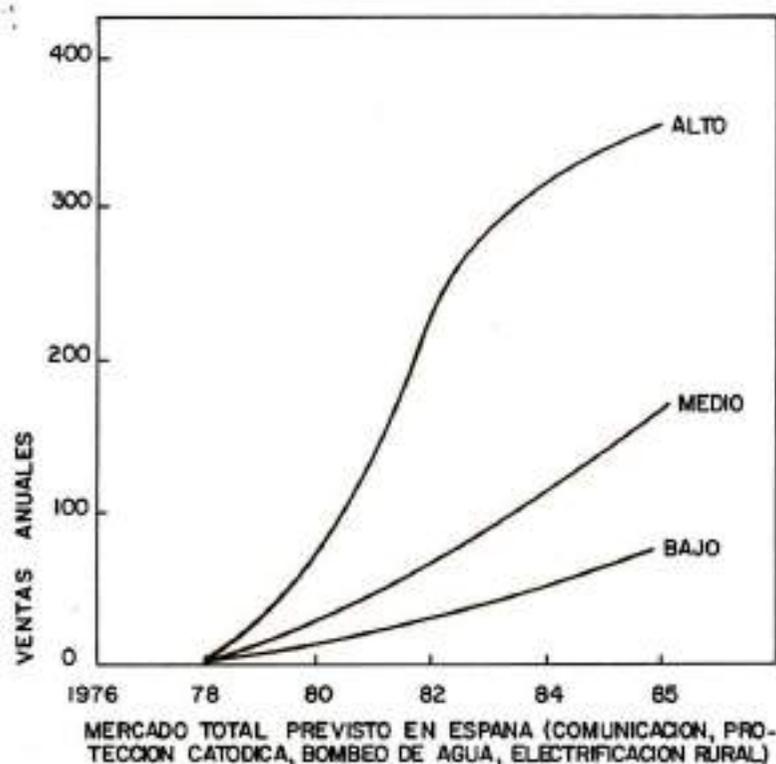


FIGURA 4

ma que la industria fotovoltaica puede tener importancia en España, no sólo en función de la demanda interna sino pensando en la exportación hacia países en desarrollo.

A modo de conclusión, hay que insistir en las iniciales consideraciones acerca de la dificultad para establecer un pronóstico, dadas las numerosas variables en juego. Desde el punto de vista técnico-económico, ya lo hemos dicho, es fundamental bajar la barrera de los 0,5 \$/W<sub>p</sub> para módulos fotovoltaicos. Pero no todo depende de este factor, ya que es preciso tomar en cuenta el desarrollo de otras fuentes de energía competitivas (tales como la gasificación del carbón), o bien actitudes sociales (presión de los movimientos ecologistas) o, incluso, factores político-económicos, tales como un nuevo salto en el precio del petróleo o un embargo parcial en las fuentes de suministro. En todo caso, y debido a las circunstancias cada vez más cambiantes, tampoco sería descartable una coyuntura en la cual la energía fotovoltaica pudiera ser económicamente competitiva para el suministro a grandes consumidores. Si esta circunstancia se produjese, la industria fotovoltaica habría logrado convertirse en un factor importante para el desarrollo de un país.

Un estudio basado en un crecimiento anual acumulativo del 4% para el consumo eléctrico, prevé en España para el año 2000 un mercado en sistemas fotovoltaicos de 6.400 millones de pesetas/año, con una producción fotovoltaica del 0,1% del total de la energía eléctrica producida, valor que se convertiría en 64.000 millones de pesetas si la penetración fotovoltaica fuera del 1,0%.

## LOS PAISES INDUSTRIALIZADOS Y LA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Como elemento comparativo, se presentan a continuación algunos datos respecto a la actividad del sector energético fotovoltaico en ciertos países de industrialización avanzada.

### LA EXPERIENCIA USA

Según los datos disponibles (Tabla 6), el gasto de la administración americana en actividades de I + D fotovoltaica ha progresado del modo siguiente:

1977	59x10 <sup>6</sup> \$
1978	80x10 <sup>6</sup> \$
1979	103x10 <sup>6</sup> \$
1980	130x10 <sup>6</sup> \$

INVERSIONES EN INVESTIGACION Y DESARROLLO  
FOTOVOLTAICO EN USA

TABLA 6

Se puede afirmar que el ritmo de crecimiento de estas inversiones es superior al de las realizadas en otras energías alternativas. Hay que tener en cuenta, además, que una serie de compañías del sector privado siguen sus propias líneas de investigación sin apoyo de la Administración, con el objeto de que los resultados obtenidos no sean de dominio público y así poder conseguir mejor posición en el mercado.

Volviendo al gasto público, una ley aprobada en 1979 por el Congreso (National Photovoltaics Act) prevé unas inversiones de  $1.500 \times 10^6$  \$ durante los próximos diez años para investigación, desarrollo y comercialización de la energía fotovoltaica. Por otra parte, se ha establecido el Federal Photovoltaics Utilization Program, para el cual se han autorizado inicialmente  $98 \times 10^6$  \$ durante los diez próximos años. Los objetivos de este programa son:

- Crear un mercado federal, haciendo que los distintos organismos del Gobierno utilicen instalaciones fotovoltaicas cuando éstas sean justificables económicamente.

- Procurar que este mercado sirva de base para que las compañías fabricantes de células y sistemas fotovoltaicos aumenten su capacidad de producción, punto esencial para conseguir reducciones de costo que permitan una expansión del mercado en aplicaciones comerciales.

Estas actividades se centralizan en organizaciones tales como el Jet Propulsion Laboratory, que coordina el proyecto del DOE, "Módulo Fotovoltaico de Bajo Coste" centrado sobre la utilización de células de silicio, o bien el Lewis Research Center, de la NASA, que centraliza las actividades sobre instalaciones para funcionamiento autónomo, esto es, no conectadas a una red eléctrica. El MIT, por su parte, se dedica a la evaluación de los sistemas fotovoltaicos para vivienda. Se espera que la primera instalación esté en operación en los próximos meses y que en 1986 se tengan varios centenares de equipos en funcionamiento. Sandia Laboratories, además, realiza experiencias en aplicaciones de tamaño medio, con énfasis en operaciones conectadas a la red.

### HACIA UNA EUROPA FOTOVOLTAICA

Hay en Europa aproximadamente 60 compañías que actúan en el campo fotovoltaico. Desde 1977 a 1985 están previstas inversiones en I + D con el apoyo de los Gobiernos, cuyo valor anual promedio es de  $37 \times 10^6$  \$. Alemania Federal, por ejemplo, tiene un programa plurianual, cuya media es de  $12 \times 10^6$  \$/año, y Francia, en 1979, tenía previsto un desembolso de  $8 \times 10^6$  \$/año. Según algunas fuentes, las capacidades de producción en 1978 eran las siguientes:

FRANCIA	RTC, etc.	100 Kwp/AÑO
ALEMANIA	AEG-WACKER	40 Kwp/AÑO
ITALIA	MONTEDISON	-----
REINO UNIDO	FERRANTI	40 Kwp/AÑO
(TOTAL APROX., 200 Kwp/AÑO)		

TABLA 7

En Europa, las investigaciones se centran prioritariamente sobre temas tales como:

- Mejora y producción en serie de células de silicio monocristalino.
- Desarrollo de nuevos tipos de células; de capa fina (CdS/Cu<sub>2</sub>S), silicio policristalino, AsGa para dispositivos de concentración.
- Estudio, desarrollo y pruebas de sistemas de pequeño tamaño (1-5 Kw).
- Estudio de factibilidad de sistemas de tamaño medio (500-1.000 Kw).

Merece ser, además, destacado el Programa Comunitario de la CEE según el cual el organismo comunitario financia el 50% del costo de los proyectos, quedando el resto de cuenta de la empresa a la que se contrata su desarrollo, ya sea por sí misma o con la ayuda de su Gobierno respectivo. Actualmente está en curso un plan de cuatro años que dispone de un presupuesto de  $5 \times 10^8$  \$, con el objetivo de instalar un total de 2 Mw<sub>p</sub> en emplazamientos del norte de Europa, distribuidos en pequeñas instalaciones de 5 a 100 Kw, con la posibilidad de una central de 1.000 Kw.

## SIEMPRE JAPÓN

La capacidad de producción japonesa en este campo está estimada, por algunas fuentes, en unos 50 Kw<sub>p</sub> anuales. Su actual volumen de ventas es de  $2 \times 10^8$  \$. Los programas de investigación están concentrados sobre técnicas de producción masiva de células fotovoltaicas y en el seguimiento de los programas de otros países, con el fin de propiciar su irrupción en el mercado tardíamente pero con el apoyo de una gran estructura comercial y la ventaja de su importantísima penetración en el mercado de los semiconductores y la industria electrónica.

## PERSPECTIVAS Y ACTUACIONES ESPAÑOLAS EN ESTE ÁREA

El primer paso para homologar la situación española con las restantes, es comparar algunas magnitudes representativas del esfuerzo investigador en esta energía con relación a otros parámetros. Obsérvese la Tabla 8.

	POBLACION (MILLONES)	RENTA PER CAPITA \$	PROGRAMA FOTOVOLTAICO ANUAL		
			\$x10 <sup>8</sup>	\$/HABITANTE	% R. P/C
USA	218	6200	150	0.69	0.11
FRANCIA	53	5600	8	0.15	0.027
ALEMANIA	61	6000	12	0.197	0.033
ITALIA	57	3600	40 •	0.7	- 0.19
ESPAÑA	37	2900	--	-	-

• PERIODO 1981-1984 (COMUNICACION PRIVADA)

TABLA 8

Aunque se trate de un ejercicio muy preliminar, se pueden avanzar algunas conclusiones:

- La totalidad de los programas europeos representa aproximadamente un tercio del programa USA.
- La inversión en I + D per cápita es, en USA, 4,5 veces mayor a la de Francia y unas 3,5 veces superior a la de Alemania.
- Referidos al porcentaje de la renta per cápita, los valores en USA son 4,1 veces superiores a los de Francia y 3,3 veces superiores a los de Alemania.
- Es, sin duda, evidente que los programas europeos van retrasados con respecto a los de USA, fundamentalmente en lo relativo a instalaciones de demostración. Por otra parte, la administración americana, a través de compras de sistemas fotovoltaicos, va a impulsar su industria fotovoltaica de modo importante. En cambio, la industria europea, carente por lo general de apoyos semejantes, puede encontrar su mercado en la exportación a países en vías de desarrollo.

- En España, si se alcanzara el 0,04<sup>o</sup>/<sub>100</sub> de la renta per cápita para dedicarlo a la I-D fotovoltaica, esta suma representaría una inversión de 0,116 \$ por habitante y año, cantidad que globalmente alcanzaría los  $4,3 \times 10^8$  \$ por año. Este orden de magnitud parece congruente con los programas de otros países europeos.

En base a esta necesidad y a fin de identificar una serie de proyectos en este campo, que permitiesen definir y establecer la base de un Programa Fotovoltaico, a nivel nacional, se convocaron, en 1980, unas Jornadas de Reflexión, tratando de coordinar los esfuerzos que se estaban realizando, de forma aislada e incompleta, en el mundo académico y empresarial. Con la participación de representantes de 16 empresas y 13 cátedras pertenecientes a 4 distritos universitarios, se llevó a cabo una primera identificación de proyectos con un presupuesto de unos 500 millones de pesetas y un programa para 3 años.

A partir de los proyectos iniciales se han seleccionado aquellos que se han considerado más idóneos y más adecuados a nuestras posibilidades tecnológicas y necesidades locales. Para el desarrollo de estos proyectos se han arbitrado fondos públicos, de diferentes organismos, y fondos privados aportados por las propias empresas participantes. Asimismo UNESA, a través de los fondos que las empresas del Subsector Eléctrico han de dedicar a las investigaciones en el campo de la Energía, intervendrá en la financiación de algunos proyectos.

Por lo que respecta a la Administración, este Programa inicial y abierto, en cuanto que permite la incorporación de nuevos proyectos y experiencias, está patrocinado por:

- Ministerio de Industria y Energía.

- Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
- Centro de Estudios de la Energía.
- Dirección General de la Energía.
- Dirección General de Innovación Industrial y Tecnología.

- Ministerio de Universidades e Investigación.

- Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica.
- Dirección General de Política Científica.

En la figura 5 aparecen las referencias de los diferentes proyectos que actualmente constituyen el Programa, con un presupuesto del orden de 400 millones de pesetas, agrupados por Investigación Básica (IBF), Investigación Aplicada (IAF) y Desarrollo (DF). En el mismo gráfico se indica la relación existente entre los diferentes proyectos e incluso la "distancia" de cada proyecto a la puesta en práctica o experimentación de sus resultados.

Con estos proyectos se pretenden conseguir nuevos desarrollos y dar continuidad a los trabajos ya realizados con el apoyo de diferentes Organismos como la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, el Centro de Estudios de la Energía y la Fundación Ramón Areces.

Dados los diferentes Organismos que intervienen en la financiación de proyectos, y, por tanto, las diferentes normas administrativas a aplicar, está previsto llevar a cabo una coordinación mediante la participación de personas comunes en las Comisiones y Comités de seguimiento. Esta forma de actuación permitirá una adecuada coordinación para el desarrollo del programa, y así, utilizando los medios y cauces actuales, aunar esfuerzos en orden a la consecución de un objetivo común.

Los resultados obtenidos se experimentarán y evaluarán, en la medida de lo posible, tanto individualmente como comparativamente, en una Central Solar Fotovoltaica, cuya instalación está prevista en un plazo de 3 años (Figura 6).

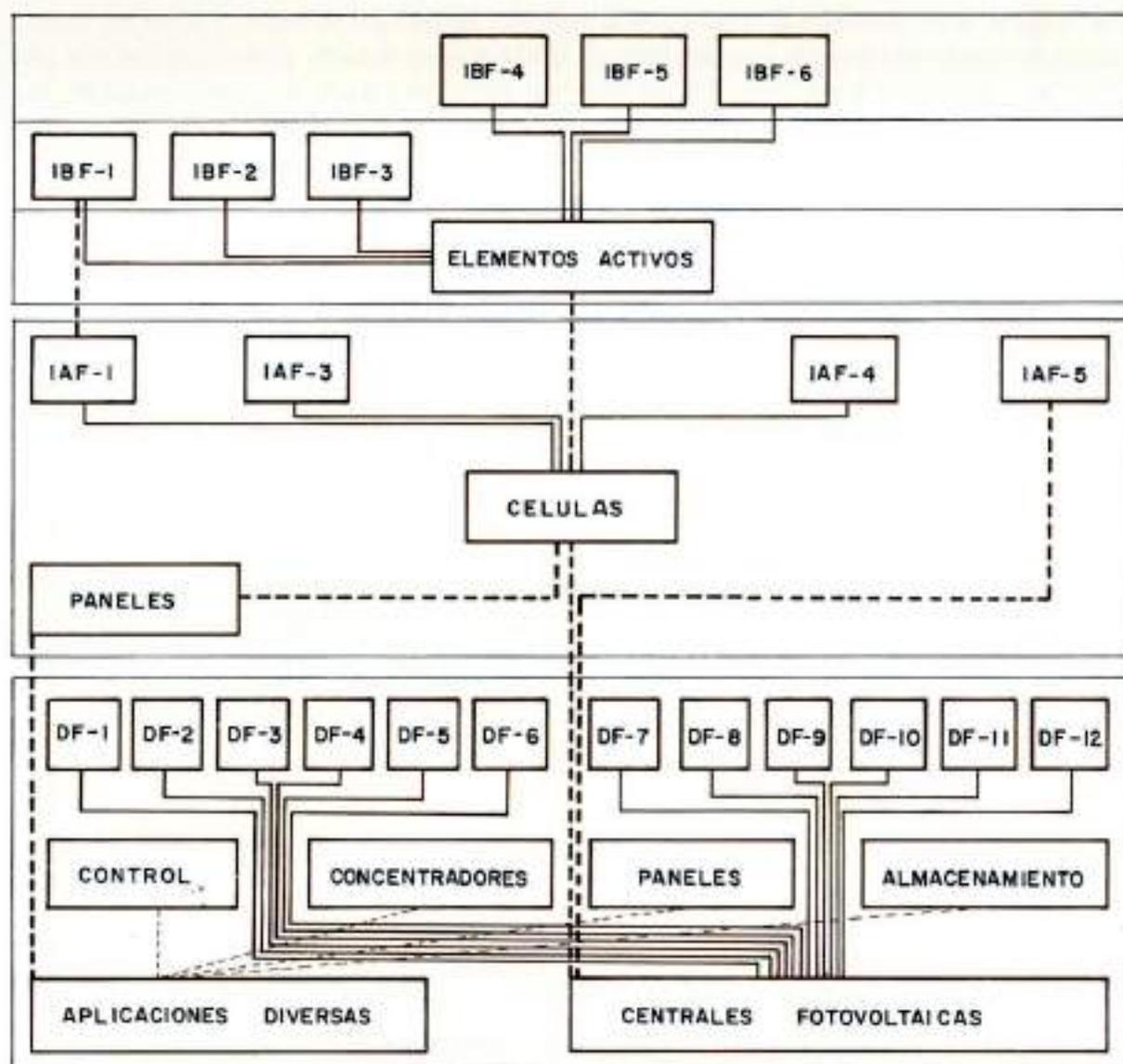


FIGURA 5

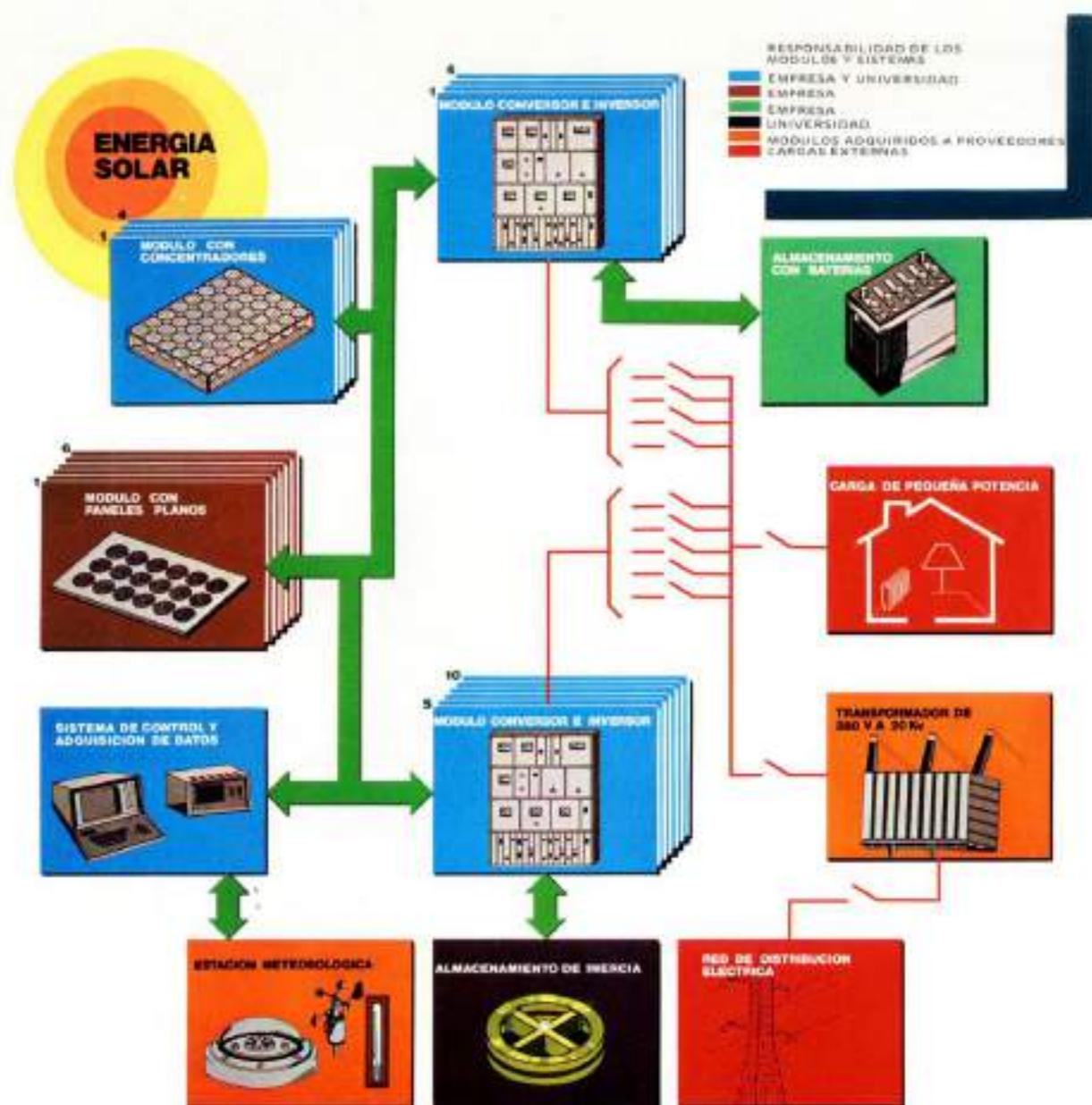
La Central tendrá una potencia de  $100 \text{ Kw}_p$  compuesta de 10 módulos de  $10 \text{ Kw}_p$  cada uno. Estará preparada para conexasarla a la red general de electricidad, con objeto de experimentar tanto su funcionamiento aislado como su comportamiento en paralelo a la red.

La modularidad de  $10 \text{ Kw}_p$  permitirá la experimentación de la Energía Fotovoltaica para otras aplicaciones distintas al conexasado a la red general, como por ejemplo aplicaciones de electrificación rural.

Existirán módulos de paneles concentradores y paneles planos, y asimismo se utilizarán distintos tipos de células.

La misma estructura prevista permitirá instalar y experimentar nuevos paneles o nuevos módulos, que se puedan desarrollar para la fecha de instalación de la Central o con posterioridad a la misma.

En la Central también se experimentarán los elementos electrónicos de control y de potencia asociados a una instalación fotovoltaica, así como los elementos de almacenamiento de Energía adecuados.



**CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA**  
**FIGURA 6**

A continuación se expone, de modo esquemático, el contenido de cada uno de los proyectos.

**Referencia Proyecto:** IBF-1.

**Título:** Propiedades Ópticas de Concentradores Solares Luminiscentes.

**Descripción:** Los problemas actuales de los Concentradores Solares Luminiscentes son de escaso rendimiento y baja estabilidad, al resultar fuertemente dañables por la irradiación solar.

Este proyecto estudiará tanto la causa del daño de la irradiación como las medidas a adoptar para la optimización de la eficacia. Se pretenden ensayar diversos colorantes, que hagan de cadena luminiscente y supongan un aprovechamiento básico del espectro solar.

**Referencia Proyecto: IBF-2.**

**Título:** Ensayos de Dispositivos Fotovoltaicos.

**Descripción:** Dada la importancia de las medidas y ensayos de laboratorio para conocer el comportamiento de los dispositivos semiconductores fotovoltaicos y progresar en su conocimiento y desarrollo, se pretende la formación y puesta a punto del equipo necesario.

Se intenta disponer del personal y del laboratorio adecuado para la calibración, homologación y ensayo de los diferentes materiales.

Debe considerarse como una herramienta y soporte necesario a la Industria y a los Centros de Investigación en la producción de células solares y paneles fotovoltaicos.

**Referencia Proyecto: IBF-3.**

**Título:** Fotopilas Solares de Heterouniones de capas delgadas de CdS y  $Cd_{1-x}Zn_xS$  con  $CuInSe_2$  y  $CuInS_2$ .

**Descripción:** Una de las nuevas tecnologías, que hacen previsible la disminución del coste actual de las células solares, es la realización de fotopilas de heterouniones delgadas de CdS y  $Cd_{1-x}Zn_xS$  con  $CuInSe_2$  y  $CuInS_2$  por evaporación en alto vacío a partir de diversos crisoles con la temperatura controlada.

Ya se han realizado algunos trabajos sobre fotopilas de CdS/ $CuInSe_2$  habiendo obtenido unos rendimientos relativamente bajos. Mediante este proyecto de investigación se pretende mejorar características y rendimientos basados en la obtención de un perfecto acoplamiento de las redes cristalinas.

**Referencia Proyecto: IBF-4.**

**Título:** Tecnología de Fabricación de Células Solares con Oxidos Semiconductores sobre Silicio.

**Descripción:** Mediante este proyecto se pretende la investigación y puesta a punto de una Tecnología para la fabricación de Células Solares, en las que se mejore la relación rendimiento-coste.

Se parte de la base de que las estructuras de heterouniones sobre el silicio van a desempeñar un papel importante en los próximos años, y entre ellos las uniones Schottky de los óxidos de estaño y de indio sobre silicio, que constituyen el objetivo del proyecto.

Se trabajará sobre monocristales de silicio de tipo "n", aunque también está prevista la posibilidad de utilizar policristales, dado que estos, de coste notablemente inferior al de los monocristales, se prestan mejor a la elaboración de heteroestructuras que a la de homoestructuras.

**Referencia Proyecto:** IBF-5.

**Título:** Producción y Optimización de Películas Delgadas de Compuesto II y VI para su utilización en Células Solares.

**Descripción:** Este proyecto pretende llevar a cabo un estudio de las propiedades eléctricas y ópticas de Películas Delgadas de Compuestos II y VI, CdTe y CdS, para su utilización en Células Solares.

Los materiales se han elegido teniendo en cuenta las excepcionales expectativas, que desde un punto de vista teórico se les asocia al CdTe junto con el atractivo que ofrece el poder mejorar las células basadas en CdS, dada la facilidad de su producción.

Los métodos previstos en la producción de las películas son pulverización catódica, spray y evaporación térmica.

Las películas producidas se optimizarán en función de su utilización en las Células Solares.

**Referencia Proyecto:** IBF-6.

**Título:** Nuevos Materiales Fotovoltaicos: el Seleniuro de Indio Laminar. Cristalogénesis y preparación de Células Solares.

**Descripción:** Este proyecto trata de estudiar y optimizar la cristalogénesis, caracterización y preparación de Células Solares utilizando el seleniuro de indio laminar, que por sus propiedades ópticas y electrónicas se ha considerado como un material prometededor.

Se presta especial atención al carácter laminar de este semiconductor y por otra parte a que los requerimientos de pureza química son menos restrictivos que en otros materiales, lo que permite prever que las células resultantes sean de bajo coste.

**Referencia Proyecto:** IAF-1.

**Título:** Estudio y realización de un concentrador solar luminiscente de componente líquido, acoplado a células solares de Silicio.

**Descripción:** Se trata del estudio y realización de un concentrador solar luminiscente de componente líquido, acoplado a células fotovoltaicas de Silicio. El concentrador está constituido de un material con impurezas luminiscentes disueltas, que no solo transforman la energía solar en una emisión eficiente para la célula fotovoltaica, sino que además recoge con alta eficacia la luz difusa haciendo el papel de guía de onda.

En este proyecto se aprovecharán los resultados obtenidos en las investigaciones sobre las Propiedades Ópticas de los concentradores solares luminiscentes.

Se trata de una alternativa en la utilización de concentradores estáticos para disminuir la superficie de material semiconductor fotovoltaico, y, aunque presenta un alto riesgo, el desarrollo de esta tecnología puede tener un fuerte interés en otras aplicaciones de la conversión fotovoltaica.

Estos paneles se utilizarían en uno de los módulos de la Central Solar Fotovoltaica permitiendo así su experimentación y análisis del comportamiento en comparación con los otros tipos de concentradores y paneles planos.

**Referencia Proyecto:** IAF-3.

**Título:** Fabricación de Células Solares en Lámina Delgada de tipo  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$ , de bajo costo, para uso Terrestre.

**Descripción:** Se trata de estudiar las células solares en lámina delgada de tipo  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  formando y evaluando las heterouniones y células, de tal forma que si los resultados lo justifican se pasará a fabricación rutinaria que evidencia los parámetros claves para una producción industrial.

Este tipo de células son consideradas entre las más calificadas para conseguir los objetivos de precios estimados en el Programa Fotovoltaico Americano.

**Referencia Proyecto:** IAF-4.

**Título:** Estudio de viabilidad de la obtención de Silicio de grado solar a partir de Silicio metalúrgico.

**Descripción:** El proyecto se enmarca en una primera fase que ha de estudiar la viabilidad del proceso y que, en caso de resultar positiva, iría seguida de la determinación de un programa de actuación para llegar a la fabricación industrial del Silicio de grado solar.

El proyecto se considera del máximo interés, pues la utilización de un Silicio de grado solar, a partir de Silicio metalúrgico sin necesidad de pasar por el Silicio de grado semiconductor, es una de las formas que ofrece posibilidades para conseguir el abaratamiento de las células solares.

Se realizará una selección de muestras de Silicio según el proceso actual, evaluando tanto las materias primas que intervienen en el proceso de producción como en el proceso en sí.

A partir de las muestras obtenidas se realizarán una serie de análisis, se determinarán distintas técnicas para purificar el Silicio metalúrgico y se estudiarán las posibilidades para la obtención del Silicio de grado solar.

**Referencia Proyecto:** IAF-5.

**Título:** Desarrollo y construcción de un prototipo de almacenamiento mecánico de Energía (Sistema Inercial).

**Descripción:** Se pretende desarrollar un Sistema de Almacenamiento, basado en las propiedades de los volantes de inercia, que puede ser interesante tanto para el tema fotovoltaico como para otras aplicaciones de almacenamiento (Energía Eólica por ejemplo).

Los objetivos concretos que se pretenden alcanzar, aún conscientes del alto grado de riesgo, son:

- a) Desarrollo de un prototipo de pequeño tamaño: 500 w-h y 10 Kg de peso (la misma capacidad de almacenamiento que una batería convencional de plomo de 20 kg).
- b) En caso de éxito del primer objetivo, desarrollo de un prototipo de tamaño medio de 30 Kw-h y 200 Kg de peso (la misma capacidad de almacenamiento que una batería de 1.200 Kg), con una vida media del orden de 3 veces mayor que la de una batería convencional y un rendimiento del orden de 5 puntos superior.

**Referencia Proyecto:** DF-1.

**Título:** Supervisión y Coordinación del desarrollo de una Central Fotovoltaica.

**Descripción:** En el desarrollo de todos los proyectos, contenidos en el Programa Fotovoltaico, cuyos resultados se tratan de llevar a experimentación y evaluación en la Central Solar Fotovoltaica, resulta imprescindible una importante labor de supervisión y coordinación que, precisamente por su importancia ha de considerarse como un proyecto independiente del que se obtendrán importantes conclusiones.

**Referencia Proyecto:** DF-2.

**Título:** Diseño y construcción de un prototipo de inversor estático para módulo de 10 Kw<sub>p</sub> para conversión cc/ca.

**Descripción:** Este proyecto tiene interés tanto en el proyecto global de Central Solar Fotovoltaica como de manera independiente, pues el desarrollo es para módulo de 10 Kw de potencia.

Se trata de un subsistema de mando programable, soportado por microprocesadores, que además de independizar la circuitería del sistema de la forma de onda deseada, permite disponer del microprocesador para otros usos: control de módulo, adquisición de datos, etcétera.

El proyecto vendría a rellenar un "hueco", que parece que existe en lo relativo a inversores de altas prestaciones, pensado específicamente para su uso en sistemas fotovoltaicos.

**Referencia Proyecto:** DF-3.

**Título:** Diseño del Sistema de Control y Adquisición de Datos.

**Descripción:** El interés de este proyecto está ligado a la explotación de los resultados de la Central Solar Fotovoltaica, siendo por tanto importante por su contribución al análisis y obtención de resultados que es el objetivo fundamental en el proyecto global de la Central Solar Fotovoltaica.

Se trata de controlar tanto cada uno de los módulos como el puesto central de control, mediante un microcomputador, conectando todos ellos entre sí y disponiendo de los elementos necesarios para información y almacenamiento: terminal-video, impresora, cinta magnética o disco, etcétera.

La toma de datos y el registro de acontecimientos se efectuarán periódicamente, bajo demanda o cuando se produzcan ciertos sucesos.

**Referencia Proyecto:** DF-4.

**Título:** Diseños y construcción de un convertidor cc/cc y dispositivos de seguimiento del punto de máxima potencia.

**Descripción:** Se trata del diseño y construcción de un dispositivo que, con independencia de las variaciones aleatorias de la carga conectada y de los factores ambientales que condicionen la producción de Energía Eléctrica, fuerce al panel a trabajar siempre en el punto de máxima potencia, controlando y actuando, asimismo, en función del estado de carga de la batería.

La utilidad del proyecto también está relacionada por su contribución a la solución racional del problema de almacenamiento de Energía, cada vez más significativa cuanto más se reduzcan los costes de las células solares. Así se pueden ofrecer utilidades inmediatas en diversos campos: repetidores de TV, radiotelefonos, boyas, regadíos, granjas viviendas remotas, etcétera.

**Referencia Proyecto:** DF-5.

**Título:** Fabricación de Concentradores y Equipos Eléctricos y Electrónicos.

**Descripción:** A partir de los paneles diseñados se ha de definir las especificaciones necesarias para llegar a la fabricación de los paneles correspondientes.

Los paneles podrían ser utilizados tanto para células monofaciales como bifaciales y permitiría reducir en un 25% el número de células solares necesarias.

**Referencia Proyecto:** DF-6.

**Título:** Desarrollo del proceso de fabricación de Células Bifaciales.

**Descripción:** Se pretende desarrollar, por primera vez en el mundo, la Tecnología de Fabricación de Células Fotovoltaicas Bifaciales.

Este tipo de Células ha sido desarrollado en España y tiene la ventaja de poder captar el doble de la energía captada por una célula normal, con la misma cantidad de silicio.

**Referencia Proyecto:** DF-7.

**Título:** Diseño, construcción y pruebas de dos prototipos de panel concentrador.

**Descripción:** Esta actividad se considera de interés, puesto que convendría probar el comportamiento de los paneles concentradores frente a los paneles planos.

El objetivo que se plantea es la realización de un panel plano de apertura limitada (PPAL) con concentración estática mínima de 6 x para radiación directa y 4 x para radiación difusa.

Al mismo tiempo supone la continuación de una serie de trabajos emprendidos en este campo y constituirá una forma práctica y real de evaluar los resultados obtenidos.

**Referencia Proyecto:** DF-8.

**Título:** Fabricación y Adquisición de Células.

**Descripción:** Se pretende desarrollar en España una Tecnología para la fabricación, de manera económica, de células con rendimientos comprendidos entre el 10 y el 12 %.

El objetivo básico es permitir a la Industria la preparación necesaria para acudir al mercado en el momento en que se produzca el desarrollo de éste.

**Referencia Proyecto:** DF-9.

**Título:** Diseño de nuevas baterías para aplicaciones solares.

**Descripción:** El objeto del proyecto es la investigación, desarrollo, fabricación, instalaciones y pruebas de un acumulador diseñado específicamente para aplicaciones fotovoltaicas y para potencias de 10 Kw.

Este tipo de acumulador ha de tener características específicas, tales como que la mayor parte del tiempo se ha de encontrar con carga inferior a la plena y que el tanto por ciento de carga depende del período solar del lugar donde el acumulador esté localizado.

El acumulador ha de resistir la sulfatación, evitándola o reduciéndola al mínimo, y ser capaz de funcionar sin mantenimiento en períodos prolongados.

**Referencia Proyecto:** DF-10.

**Título:** Estudio preliminar, definición y especificaciones para un sistema de Central Solar Fotovoltaica.

**Descripción:** Lógicamente es el primer trabajo que hay que realizar para acometer el proyecto de la Central Solar Fotovoltaica experimental e incluso ha de estar terminado antes de empezar otras actividades.

En esta fase se pretende, mediante una simulación, estudiar diversas alternativas y tomar decisiones respecto a la definición de diferentes componentes.

**Referencia Proyecto:** DF-11.

**Título:** Instalación y Pruebas.

**Descripción:** Este proyecto, más que considerarse como tal debe considerarse como el resultado del proyecto global de Central Solar Fotovoltaica.

Es una de las partes fundamentales donde se manifiesta el interés del proyecto global al constituir la base para el análisis y la obtención de resultados.

Supone el desarrollo de métodos de instalación y prueba, así como la elaboración de rutinas de mantenimiento y estudios técnico-económicos de las aplicaciones.

## FUTURO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

En la comunicación inaugural de la XIV Conferencia de especialistas fotovoltaicos, organizada por la IEEE en 1980, Paul Rappaport pone de manifiesto el crecimiento espectacular que este sector adquiere en la década de los setenta: de una inversión total de dos millones de dólares en 1970, se pasa a los doscientos millones en 1979. Del mismo modo, los sistemas proyectados pasan de potencias de 2 Kw<sub>p</sub> a 1 MW<sub>p</sub>, y los costes de producción se van reduciendo de forma acelerada.

Con respecto a los materiales utilizados, las perspectivas son esperanzadoras puesto que en la actualidad existen numerosos proyectos destinados a potenciar materiales alternativos, tales como el fosforo de indio/sulfuro de cadmio, telururo de cadmio, fosforo de zinc, seleniuro de cobre/sulfuro de cadmio, arseniuro de zinc y silicio, arseniuro de boro, etcétera.

La diversidad de estudios sobre materiales parece indicar que la tecnología de fabricación de células solares no va a ser única y que cada país tendrá que desarrollar la que se adapte mejor a sus recursos naturales e industriales. Sin embargo, puede decirse que el silicio ha triunfado sobre sus competidores en todos los campos de los dispositivos, a excepción de los rayos láser. Esto se debe a la gran abundancia de este material y a la existencia de una base tecnológica desarrollada en los últimos veinticinco años con otras finalidades.

La tendencia a mantener el silicio como material de base, en forma monocristalina o policristalina, está, pues justificada y existe un gran esfuerzo en los programas nacionales de investigación y desarrollo para obtener tecnologías que permitan obtener células de silicio de bajo costo para ser utilizadas en sistemas sin concentración con grandes superficies de captación. Como el material activo en las células solares es del orden de 25 micras en silicio e inferior en otros tipos de células, la idea generalizada es que, con tecnologías poco costosas y producciones en masa, se puede llegar a costos de inversión por Kw competitivos con los convencionales en centrales eléctricas medianas.

Otra área muy interesante de investigación es la búsqueda de células con elevada eficiencia (30%) para concentración, sistema en el que el costo del dispositivo es menos importante. Por otra parte, la obtención de lingotes de silicio de grano grande, método más sencillo que el de crecimiento de monocristales, abarata el producto en un cuarenta por ciento, para células de efi-

ciencia media (12 a 14%). También se ha producido silicio policristalino de menor pureza que el usado en otros dispositivos electrónicos, lo que permite reducir los costos a menos de una cuarta parte. Si la inversión privada es un buen índice para juzgar la posible rentabilidad de un sistema, es interesante resaltar el hecho de que la industria privada dedicó unos cincuenta millones de dólares en 1979 al desarrollo de estas tecnologías.

Es preciso mencionar, sin embargo, que se escuchan muchas voces pesimistas respecto a la verdadera disponibilidad de reservas de silicio. Se observa, en algunas fuentes, que para 1982 la demanda de silicio puede superar a la oferta, lo cual obligará a establecer prioridades en el uso de este material. Esto permite suponer a algunos investigadores que el silicio se utilizaría más bien en la fabricación de circuitos integrados o microprocesadores y no en células solares, dado el sentido económico actual de unos y otros dispositivos.

De la información disponible se deduce, por una parte, la viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos pero, por la otra, resulta claro que es preciso avanzar en superar la barrera de los costos de aplicación. Para valernos de la experiencia ajena es interesante constatar que el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos ha puesto en marcha un proyecto de panel solar de bajo costo (LSA) y más curioso aún es constatar que el método elegido ha sido el de encomendar el desarrollo a la industria, aportando fondos federales, bajo la filosofía de compartir el riesgo a fin de acelerar el proceso tecnológico y obtener bajos precios.

A largo plazo, el tema de la conversión de energía solar fotovoltaica debe ser examinado dentro del proceso de sustitución de los sistemas actuales de generación de electricidad. En esta perspectiva, la tecnología fotovoltaica habrá de tener todavía una pequeña participación a nivel global, hacia finales de este siglo.

En sistemas no autónomos, de utilización doméstica o centrales de hasta 200 Mw en conexión a la red, se espera alcanzar la viabilidad económica en la década de los noventa, siempre que los costos de fabricación de células y paneles se reduzcan a la décima parte de los actuales. El probable encarecimiento de los combustibles convencionales, y en particular el petróleo y el gas, puede también contribuir a hacer más competitiva la energía solar.

En general, se reconoce que el desarrollo de sistemas fotovoltaicos dentro de opciones económicamente competitivas requiere mayores avances. Expertos americanos estiman que serán precisos unos treinta o cincuenta años para que la electricidad de origen fotovoltaico tenga una participación superior al diez por ciento en el consumo total energético.

El esfuerzo de investigación y desarrollo para identificar la tecnología adecuada debe ser grande. Una vez identificada, esta tecnología tiene que desarrollarse y conducir a una industria fotovoltaica muy superior a la actual, todavía embrionaria. Subsisten problemas de base muy importantes que están abiertos al esfuerzo investigador. Así, por ejemplo, con vistas a largo plazo, es necesario experimentar con materiales orgánicos muy abundantes y de bajo coste, tales como el poliacetileno, que, pese a sus aparentes ventajas, no han sido ensayados suficientemente. Asimismo, dado que las interfases limitan a menudo las características de los dispositivos fotovoltaicos, es fundamental la investigación de sus estructuras y sus propiedades electrónicas. Los especialistas en este campo, pensando en las fronteras de la tecnología, suelen proponer la necesidad de un esfuerzo en la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales fotosensibles.

**ANEXO**

## LA FISICA DEL EFECTO FOTOVOLTAICO

Los fotones de la luz solar son absorbidos por el semiconductor, generando portadores de carga, electrones y huecos que emigran y son separados en la unión de la célula y recogidos en las bornas.

El primer requisito, es decir, que el semiconductor absorba fuertemente la luz solar, equivale a que la "energía de ligazón" de los electrones en los enlaces covalentes del semiconductor sea del orden de la energía de los fotones del espectro solar más abundante (de 1 a 3eV) (Fig. 1). La intensidad y composición espectral al nivel del mar se llama iluminación a masa atmosférica uno (AM1), siendo entonces la intensidad aproximadamente 1 Kwatt/m<sup>2</sup>.

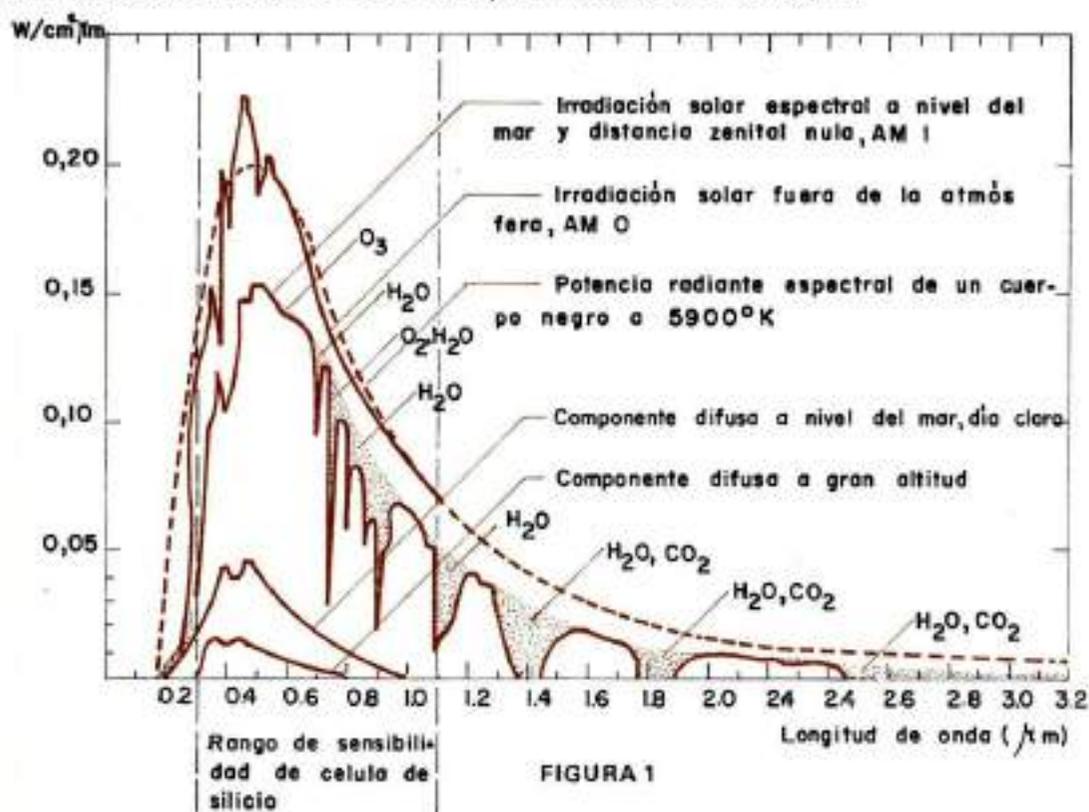


FIGURA 1

En el intervalo de energía de los fotones solares de 3.1 eV a 1.1 eV (longitudes de onda de 0.4 a 1.1 micras) se encuentra el 80% de la energía solar, y de 3.1 eV a 1.5 eV (0.4 a 0.8 micras) el 60%. Esto produce una pérdida del 20 al 40% por inadaptación de la "energía de ligazón" de los electrones de enlace del semiconductor al espectro de la luz solar.

Las "energías de ligazón" de algunos materiales son:

CuInSe <sub>2</sub>	1.0eV
Si	1.1eV
Cu <sub>2</sub> S	1.2eV
InP	1.3eV
GaAs	1.4eV
CdTe	1.5eV
CdSe	1.7eV
CdS	2.4eV

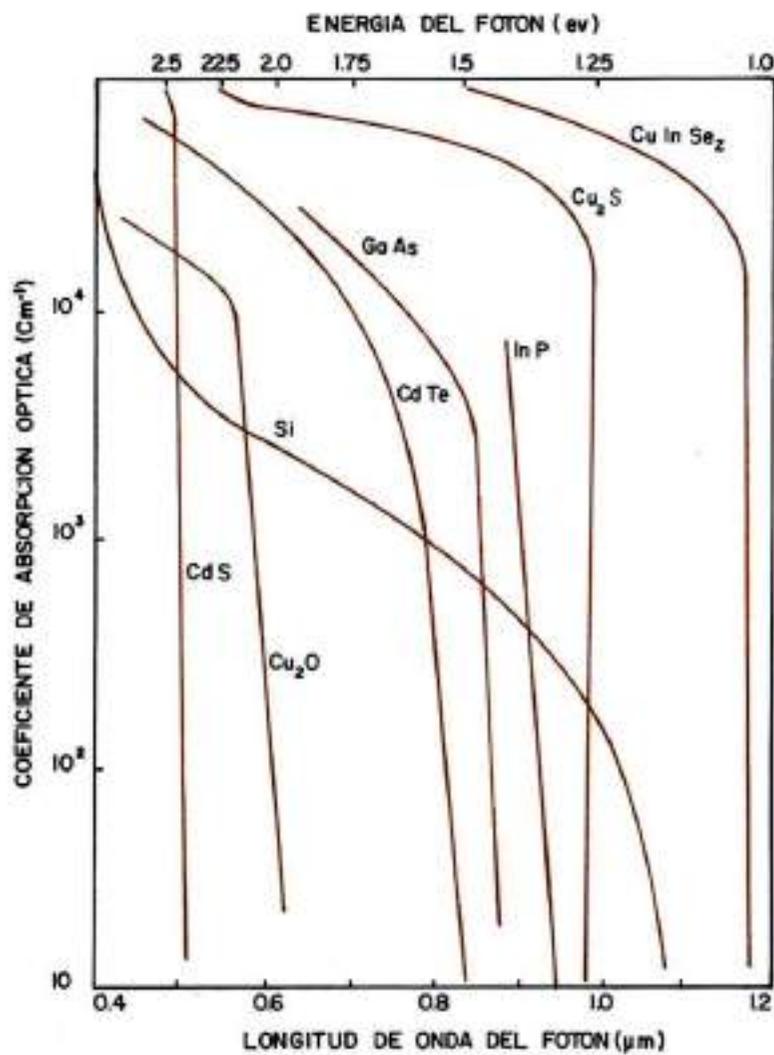


FIGURA 2

El segundo requisito, esto es, que los portadores creados tengan un tiempo de vida superior al de su migración a la unión y su separación en la misma, implica que en materiales con absorción moderada los portadores han de tener larga vida; los de gran absorción luminosa se libran de este requisito si la unión está muy cerca ( $\approx 0.1$  micras) de la superficie por donde penetra la luz.

La Figura 2 indica cómo varía la absorción óptica con la energía de cada fotón en diferentes materiales. Como se ve el silicio no es el material idóneo por su absorción aunque sus otras propiedades lo compensan con creces.

En la unión la barrera de potencial y el campo eléctrico para los electrones está indicado en la Figura 3 en función de la posición. Al difundirse los electrones liberados por la luz a la derecha de la unión se encuentran con una barrera de potencial que no pueden superar y permanecen en la región n. Los electrones liberados en la parte p al difundirse a la derecha son acelerados a la parte n y pierden el exceso de energía cinética por chocar con los átomos confundándose con los electrones que están en la parte n.

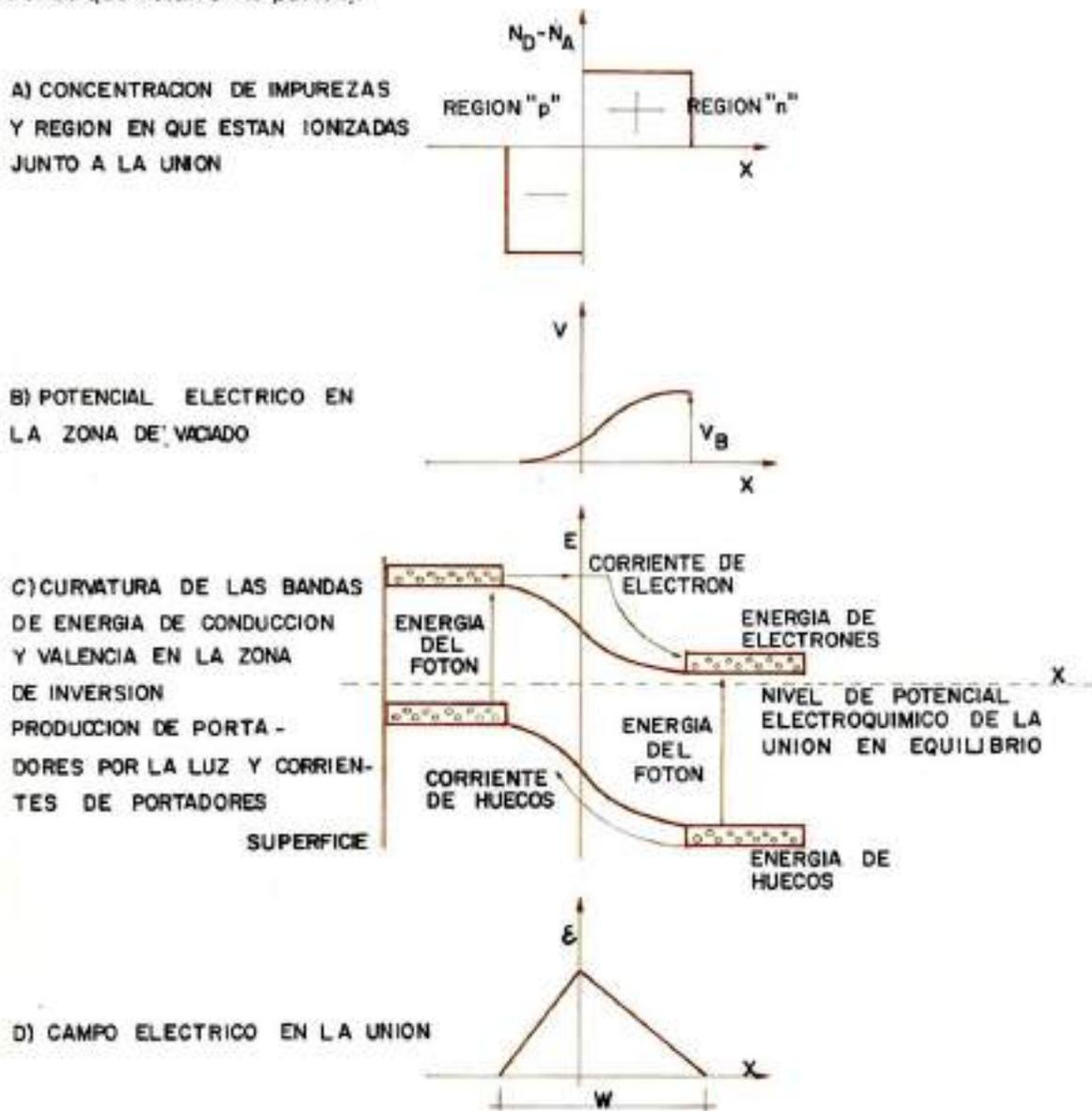


FIGURA- 3

El proceso análogo sucede con los huecos, que por tener carga positiva, pasan de la parte n a la parte p de la unión.

La acumulación de electrones en la parte n y de huecos en la parte p hace que el potencial electroquímico se desplace y por tanto aparezca una diferencia de potencial entre la parte n y la parte p, que no existe cuando la unión está en equilibrio en la oscuridad. Esta diferencia de potencial aparece como la fuerza electromotriz entre las bornas de las células, si no hay consumo de corriente.

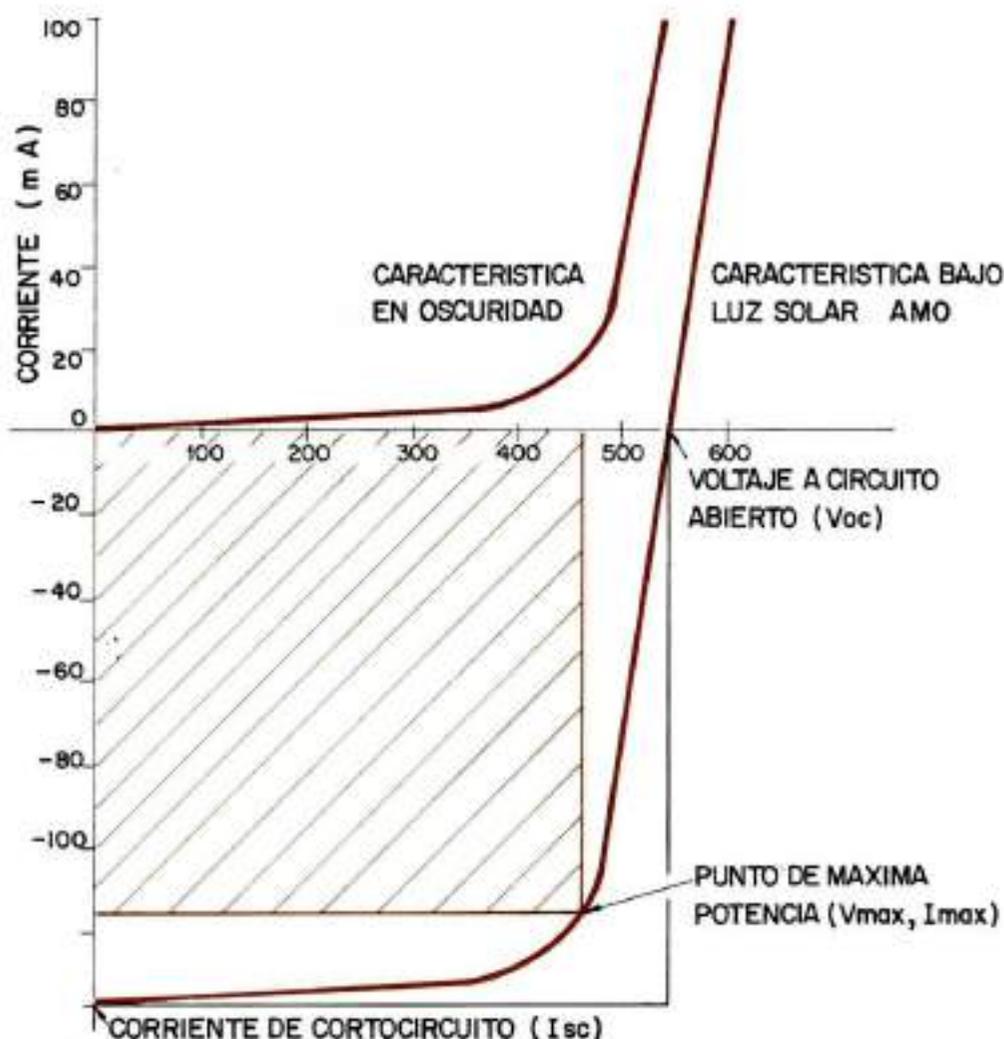


FIGURA 4

Cuando se extrae corriente de la célula varía su voltaje en las bornas. La Figura 4 nos indica la característica de una célula de  $4\text{ cm}^2$  de Silicio cuando está iluminada por el sol a mediodía, y en ella está indicado el punto de potencia máxima, así como la intensidad de cortocircuito  $I_{SC}$  y la tensión a circuito abierto o fuerza electromotriz  $V_{OC}$ .

La corriente de cortocircuito aumenta linealmente con la intensidad de la radiación luminosa, pero no el voltaje a circuito abierto ni la potencia máxima de la célula. No todos los portadores producidos contribuyen a la corriente, ya que se recombinan con huecos, y desaparecen, principalmente en la superficie libre y en la misma unión.

La relación entre la potencia máxima que suministra la célula en iluminación solar AM1 y la potencia incidente de la luz, se llama eficiencia ( $\eta$ ) de la célula y es su índice de mérito más importante. Una potencia de 1 watt obtenido en estas circunstancias se llama "watt pico" o "watt cresta" y se indica "w<sub>p</sub>".

Las uniones pueden producirse: a) con un solo material, p. e. Si, variando abruptamente la concentración de impurezas (homo-unión), o b) utilizando dos materiales diferentes (p. e., Cu<sub>2</sub>S-CdS, AlGaAs-GaAs, SnO<sub>2</sub>-Si, heterounión o Pt-Si, barrera Schottky). En este caso la recombinación de portadores suele ser mayor y se generan intensidades menores.

Los cálculos teóricos obtenidos utilizando las propiedades de diferentes materiales indican que a temperatura ambiente se pueden obtener con diferentes materiales células con eficiencias máximas comprendidas entre el 16 y el 28% para homo-uniones formadas con monocristales, siendo las eficiencias obtenidas en laboratorio (Si, AsGa) y en producción industrial (Si) más de la mitad de este valor teórico.

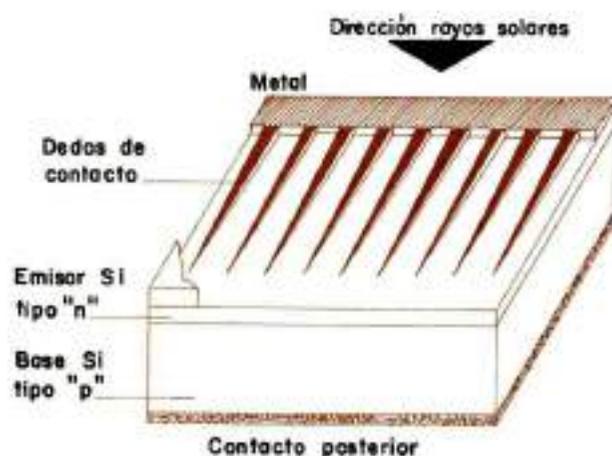


FIGURA 5

La estructura de una célula solar comercial de homo-unión (Si) está representada en la Figura 5 y la de una célula solar comercial de heterounión (Cu<sub>2</sub>S-CdS), en la Figura 6.

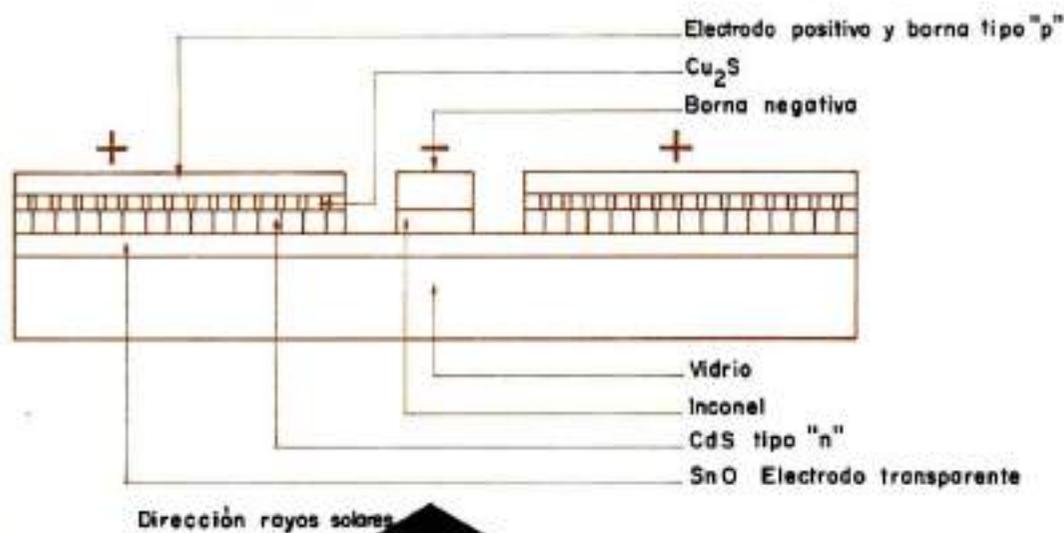


FIGURA 6

## TECNICAS DE PRODUCCION DE MATERIALES

En este apartado se recogen los métodos de fabricación de las células solares que hoy en día se encuentran en estado avanzado de desarrollo, incluyendo lógicamente las de silicio y  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  que dominan el esfuerzo actual y que están comercializadas.

### CÉLULAS DE SILICIO MONOCRISTALINO

En la Figura 7 se indican esquemáticamente las distintas fases de fabricación de estas células.

El material de partida es la sílice (óxido de silicio) del que por reducción se obtiene silicio metalúrgico de bajo costo pero con una pureza del orden del 98% que no es suficiente para su posterior utilización como célula solar. Este silicio metalúrgico por tanto se somete a un proceso de purificación con clorosilano ( $\text{SiHCl}_3$ ) que permite obtener un material con pureza del 99,999% denominado de "calidad electrónica" (método Siemens). Una purificación alternativa consiste en el refinado metalúrgico utilizando aluminio, que produce un material impuro con el que, sin embargo, se pueden fabricar células solares policristalinas, de un 10% de eficiencia.

A partir del producto de alta pureza se crece el material monocristalino por el llamado método de Czochralski que, en pocas palabras, consiste en lo siguiente: una masa de silicio de calidad electrónica se funde en un crisol a la temperatura de  $1.421^\circ\text{C}$ ; un germen de silicio se pone en contacto con la superficie fundida y se extrae lentamente aplicando simultáneamente un giro. El gradiente de temperatura existente entre la interfase germen-líquido hace que éste cristalice sobre el germen con una sección transversal que depende de la velocidad de tiro y del gradiente en la interfase.

De esta manera se obtienen lingotes de 1 metro de longitud y sección comprendida entre 2 y 10 cm.

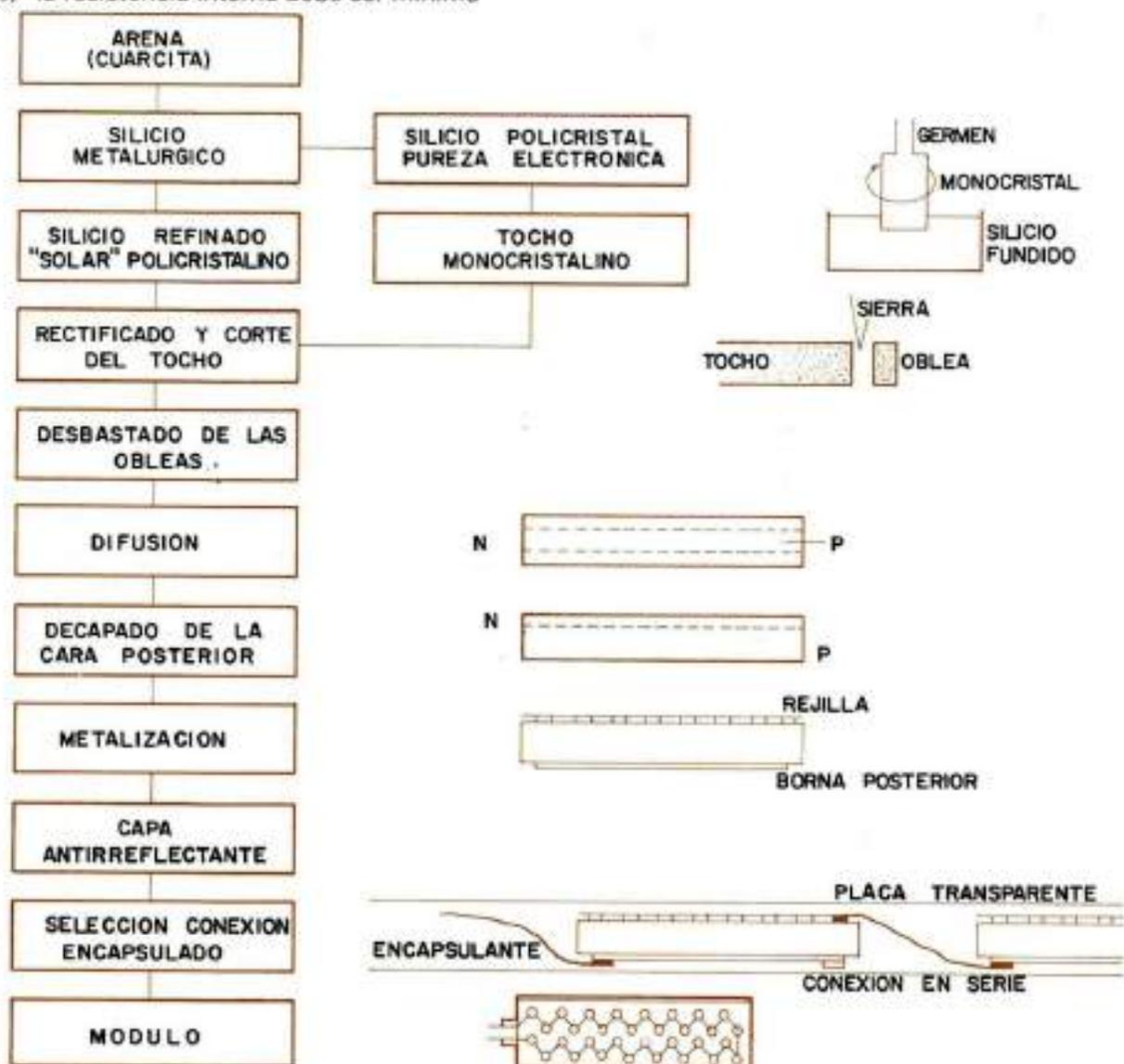
El lingote monocristalino se rectifica mecánicamente y se corta en obleas de  $\approx 400\ \mu\text{m}$ . El siguiente paso de producción consiste en un pulido químico a fin de eliminar el daño producido por el corte ( $20\ \mu\text{m}$ ).

Generalmente las obleas son tipo P pues en el crisol con el silicio fundido se introduce una cierta cantidad de boro que es el material dopante aceptador. Estas muestras tipo p sufren un proceso

llamado de "dopage" que crea la unión modificando su estructura electrónica superficial. Esta operación se realiza a una temperatura de 900° C por difusión de átomos de fósforo utilizándose generalmente vapor de  $POCl_3$ . Después de este proceso, toda la superficie que envuelve a la oblea es de tipo n y como sólo es necesario una superficie para formar la unión p-n, la parte inferior es nuevamente "pulida".

Para conectar la célula a un circuito externo (fase de fabricación general para todas las células solares independientemente del material semiconductor usado), es necesario realizar contactos eléctricos en los bornes de la unión p-n mediante una metalización de las superficies. Como la superficie n es la que recibe la radiación solar, la metalización debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) el área metalizada debe permitir el mayor paso de la radiación solar
- b) la resistencia interna debe ser mínima



PASOS EN LA FABRICACION DE CELULAS DE SILICIO MONO Y POLICRISTALINO DE GRANO GRANDE  
FIGURA 7

Actualmente se utilizan distintas geometrías de metalización que optimizan los apartados a) y b) así como tratamientos térmicos que aseguran la buena adherencia del metalizado al silicio y la reflexión en la cara posterior de la luz no absorbida.

Finalmente se deposita en la superficie expuesta al sol una capa antirreflectante de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  o  $\text{TiO}_2$  que reduce a un 10% la luz reflejada por la superficie de silicio, debido a su alto índice de refracción, puesto que de otro modo supondría una pérdida de más del 30%.

El rendimiento de las células de silicio monocristalino fabricadas comercialmente es de 12%-18% mientras que en laboratorio se han conseguido células con rendimientos próximos al 20%, cercanos del vapor teórico (22-25%).

Aunque las células de silicio monocristalino fabricadas por el método de Czochralski son las mejor establecidas en el mercado internacional, presentan el problema desde el punto de vista industrial de la automatización del proceso de fabricación debido a las varias etapas necesarias para su obtención.

En los últimos quince años se ha investigado el desarrollo de técnicas para la obtención de silicio monocristalino en láminas o cintas que eliminan el problema del corte y por tanto pueden disminuir el costo.

## **CÉLULAS DE SILICIO POLICRISTALINO Y METALÚRGICO**

Actualmente está en fase muy avanzada de desarrollo la producción de células con material policristalino que no necesita del control riguroso de la temperatura como ocurre con los métodos para la obtención de material monocristalino. Así, en 1977, la Wacker Chemitronic anunció la obtención de lingotes cuadrados de silicio policristalino, obteniendo células con rendimiento hasta de un 16%. Sin embargo, los tres métodos más conocidos de obtención de material policristalino son los siguientes:

- a) Enfriamiento controlado del fundido. Este método es desarrollado por Crystal Systems en relación con el proyecto americano de panel de bajo costo (LSA). Las células así obtenidas, con 10% de eficiencia, alcanzan precios de 0,16 \$/W<sub>p</sub>. Este material es análogo al obtenido anteriormente por Wacker Chemitronic, de la República Federal Alemana, y por Union Carbide, tras refinado. En la última Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos, celebrada en 1980, Crystal Systems presentó tochos de silicio monocristalino de 30 × 30 × 30 cm.
- b) Crecimiento horizontal. Propuesto por la Compañía Toyo Silicon del Japón, consiste en aprovechar la totalidad de la superficie libre en la masa de silicio fundido para extraer de ella una cinta de igual anchura que dicha superficie. Como en este caso se dispone de una gran área para disipar el calor latente de solidificación, pueden utilizarse velocidades de crecimiento elevadas (30 mm/min.).
- c) Silicio sobre cerámica. Investigado por la compañía Honeywell, este es un proceso continuo parecido al de la impregnación del papel en el que una cinta horizontal de mullita es mojada con silicio en su cara inferior depositándose una película de 0,1 mm de espesor. Se han obtenido células con 10% de eficiencia y se espera poder alcanzar también los 0,19 \$/W<sub>p</sub> asignados en los análisis de costo en el proyecto panel solar de bajo costo de silicio (LSA).

Otra variante con un gran futuro es la obtención de células de silicio policristalinas por deposición a partir de la fase de vapor. Una mezcla de diclorosilano e hidrógeno puro se descompone pirolíticamente, depositando silicio sobre un sustrato a temperatura elevada. En estas condi-

ciones el hidrógeno reduce al diclorosilano depositándose cristales de silicio. El sustrato debe ser de bajo costo, tener un coeficiente de expansión térmica próximo al del silicio, ser inerte a temperaturas elevadas y permitir buenos contactos eléctricos. Como sustrato se ha utilizado silicio de baja pureza (grado metalúrgico) y grafito.

Con sustratos de grafito a 1.200 °C fueron depositadas sucesivas capas de silicio p y n, a partir de la reducción del  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  convenientemente dopado. Las células así obtenidas en 1976 llegaron a rendimientos próximos al 4 %. Utilizando mullita como sustrato se ha llegado a obtener células de rendimiento del 10 % con espesores de 100  $\mu\text{m}$ .

La utilización de silicio de grado metalúrgico como material de partida ha sido igualmente considerada como una opción competitiva en la fabricación de células solares de silicio de bajo costo. Por silicio de grado metalúrgico se entiende el obtenido de los procesos de reducción de la sílice con, a lo sumo, un proceso de refinado por fusión, sin utilizar como paso purificador la obtención de  $\text{SiCl}_4$  u otros componentes gaseosos análogos, caros en energía. El actual costo del silicio metalúrgico es de 1-2 \$/kg y su producción representa un consumo energético de 10-24 Kwh/kg.

De entre los diversos trabajos realizados en este campo, merecen ser mencionados los llevados a cabo por Union Carbide Corporation y Stanford Research Institute (SRI International). El primer método consiste en realizar un proceso de refinado del silicio metalúrgico utilizando aluminio. Las células así fabricadas presentan alrededor del 10 % de eficiencia sin empleo de capas anti-reflectantes y su costo se aproxima a los 5 \$/kg.

El método del SRI International consiste en la obtención del silicio a partir del ácido fluorosilícico, producto de desecho de la industria de fertilizantes, por reducción con sodio metálico. Este material parece tener una pureza notable (8 partículas por millón de impurezas) y el costo sería de 7,0 \$/kg.

Aparte de la fabricación de células por el método convencional de difusión, este material ha sido propuesto como sustrato de células que utilicen en su región activa Si de grado semiconductor con menos de 1 ppm de impurezas, depositado por descomposición pirolítica de un compuesto gaseoso de Si.

Todos estos procesos tienen posibilidades apreciables de convertirse en tecnologías de fabricación a gran escala que alcancen los objetivos a largo plazo de precio inferior a 1 \$/W<sub>p</sub> y "tiempo de amortización" de la energía de fabricación inferior a 1 año.

Asimismo, existen trabajos en curso sobre la obtención de células de silicio policristalino evaporado en vacío con diferentes sustratos, como silicio grado metalúrgico y acero inoxidable. Debido a que el coeficiente de absorción óptica es bajo en gran parte del espectro solar, son precisas capas relativamente gruesas con estructura columnar (~ 50-100  $\mu\text{m}$ ). La producción del número de electrones y huecos para alcanzar eficiencias adecuadas requiere un bajo nivel de centros de recombinación y, por tanto, películas de silicio con poco dopaje.

La evaporación en vacío de silicio dopado produce la capa activa, alcanzándose rendimientos de hasta 9,7 %. Aunque el costo de producción mediante esta técnica no está todavía bien determinado, se espera conseguir costos comparables a los de otras células de lámina delgada y eficiencias superiores al 10 %.

## CÉLULAS DE PELÍCULAS DELGADAS CRISTALINAS Y AMORFAS

Se admite generalmente que, en producción a gran escala, el costo de las células fotovoltaicas estará determinado por el material semiconductor de base. Por esta razón, se presta gran interés al estudio y desarrollo de las células de película delgada de materiales abundantes.

Se trata de capas delgadas policristalinas o amorfas caracterizadas por las altas concentraciones de defectos y los cortos tiempos de vida de portadores, en comparación con los monocristales. A pesar de ello, se obtienen células con eficiencias próximas al 10 % ( $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ ) y 6 % (silicio amorfo). Presentan la ventaja de utilizar poco material activo ya que absorben la luz mejor que el silicio cristalino, pero tienen algunos inconvenientes como, por ejemplo, poder degradarse químicamente en períodos largos (caso del  $\text{CdS}-\text{Cu}_2\text{S}$ ) y ser de difícil reproductibilidad.

Algunos materiales son tan complicados química y estructuralmente, que sus posibilidades de aplicación son, por el momento, bastante limitadas. Sin embargo, probablemente sean la base de una tecnología poco costosa en producciones a gran escala.

### a) Células $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$

La región activa consiste en una película de 0,1-0,3  $\mu\text{m}$  de espesor, crecido sobre sustrato conductor. La luz es absorbida en el sulfuro de cobre y la separación de portadores de carga se produce en la interfase  $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$ . Ello ha conducido al desarrollo de células solares con estos materiales, obteniéndose eficiencias de 9,15 % en superficie de 1  $\text{cm}^2$  y de 7 % en células de 50  $\text{cm}^2$ .

Las ventajas de las células  $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$  son las siguientes:

1. La absorción de la luz en el  $\text{Cu}_2\text{S}$  está bien acoplada al espectro solar.
2. Como el coeficiente de absorción del  $\text{Cu}_2\text{S}$  es muy alto, basta una capa muy delgada para absorber una parte apreciable de radiación solar.
3. El poco material activo requerido hace menos crítica la imperfección debido a fronteras de grano, bajas movilidades y vida media de los portadores.
4. La estructura de la heterounión tiene la ventaja de reducir mucho la generación en volumen de portadores y por lo tanto puede ser alta la tensión de la célula en circuito abierto.

El proceso de fabricación es sencillo y uno de los métodos más utilizados es el de evaporación o rociado de  $\text{CdS}$  sobre lámina de cobre u óxido transparente, seguido de un proceso de intercambio iónico en una solución de iones cobre. Aunque el  $\text{Cu}_2\text{S}$  debe protegerse contra el oxígeno y el vapor de agua, no se necesita película antirreflectante porque la superficie de la célula es rugosa.

Esta tecnología puede hacerse de proceso continuo (Fig. 8) y hoy se obtienen células de 5-7 % de eficiencia a precios de venta de 4,34  $\$/\text{W}_p$  (Photon Power).

Sin embargo, también presentan inconvenientes, citándose como más importantes las tres causas básicas de su inestabilidad:

1. Una desviación pequeña de la estequiometría reduce el rendimiento de modo importante. La exposición al  $\text{O}_2$  produce esta desviación, por lo que requieren un encapsulado.
2. La aplicación de un voltaje produce descomposición electrolítica del  $\text{Cu}_2\text{S}$ . El efecto se minimiza mediante dopado uniforme a ambos lados de la unión.
3. La difusión del cobre en el  $\text{CdS}$  crea una región compensada que aumenta la resistencia serie, según algunos autores.

## PROCEDIMIENTO DE FABRICACION DE CELULAS FOTOVOLTAICAS DE CAPA DELGADA

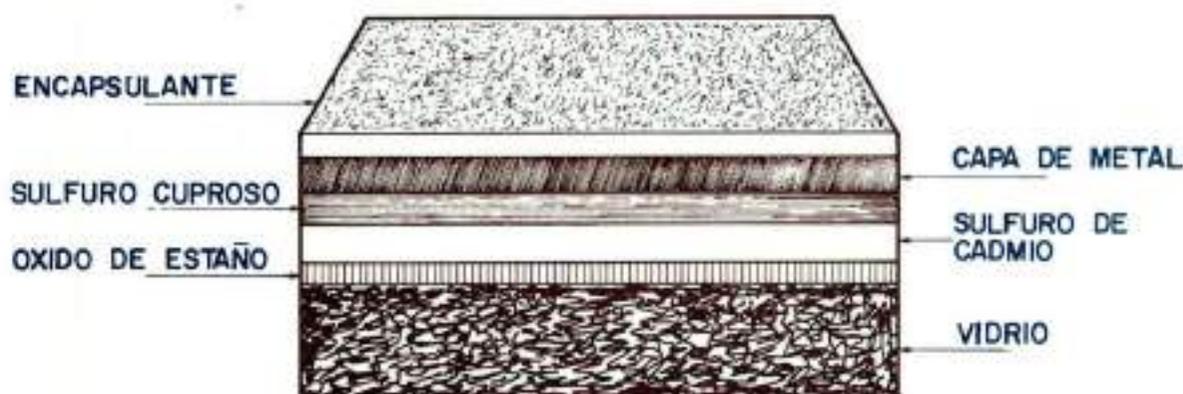
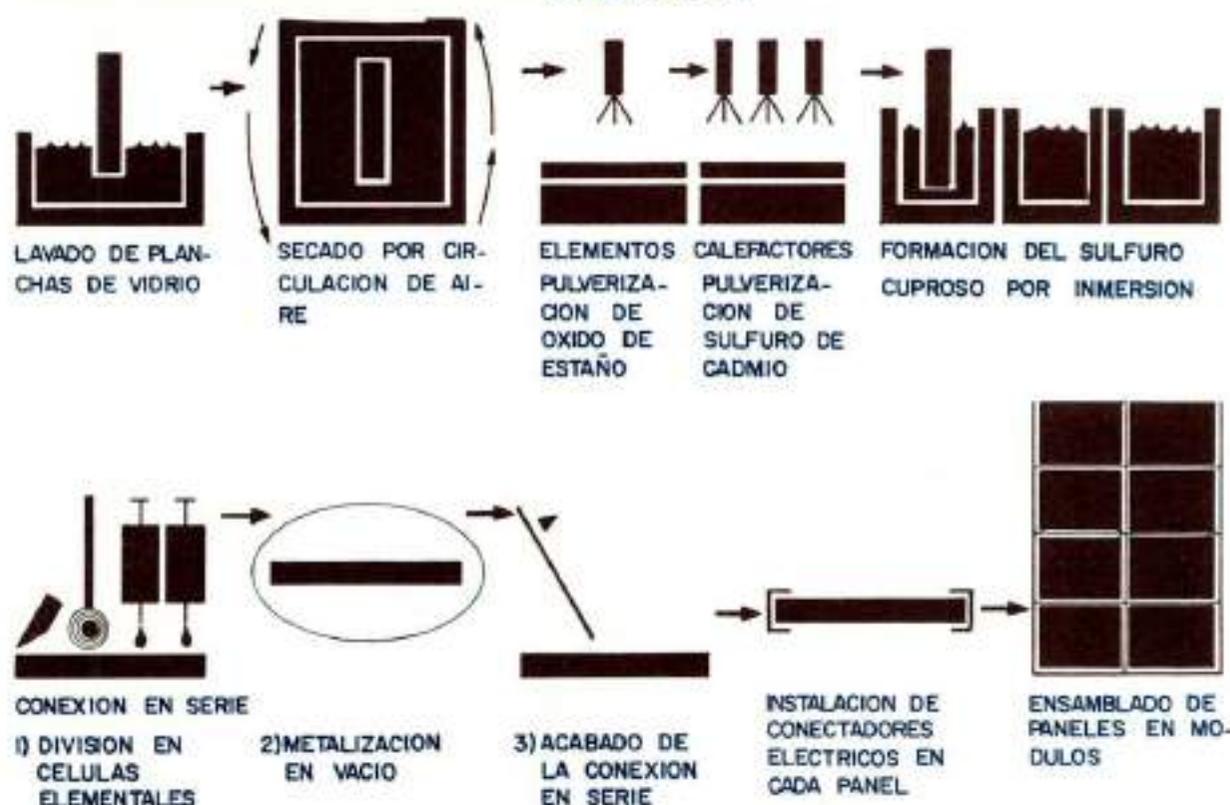


FIGURA 8

### b) Células de silicio amorfo (a-Si)

Experimentadas por vez primera en el año 1974, por Carlson en la RCA, se han realizado varios tipos de ellas. Las células MIS han alcanzado bastante rápidamente una eficiencia del 6 %, pero actualmente su progreso es lento, en particular por la dificultad en la obtención de células de varios centímetros cuadrados de área. Las células MIS incorporan en la parte metálica de su estructura platino, iridio y monóxido de circonio. El dopado del silicio, que muestra mejores propiedades cuando se obtiene por descarga gaseosa en alta frecuencia, se consigue con la mezcla de Arsenina o Borina o Fosfina (1 %) en silano ( $\text{SiH}_4$ ).

## **CÉLULAS DE CONCENTRACIÓN**

Las células de silicio comerciales para uso en panel plano presentan una eficiencia de un 12 %. Estas células pueden utilizarse en concentraciones de unas dos veces, mediante el empleo de un espejo plano no focalizador de baja calidad óptica, sin que disminuya su eficiencia.

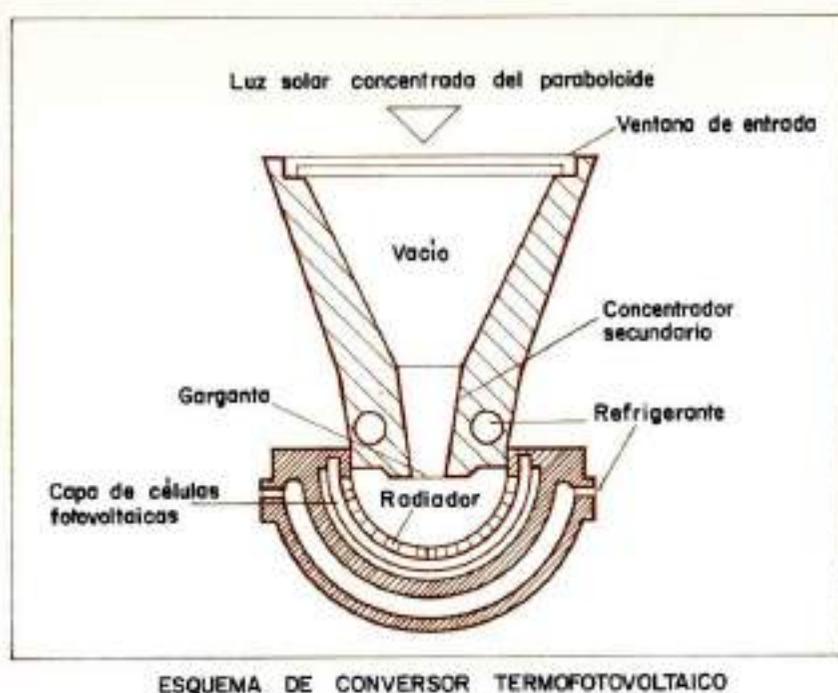
En sistemas concentradores que utilizan espejos parabólicos o lentes de Fresnel, las concentraciones pueden ser de 50-100 veces sin gran encarecimiento en la óptica; en tales circunstancias las células han de ser lo más eficientes posible, compatibles con el bajo costo global. Seleccionando el silicio de base y reduciendo pérdidas por disminución de la resistencia serie de la célula se puede llegar a 20 % de eficiencia para concentraciones de unas 50 veces. Una parte importante es la malla transparente colectora, situada en la superficie de incidencia de la luz, que al proporcionar densidades de corriente de más de 2 A/cm.<sup>2</sup> ha de tener una estructura muy cuidada para reducir las pérdidas de tipo resistivo. La refrigeración es una parte importante en el funcionamiento de la célula ya que la eficiencia disminuye con la temperatura, pudiéndose utilizar enfriamiento por radiación-convección al ambiente para concentraciones de unas 50 veces sin comprometer seriamente el rendimiento (15-20 %). De todos modos el enfriamiento con líquidos o incluso con "heat pipes" permite alcanzar altos rendimientos con altas concentraciones.

## **CONCEPTOS AVANZADOS**

Los sistemas concentradores están siendo considerados para obtener sistemas de alta eficiencia de conversión, creyéndose posible en fecha próxima alcanzar eficiencias superiores al 35 %.

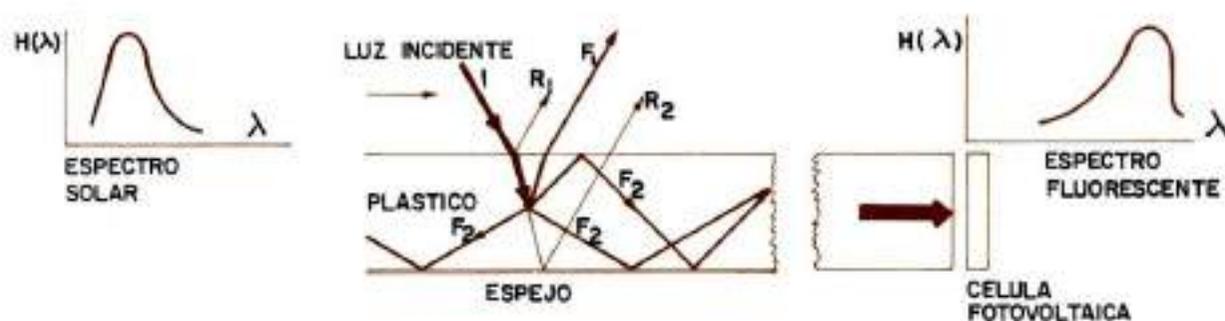
Al ser el espectro solar relativamente amplio, se ha estudiado el separarlo en dos o más componentes, utilizando espejos dicróicos o lentes de selectividad espectral, para las cuales se pueden utilizar células solares optimizadas o "espectralmente adaptadas" en número reducido (2 ó 3). Se han utilizado células de AsGa-Si con eficiencia de 28,5 %, y los sistemas Ge-AsGa y Ge-Si podrían producir con un par de células espectralmente adaptadas, del orden de 35-40 %.

Las células de germanio se han concebido recientemente incorporando "espejos de electrones" para ser utilizados en "convertidores de espectro" termofotovoltaicos por concentración: un receptor del sistema concentrador se calienta hasta unos 1.000 °C y emite como un cuerpo negro con espectro adaptado a una sola célula de Ge con lo que la eficiencia podría aproximarse al 30% (Figura 9).



**FIGURA 9:** LA ENERGIA SOLAR CONCENTRADA CALIENTA AL RADIADOR QUE LA REMITE CON UNA COMPOSICION ESPECTRAL DE CUERPO NEGRO A TEMPERATURA MENOR QUE LA SOLAR. LAS CELULAS FOTOVOLTAICAS TIENEN SU RESPUESTA ESPECTRAL ADAPTADA AL INFRARROJO.

De modo análogo, la utilización de fósforos orgánicos en paneles plásticos permite convertir la luz con eficiencia elevada y utilizar células adaptadas espectralmente. Los trabajos en curso intentan aumentar la vida de las sustancias luminiscentes y atrapar la luz en el plástico eficientemente (Fig. 10).



**FIGURA 10:** PRINCIPIO DE LA CONVERSION FLUORESCENTE. PARTE DE LA LUZ INCIDENTE (I) SE ABSORBE EN LAS MOLECULAS DE LOS COLORANTES Y SE REMITE A OTRA LONGITUD DE ONDA ( $I - R_1 - R_2$ ). PARTE DE ESTA RADIACION SE PIERDE ( $F_1$ ) Y PARTE QUEDA ATRAPADA ( $F_2, F_3, F_3$ ) INCIDIENDO SOBRE LA CELULA FOTOVOLTAICA ADAPTADA AL NUEVO ESPECTRO LUMINOSO.

## ALMACENAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

La figura 11 indica el balance energético de un sistema global con su curva de generación y diagrama de carga, siendo el área de la parte rayada la energía útil almacenada, para un sistema de 200 Kw<sub>p</sub> en un día de invierno.

La curva de generación es proporcional a la curva de radiación para ese día, cuya energía total producida es de 1.350 Kwh/día en un sistema integral.

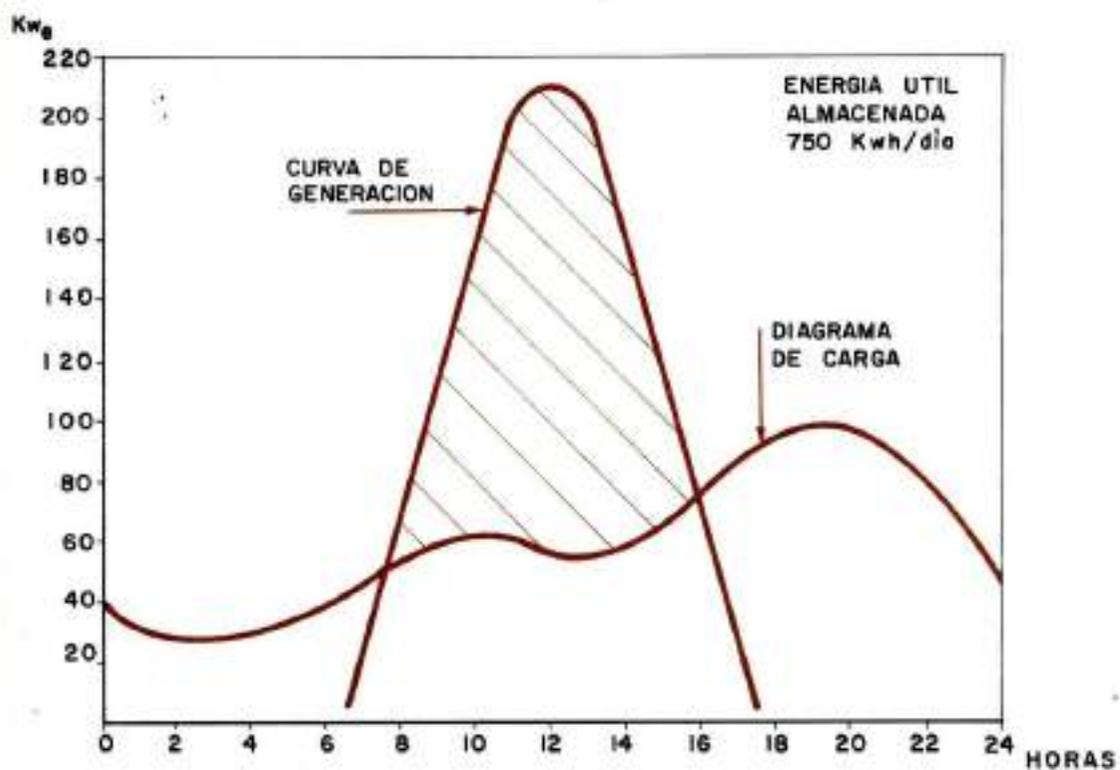


FIGURA 11

El diagrama de bloque simplificado de un sistema fotovoltaico está indicado en la figura 12 con las eficiencias de funcionamiento.



FIGURA 12

Al variar la iluminación de una célula, el voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) permanece constante mientras que la intensidad en cortocircuito ( $I_{sc}$ ) sigue directamente la intensidad de iluminación, por lo que han de hallarse para cada iluminación las condiciones de extracción de potencia máxima de la célula, realizando este seguimiento el sistema de acondicionamiento. La energía no utilizada en la carga es almacenada (baterías, centrales de bombeo, volantes de inercia, etc.), y utilizada por la carga después de un acondicionamiento.

Para centrales medianas de algunos Kw el subsistema de almacenamiento más inmediato es el de baterías estacionarias, pudiendo estimarse su rendimiento superior al 70%.

El almacenamiento a corto plazo de la electricidad es muy deseable en sistemas autónomos porque evita el excesivo tamaño de paneles requerido para satisfacer subidas rápidas y de corta duración en el consumo. Las características más notables de las baterías son:

1. Rápida respuesta a picos de carga y descarga.
2. Posibilidad de acoplar su resistencia a la de carga para mejor transferencia de energía.
3. Construcción modular que puede alcanzar cualquier tamaño de sistema, único viable para pequeños sistemas de hasta 1 Kw.
4. Posibilidad de conseguir bajas pérdidas y larga vida aún con descargas del 80% de su capacidad.
5. Densidad grande de energía (300 Kwh/m<sup>3</sup>).

Para optimizar estas características y adaptarlas a los sistemas es necesario reducir la necesidad de mantenimiento y desarrollar nuevos sistemas de baterías para utilización solar, entre los cuales se incluye la batería de estado sólido. Los sistemas Pb-ácido, Ni-Zn y Li-TiS<sub>2</sub> presentan posibilidades de desarrollo de una solución económicamente viable.

El almacenamiento de hidrógeno por descomposición electrolítica del agua y su futura conversión en electricidad con una "pila de combustible" parece considerarse hoy día como una solución técnica viable para grandes centrales.

El costo estimado en 1990 del sistema de almacenamiento es de 15% del de los paneles fotovoltaicos, y depende mucho de la fiabilidad de suministro requerida, mientras que el del sistema de acondicionamiento de potencia es de 5% del de los paneles. Por dicha razón, con el fin de obviar el almacenamiento, se han concebido multitud de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y entre ellos las residencias unifamiliares aparecen como una de las aplicaciones futuras de los sistemas fotovoltaicos más prometedores.

## AMORTIZACIÓN DE LA ENERGÍA DE FABRICACION Y DISPONIBILIDADES DE SILICIO

Sobre la amortización de la energía empleada en la fabricación de un panel solar, el Grupo de Estudio de la Sociedad Americana de Física (GECES) realiza el siguiente cálculo del tiempo de recuperación de la energía de fabricación con monocristal crecido por el método Czochralski (CZ) y corte en obleas

	Kwh/kg	Kwh/m <sup>2</sup>
Simetalúrgico . . . . .	24	
Conversión en Si grado semiconductor por el método "Unión Carbide" . . . .	123	
Conversión en monocristal por "CZ continuo" . . . . .	40	
Corte en obleas, 2 a 7 Kwh/kg, con margen . . . . .	20	
<b>TOTAL . . . . .</b>	<b>207</b>	<b>243</b>
Fabricación de células 3 Kwh/m <sup>2</sup> , con margen . . . . .		20
Ensamblaje del módulo: vidrio "float" 8,8 Kwh/m <sup>2</sup> con margen . . . . .		20
		<b>283</b>

Se ha tomado 0,85 m<sup>2</sup>/Kg en el corte de obleas de 0,25 mm de espesor y 20 obleas cm. Utilizando las cifras de eficiencia de material en cada proceso empleado de  $1.0 \times 0,95 \times 0,90 \times 0,95 = 0,77$  se obtiene un costo de. . . . . 369

Para una eficiencia del 16% y una insolación anual de 2.000 Kwh/m<sup>2</sup> la energía generada sería de 320 Kwh/m<sup>2</sup> año, por lo que el "tiempo de amortización" es poco más de un año.

En el caso del silicio en cinta, la energía prevista es de 40-100 Kwh/m<sup>2</sup> y el tiempo de amortización sería de unos 3 meses en caso de conseguirse la eficiencia en panel, un tanto optimista, del 16%, y de 6 meses, si no se mejora el 8-10% actual.

La anterior estimación descarta el método "Siemens" de purificación a partir del SiHCl<sub>3</sub> que requiere 450 Kwh/kg y que se utiliza en la actualidad. Con el método llamado Hemlock, se prevé

obtener el silicio a un coste energético de 90-68 Kwh/kg, según se ha anunciado en la "1980 Photo Voltaic Solar Energy Conference" por Lutwack, lo que reduciría el tiempo de amortización" a menos de un año.

El costo en energía del Si-metalúrgico parece realista, ya que la compañía Wacker lo obtiene a 10 Kw/kg en 1980, de calidad semicristalina SILSO con 25 ppm de impurezas, según se ha comunicado igualmente en la citada conferencia.

Parece, pues, que la estimación optimista de la eficiencia de panel de 16% queda compensada por los otros valores algo pesimistas, por lo que un tiempo de amortización de menos de un año parece alcanzable en 1986 cuando la producción de alguno de los métodos mencionados sea 100 Tm/año.

El Silicio por ser uno de los elementos más abundantes en la naturaleza no presentará problemas a largo plazo como materia prima. Los requerimientos específicos en cuanto a pureza, que parecen ser uno o dos órdenes de magnitud menores que en el Silicio para componentes electrónicos convencionales (circuitos integrados, transistores, etc.), hacen pensar que el silicio para células solares habrá que producirlo independientemente de aquél y tanto en USA como en Alemania e Italia se están desarrollando los procesos y realizando las inversiones que permitirán satisfacer la demanda en esta década. Italia, que podría servir de ejemplo para un país como España, tiene un proyecto de producción de silicio solar a partir del Silicio metalúrgico del que es un importante productor.

Incidentalmente, si las células de CdS tuvieran un importante mercado, el aprovisionamiento en este material no presentaría problemas ya que el consumo mundial de Cadmio está en descenso y es una fracción de la capacidad mundial de producción.

## PERSPECTIVAS DE DIFERENTES TIPOS DE CÉLULAS SOLARES

A corto plazo existe un objetivo de costo de 2,8  $\$/W_p$ , cuya factibilidad se propone alcanzar el Programa Fotovoltaico Americano para 1984.

Las células que parecen mejor situadas para lograr este objetivo son:

1. Silicio policristalino de grano grande obtenido por colada y enfriamiento controlado (Semicristalino de Solarex, Silso de Wacker y Monocristalino de Cristal Systems) con corte posterior y resto de la tecnología de fabricación convencional. Existe la posibilidad de que se fabriquen células metal, aislante, semiconductor con el método de "spray" utilizando  $Sn O_2$ , con las que en Exxon han obtenido 10% de eficiencia.
2. Células de  $Cu_2S - CdS$ , comercializadas en 1980 a 4,34  $\$/Watt$  en panel por Photon Power, cuya tecnología de fabricación por el método de "spray" tiene una potencial reducción de precio. Queda por probar, sin embargo, la estabilidad, larga vida y fiabilidad de estos paneles.
3. Cualquiera de los procedimientos de formación de monocristales de Silicio en bandas o de policristales de Silicio sobre cerámico o en obleas por colada puede producir células satisfactorias en el plazo de 3 años.
4. Algún sistema de concentración con sistema focalizante barato y con células de silicio.

Pueden asimismo alcanzar y rebajar el objetivo de 2,8  $\$/W_p$  las siguientes células:

1. Silicio amorfo.
2. Arseniuro de galio policristalino, con o sin producción de hidrógeno.
3. Las células electroquímicas, en lámina delgada.
4. Las células en lámina delgada de  $CdTe$ ,  $CuInSe$ ,  $Zn_3P_2$ ,  $CdS-InP$ .

## OTROS DATOS DE INTERES

Gastos actuales y previsibles publicados por el DOE (Departamento Americano de Energía) para instalaciones fotovoltaicas de uso doméstico en \$ 1980/W<sub>p</sub>

	1980	1986
<b>Paneles fotovoltaicos de silicio</b>		
Compra	9,00	0,70 - 1,08
Instalación	0,63 - 0,77	0,27 - 0,66
<b>Acondicionamiento de potencia</b>		
Compra	0,40 - 1,60	0,19 - 0,32
Instalación	0,04	0,04
<b>Diseño del sistema</b>	10,00	0,05
<b>Operación</b>	20,07 - 21,04	1,25 - 2,15
<b>Mantenimiento</b>	1,10 - 1,43	0,26 - 0,32
	0,13 - 0,37	0,27 - 0,31
<b>TOTAL</b>	<b>21,30 - 22,84</b>	<b>1,78 - 2,78</b>

### Características de los diseños evaluados por METREK

1. Paneles planos con reflector
  - Eficiencia con silicio, 16 %.
  - Eficiencia con película delgada, 10 %.
  - Orientación del colector fijo.
2. Dispositivo de concentración
  - Células de silicio, eficiencia 16 %.
  - Concentración 10, concentradores cilindro parabólicos.
  - Seguimiento en el eje vertical.
  - Módulo de 100 m<sup>2</sup>.
3. Acondicionamiento de potencia.
  - Estado sólido, módulos de 3-6 Mw.
  - Diseñado para la potencia de pico de los conjuntos.
  - Eficiencia 92 %.
4. Almacenamiento
  - Baterías electroquímicas.
  - Capacidad de descarga próxima al 100 %.
  - Sustitución, 2 veces en la vida de la planta (30 años).
  - Eficiencia media 75 %.
  - Se estudian diversas alternativas con almacenamientos de 2,5, 6, 12,5 y 23,2 hr a potencia nominal.
5. Bases de valoración
  - Todos los costos están basados en precios 1976.
  - Se ha tomado un valor de \$ 0,5 W<sub>p</sub>, el objetivo de DOE para 1986.
  - Para los concentradores se ha tomado un costo de \$ 80/m<sup>2</sup>.
  - Energía incidente 1 Kw/m<sup>2</sup>.
  - Baterías de almacenamiento:
    - Tecnología actual: vida, 300 descargas próximas al 100 %, \$ 50/Kwh.
    - Tecnología supuesta: vida, 3.000 descargas próximas al 100 %, \$ 25/Kwh. Sustitución 2 veces en la vida de la planta.

Se estudian diversas configuraciones de módulos y almacenamiento que con una capacidad nominal de 100 MW, dan factores de servicio de 0.26, 0.3, 0.39, 0.45 y 0.70.

## BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA EN LA REDACCIÓN DE ESTE DOCUMENTO

- A. B. Meinel y M. P. Meinel: "Applied Solar Energy: an introduction". Addison Wesley, 1977.
- P. D. Maycock, J. I. Hanoka, H. B. Strock y P. S. Kotval: "XIII IEEE Photovoltaic Specialists Conference". IEEE, 1978.
- E. C. Boes, P. Rapaport, P. D. Maycock, W. Palz: "XIV IEEE Photovoltaic Specialists Conference". IEEE, 1980.
- H. Ehrenreich: "Solar Photovoltaic Energy Conversion". American Physical Society, New York, 1979.
- "Export Potential for Photovoltaics Systems". DOE/CS-0078, Abril 1979.
- "Outlook for Si photovoltaic devices for terrestrial solar energy utilization". M. Wolf, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 12, n.º 5, Sept/Oct. 1975.
- "Historic Development of Photovoltaic". M. Wolf, Proceedings of International Conference on Photovoltaic Power Generation, DFVLR, 1974.
- "Solar-energy conversion at high solar intensities". C. E. Backus, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 12, n.º 5, Sep/Oct. 1975.
- "What is ahead for Solar Cells". Solar Engineering Magazine, Nov. 1977.
- "Photovoltaic Power Systems; a tour through the alternatives". H. Kelley, Sciences, Vol. 199, Feb. 10, 1978.
- "The coming boom on solar energy". Business Week, October 9, 1978.
- "Photovoltaics: The semiconductor revolution comes to Solar". A. L. Hammond, Science, Julio 1977.
- "Present status and prospects of photovoltaic Solar energy conversion". H. L. Durand, Photovoltaic Solar Energy Conversion, The Royal Society, Sept. 1979.
- "System Descriptions and Engineering Costs for Solar Related Technologies". Vol. VIII, Photovoltaic Central Power Systems, Junio 1977, MTR-7485.
- "Costes de inversión de Centrales Nucleares y de Carbón". A. González de Ubieta, Energía, Marzo-Abril 1980.
- "Coal, bridge to the future". Ballinger Publishing Company, 1980.
- "Photovoltaics the sky is the limit". L. M. Pruce, August, 1979.
- "Photovoltaics in the USA, A progress Report". R. C. Forney, Photovoltaic Solar Energy Conversion, The Royal Society, Sept. 1979.
- "The E.E.C. Photovoltaic Solar Energy R & D Program". R. J. Van Overstreten, Photovoltaic Solar Energy Conversion, The Royal Society, Sept. 1979.
- "Application of Solar Technologies to Today's Energy Needs". Vol. I, PB-283770, Junio 78.
- "Análisis prospectivo del mercado español de equipos fotovoltaicos para producción de energía eléctrica". ANIEL. P. Higuera, A. Esteban, 1979.
- "Acumulación de energía eléctrica de origen fotovoltaico solar". J. Fulla, C. Sánchez. Mundo Electrónico, octubre, 1980.
- "Progress in photovoltaics". P. E. Glaser, Arthur D. Little, may, 1980/L 800502.

## BIBLIOGRAFÍA SOBRE ENERGÍA FOTOVOLTAICA DISPONIBLE EN EL CDTI

- "Photovoltaic Systems Program Summary". U.S. Department of Energy, Washington, D.C. December 1978.
- "Photovoltaic Incentives Options". Preliminary Report. August 1978. DOE.
- "Photovoltaic Power Systems. Market Identification and Analysis". Final Report. January 1977-February 1978. U.S. Department of Energy.
- "Export Potential for Photovoltaic Systems". Preliminary Report U.S. Department of Energy. April 1979.
- "Measuring Dirt on Photovoltaic Modules". Massachusetts Institute of Technology. March 1979.
- "Semiconductor Grade, Solar Silicon Purification Project" Motorola Inc. Semiconductor Group. February 1976-January 1979.
- "Automated Array Assembly, Phase II". Interim Report DOE. January 1979.
- "Systems tests and application photovoltaic program". U.S. Department of Energy. May, 1979.
- "Photovoltaic Program". (DOE/ET-0019/1. Enero, 78).
- "Análisis prospectivo del mercado español de equipos fotovoltaicos para la producción de energía eléctrica". Seminario sobre el futuro de la Industria Fotovoltaica. Junio, 1979.
- Últimas noticias sobre Conversión Fotovoltaica aparecidas en el Solar Energy Intelligence Report. Abril, 1980.
- Informe sobre las reuniones "14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference" y "Photovoltaic Materials and Device Measurements" celebradas en San Diego, California (USA). Enero, 1980.
- "Informe-Análisis de los Sistemas de Conversión Fotovoltaica, con referencia a las posibilidades de actuación en España". Febrero, 1980.
- Listado de referencias con "abstract" obtenidas por consulta a la Base de Datos EIXF (1977 a 1979).
- "Solar Cells". IEEE Press, 1976.
- "Photovoltaic Solar Energy Conversion". UK Section of the International Solar Energy Society, 1979.
- "Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields". Boeing Engineering and Construction Company Seattle, Washington septiembre, 1979.
- "Photovoltaic Solar Energy Conference". D. Reidel Publishing Company, Abril, 1979.
- "Criteria for an Ideal Solar Photovoltaic Powered Industry". U.S. Department of Commerce. Febrero, 1979.
- Informe al CDTI "1980 PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE". Celebrada en Cannes (Francia). Octubre-noviembre, 1980.

## AGRADECIMIENTO

Han elaborado el presente documento:

Pedro Pezuela  
Fernando Rueda

Han colaborado con sus críticas y sugerencias como expertos:

Francisco Arjona  
T. J. Coutts  
Francisco Jaque  
Antonio Muñoz Torralbo  
Tomás Rodríguez  
Carlos Sánchez

A todos ellos, el agradecimiento del CDTI.

CDTI

Centro para el  
Desarrollo Tecnológico  
Industrial

Ministerio  
de Industria y Energía

Edificio Gan  
Ramirez de Arellano s/n  
Madrid 27  
España

Apto. de Correos: 29136  
Teléf: (91) 416 2016  
Telex: 23121 CDTI E