

Posibilidades técnico-económicas para el aprovechamiento de energía solar

RAUL ALCARAZ*

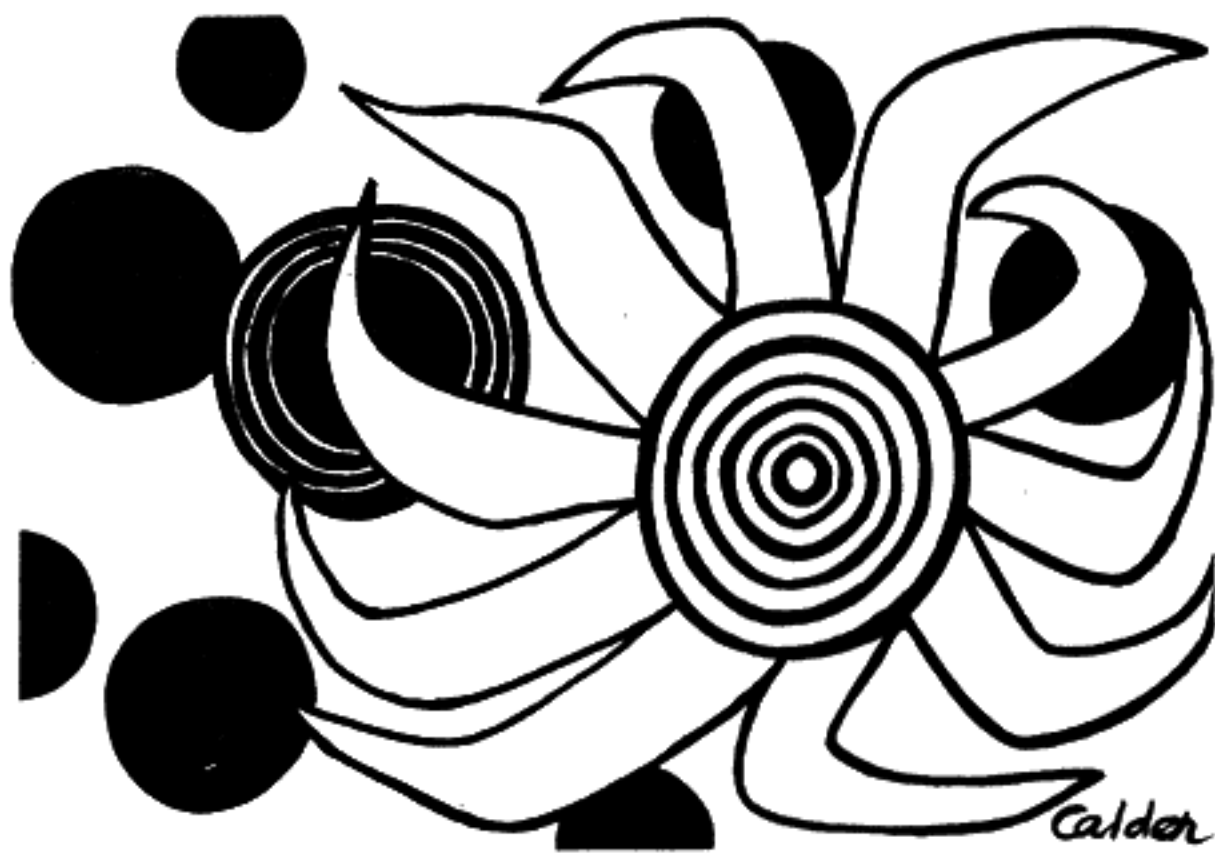
1. INTRODUCCION

La tierra y su atmósfera son bañadas permanentemente por una radiación solar de 173 millones gigawatts, equivalentes a 173 millones de centrales eléctricas como la de Infiernillo. Esa enorme energía es igual a 50 mil veces la energía eléctrica que la tierra consumirá en el año 2025 de seguir la evolución del consumo de los últimos años.

En los Estados Unidos, el país que más energía consume en el mundo, bastaría cubrir 1% de su territorio con celdas solares para satisfacer su consumo energético para el año 2000. Nuestro país recibe mucha más energía solar por metro cuadrado que los E.U.A. y, cubriendo con celdas solares un milésimo del territorio, podríamos satisfacer las necesidades previstas para el año 2000.

La manera más práctica y promisoría para captar la energía solar, y la que ha demostrado ampliamente su factibilidad y confiabilidad, es la transformación directa de la luz solar a energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas llamadas comúnmente celdas solares.

* *Profesor de la Facultad de Ciencias, UNAM*



El sol es indiscutiblemente nuestra fuente primaria de energía.

Dichos dispositivos, cuyo desarrollo fue acelerado por los programas espaciales, han disminuido su costo en 100 veces en los últimos 20 años y así, en los 7 años próximos pasados, su producción ha aumentado 100 veces, pasando de 100 KW en 1974 a 10 MW en 1981, duplicándose cada año su producción en los E.U.A.

Actualmente, la generación eléctrica

con celdas solares es más económica en el caso de estaciones repetidoras, radiofaros, bombas de agua aisladas, casas habitación aisladas y pequeñas poblaciones, que por los medios tradicionales.

Los planes de desarrollo de países como Japón, Francia o los E.U.A. consideran que las celdas solares serán competitivas

para la producción masiva de electricidad entre 1985 y 1987.

En este documento se analizarán primordialmente las celdas solares construidas en base a silicio y sulfuro de cadmio por ser las más prometedoras, tanto por el desarrollo que han tenido como por la disponibilidad de materias primas.

La cantidad de silicio necesaria para construir con la tecnología usual las celdas solares suficientes que produzcan la totalidad de la energía eléctrica demandada que, según cálculos a priori, será para el año 2000 entre 20 y 30×10^{12} KW-h¹, es de aproximadamente 70 millones de toneladas,² lo que representa menos de 2 meses de la producción mundial, hay que recordar que el silicio es el segundo elemento más abundante sobre la corteza terrestre (después del oxígeno), pues representa el 27% de ésta. Si se utilizara la última tecnología disponible (silicio amorfo) se necesitarían 5 millones de toneladas.

En el caso de sulfuro de cadmio, se necesitarían 80 millones de toneladas de cadmio o sea unos cuantos días de la producción mundial, y 20 millones en azufre, cifra despreciable en relación a los recursos existentes y, en cobre, 4 millones de toneladas, menos de un año de producción.

II. DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA SOLAR

A mediados del siglo pasado Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, fenómeno que produce la luz al incidir sobre un semiconductor compuesto de una capa rica en cargas negativas y una rica en cargas positivas, haciendo que al producirse una diferencia de voltaje entre las dos capas, los electrones (cargas negativas) producidos por la absorción de la energía solar, puedan circular y producir trabajo.

Desde su descubrimiento en 1839 hasta 1954, las celdas solares presentaban rendimientos sumamente bajos (del orden de 1 milésimo) y costos elevados en relación a la potencia producida.

En 1954 fue descubierto el efecto fotovoltaico en dos materiales: el sulfuro de cadmio y el silicio. La utilización de estos materiales hizo posible un aumento de cien veces en el rendimiento de conversión, llegando en ese entonces a un 4% en el sulfuro de cadmio y a más del 10% en el silicio.



Dan McCoy

La crisis energética de los años sesenta propició el desarrollo industrial de fuentes alternativas. En esta década la Exxon, una de las 7 hermanas, se ha dedicado a la fabricación de celdas solares.

A partir de 1957, los programas espaciales impulsaron fuertemente el desarrollo de ambos tipos de celdas, aumentando su rendimiento y abatiendo su costo año con año, aunque no con la velocidad suficiente para que se pudiera contemplar su producción masiva para competir con las fuentes tradicionales de energía.

Las celdas de sulfuro de cadmio (producidas por la evaporación, al alto vacío, de sus materiales constitutivos sobre soportes de vidrio, metal o plástico, y por lo tanto potencialmente reproducibles a bajo precio con sistemas automáticos), presentaban serios problemas de degradación los cuales las inutilizaban en menos de un año.

Las celdas de silicio, cuya duración sobrepasa fácilmente a los 20 años, son reproducibles sin problema y tienen altos rendimientos (13-16%). Estas son construidas a partir de barras sintéticas de silicio monocristalino.

La barra monocristalina de un diámetro de 2 cm hace 10 años y de hasta 12 en la actualidad logra aumentarse poco a

poco sobre un crisol con silicio fundido, a razón de 10 cm por hora, obteniéndose hoy en día barras monocristalinas de hasta 1 m de largo.

De esta barra monocristalina se recortan tajadas circulares de medio milímetro de espesor y sobre una de las caras se forma una capa de características eléctricas adecuadas (exceso o falta de electrones) para que al incidir la luz se produzca un voltaje de operación. Del lado que incide la luz se coloca una reja que forma uno de los electrodos y el otro electrodo se coloca en la otra cara.

En celdas de uso espacial los electrodos son generalmente de oro, recortándose además las celdas en rectángulos para ocupar la menor área posible y disminuir el peso.

En las celdas de uso terrestre, éstas son circulares y los electrodos son, por lo general, de estaño o aluminio.

Esa es, a grandes rasgos, la técnica que desde casi 1954 se ha seguido para fabricar celdas solares, y en la cual —a pesar de haberse refinado grandemente— es difícil disminuir el precio radicalmente.

Dicha tecnología es intensiva en material y mano de obra. En material debido a que durante el corte de las celdas el desperdicio es significativo (de 50 a 75%), empleando además un material proveniente de la industria electrónica, con un precio de 80 dólares el kg y de pureza excesiva para la manufactura de celdas solares.³

A pesar de eso el precio del Watt ha disminuido de 1000 dólares en 1960 a 7.5 en 1982; diversos estudios demuestran que al utilizar esta técnica convencional, refinando procesos y automatizando otros, se puede llegar a un precio de 5 dólares por Watt.⁴ Pero que ése sería el límite inferior de la tecnología ortodoxa.

Debido a lo anterior siempre se pensó que una manera de abatir costos y aumentar las cantidades productivas era la de fabricar de manera continua silicio monocristalino en forma de listones, para evitar pérdidas de material y poder automatizar los procesos.

Desde 1958, en Holanda, se estudiaron diversos métodos. Pero fue en los E.U.A. que se logró en 1971 producir listones monocristalinos de silicio por los investigadores La Belle y Mlavsky.⁵

El listón se forma sumergiendo un bloque de grafito de silicio fundido, el cual sube por capilaridad por una ranura de algunas centésimas de mm de espesor y unos cm de ancho, formándose a la salida el listón, a una velocidad de unos 3 cm por minuto (en lugar de 10 cm por hora con el proceso tradicional de barras). El proceso permite además eliminar, casi totalmente, las pérdidas de material. La importancia principal de dicho salto tecnológico radica quizá en que se obtuvo tras una larga espera, durante la cual no se había logrado desarrollar ningún proceso tecnológico que permitiera pensar en la producción económica de energía eléctrica por celdas solares.

Después de tal avance, el desarrollo se ha acelerado lográndose obtener listones por diversos métodos⁶ y asimismo perfeccionar constantemente el proceso. Ello ha provocado que, a pesar de que se podrían comercializar celdas solares hechas a partir de los listones actuales a precios menores —a unos dos dólares el Watt—, no se inicie la producción industrial por la rapidez con la que aumenta el rendimiento de conversión y se reduce el costo de producción. Sin embargo, en Japón se ha formado una compañía con el nombre de Japan Solar Power que en 1978 empezó a producir listones para evaluación, por empresas productoras de celdas.



Para los pueblos de la antigüedad la vida estaba modulada por los movimientos del astro mayor.

La compañía es propiedad de la *Kyoto Ceramic Co.*, *Sharp Electric Co.*, *Matsushita Electric Industrial Co.*, la *Mobil Oil Corp.* y *Tyco Laboratories* de los EE.UU.

A pesar de los serios problemas que las celdas de sulfuro de cadmio presentaban, la potencialidad de su fabricación con sistemas automáticos a costos muy bajos, hizo que el esfuerzo por desarrollarlas continuara, lográndose entonces encontrar sistemas que evitan la degradación. Este problema fue resuelto en Francia por la *Société Anonyme de Telecommunications (SAT)* y tal parece que ha sido resuelto también en los EE.UU. por la *Universidad de Delaware* y por la empresa **BOEING**.

Otros avances tecnológicos que permitirán obtener celdas a un precio de venta inferior a los 70¢ de dólar el Watt, o sea el mismo que una planta convencional de petróleo son:

- La obtención por deposición de películas delgadas de silicio amorfo con eficiencia de conversión superiores al 8%.
- La utilización de silicio grado metalúrgico con postpurificación, lo que permite el empleo de una materia prima 10 veces más barata que la usual de grado electrónico.⁸
- La obtención del tratamiento para conferir las características eléctricas de las capas semiconductoras de silicio

amorfo, directamente durante la deposición (proceso que se suponía imposible), logrado por un grupo de investigadores de la *Universidad de Dundee* bajo la dirección de *W. Spear* y *P.Q. Le Comber*.⁹

- La puesta a punto de concentrados bi-parabólicos, o de espiral logarítmica que permitirán bajar el precio del conjunto en un factor de 3 como mínimo y de 8 como máximo.
- La obtención, primero en Inglaterra y posteriormente en los EE.UU., de celdas a base de Arseniuro de Galio con rendimientos hasta de 23%, capaces de resistir concentraciones de luz del orden de 2000 veces la incidencia solar, lo cual permite reducir en unas 1000 veces el costo por Watt de dichas celdas (500 dólares) o sea a 50 ¢/W. Esto ya es dentro de las metas que el ERDA tenía para 1979, y se ha logrado con 2 años de anticipación.
- La obtención de celdas de sulfuro de cadmio con una eficiencia del 10%, y de un espesor de sólo 25 micras.
- La obtención de un rendimiento de 28.5% utilizando dos tipos de celdas simultáneamente.
- La obtención de listones de silicio que permiten producir celdas económicas y de rendimiento hasta 15%.
- La obtención de celdas policristalinas hechas a partir de silicio grado metalúrgico con rendimiento del 12%.

III. PROGRAMAS DE INVESTIGACION DE PAISES DESARROLLADOS

URSS

Se sabe que en la Unión Soviética existe un gran programa de investigación y que se han logrado avances tecnológicos importantes; empero no se conocen en detalle las metas propuestas. No hay que olvidar que fueron ellos los que empezaron a trabajar en silicio amorfo desde 1959 y son poseedores de algunos de los mejores especialistas. Se sabe que se tiene en construcción una ciudad entera alimentada por energía solar.

ESTADOS UNIDOS

a) Gobierno

La investigación se ha seguido impulsando, después del enorme desarrollo logrado con el programa espacial. No obstante, tal impulso se redujo desde finales de los años 60 hasta 1972, porque la crisis energética, así como los problemas de contaminación térmica y seguridad que provocaría la proliferación de reactores nucleares, hizo que la política energética fuera modificada sustancialmente en favor de fuentes menos contaminantes y seguras, en especial la energía solar.

A principios de 1973 la NSF (National Science Foundation) estableció un programa de metas a alcanzar. Este programa se proponía lo siguiente:

1975 Recolección de datos de incidencia solar en los EE.UU.

1976 Prueba de desempeño de paneles solares en los EE.UU. Determinación de los precios.

1977 Diseño de sistema de baja potencia. La tecnología para producir celdas a 5 dólares el Watt se ha alcanzado.

1979 Instalación de sistemas de baja potencia. Se demuestra la tecnología para producir celdas a 0.5 dólares/Watt.

1981 Se establece una fábrica piloto para producir paneles utilizando celdas de 0.5/Watt.

1982 Se producen paneles solares hasta 10 KW para casas y hasta 1 MW para escuelas, pequeñas industrias.

1985 Producción de plantas medianas (10 MW) para pequeñas comunidades e industrias grandes.

1986 Se termina una fábrica para producir paneles solares a 30 ¢ de dólar el Watt.

1990 Se empieza la producción en masa de celdas solares para plantas de



Tomado de The Atlas of Scientific Discovery

Las celdas solares han tenido una primera aplicación en las estructuras de los satélites artificiales.

100 MW y alimentación de grandes ciudades.

Estas estimaciones son a precios de 1973, lo que ha provocado que en la actualidad la meta para 1986 sea de 50 ¢ el Watt.

Por otro lado el DOE (Department of Energy) ha fomentado fuertemente la investigación. En 1974 se destinaron a las celdas solares un millón de dólares, 8 millones en 1975, 29.6 millones en 1976 y 312 millones de dólares en 1978. Estos fondos sólo representan los que el gobierno está invirtiendo y no incluye el caudal que está invirtiendo la empresa privada.

El programa del DOE se propone además multiplicar anualmente la producción de celdas por un factor de 2.7 a 3, para pasar a 100 kW producidos en 1974, de 500 000 a 1 000 000 de kW (500-1000 MW) en 1985. Los EE. UU. según el Plan deberían cubrir en el año 2000 el 26% de sus necesidades energéticas con energía solar.

El Plan Gubernamental de Producción de Celdas hasta el año 2000 sería:

1981	1 MW
1983	10 MW
1985	1 000 MW
1990	5 000 MW
1995	10 000 MW
2000	20 000 a 50 000 MW

Habiendo acumulado 100 000 MW en el año 2000.

El DOE ha dedicado parte de su presupuesto a la compra de paneles solares para prueba, y para fomentar la producción.

b) Empresas

Los norteamericanos fueron los primeros en comercializar las celdas solares. Al principio sólo participaron en la producción para uso terrestre pequeñas empresas como Solarex, Senson Technology, etc., investigando el abaratamiento que se podría lograr mejorando los sistemas convencionales.

En 1971 fue un laboratorio privado, la Tyco Laboratories que, adaptando un sistema desarrollado para producir listones y tubos monocristalinos de rubí, zafiro y otros óxidos de aluminio, logró producir los primeros listones de silicio monocristalino.

Desde fines de los años 60, las grandes compañías petroleras y de teléfonos habían estado adquiriendo celdas solares para alimentación confiable y sin mantenimiento de sus plataformas de perforación en el Golfo de México y de sus estaciones repetidoras. El mercado llegó a ser lo suficientemente importante y la potencialidad tan grande que tanto la Exxon como la Mobil Oil y la Shell decidieron establecer laboratorios de investigación en energía solar.

La Exxon fundó una compañía productora de celdas de silicio (Solar Power Corp.), la Mobil Oil adquirió los laboratorios Tyco (los inventores del listón de silicio), y ha continuado en dichos laboratorios el desarrollo de los listones, invirtiendo 30 millones de dólares.

La compañía Shell Oil ha promovido el desarrollo de celdas de sulfuro de cadmio, patrocinando a la Universidad de Delaware.

En relación al silicio amorfo, la SOHIO ha dado a la ECD 84 millones de dólares para una planta productora de celdas de silicio amorfo, que produciría unos 20 MW de celdas al año. Esta puede ser la primera vez que se produzcan celdas de este tipo en cantidad realmente comercial.

Recientemente el interés de los grandes productores de componentes electrónicos como Texas Instruments, I.B.M., Westinghouse, Dow, Union Carbide, Honeywell, ha aumentado al punto de que todos ellos ya tienen programas de desarrollo, en especial de diferentes métodos de producción continua de listones de silicio y métodos para automatizar la producción de celdas solares.

Dow Corning y Westinghouse trabajan activamente con un contrato del DOE para desarrollar métodos de producción tendientes a disminuir el precio del silicio utilizando como materia prima, de los 60 dólares el Kg actuales a 10, basados en la utilización de hornos de arco. Texas Instruments, Union Carbide y Battelle Columbus Laboratories investigan otros procesos.⁷

Una de las maneras más rápidas de disminuir el costo de las celdas en el desarrollo de rejillas de contacto más baratas. La Solar Technology International de Chatsworth Cal., ha desarrollado un sistema que permite hacerlo y desde enero de 1976 produce celdas solares con este proceso. El método de producción tiene un costo directo de mano de obra (en cuanto a la rejilla se refiere) de 35¢ de dólar por Watt, lo que permite disminuir el costo de celdas en 30%.

Empero la Sanyo, con ayuda de la Universidad de Osaka Japón, ha logrado producir celdas solares de silicio amorfo sin rejilla.

La Mobil Tyco, dueña del sistema de elaboración de listones más avanzado, ha formado, junto con algunas Compañías Japonesas, una empresa que comenzará a producir listones para su evaluación por empresas productoras, puesto que actualmente ya es posible construir celdas con características semejantes a las construidas por métodos ortodoxos.

JAPON

A pesar de haber comenzado la investigación sobre celdas solares mucho más tarde que países como la URSS, EE.UU., Francia e Inglaterra, los japoneses, tanto por programas gubernamentales como privados, han acelerado sus investigaciones hasta el grado de igualar a los países de Europa Occidental.

Japón estableció en 1973 un ambicioso programa para el desarrollo de fuentes de energía limpias, llamado "Sol Brillante". Destinará a este programa la enorme cantidad de un billón de yens (unos 4 mil millones de dólares) que serán gastados entre ese año y el año 2000.

El programa es considerado en Japón tan importante para la nación como lo pudo ser el espacial para los EE.UU.⁶ Contempla la fabricación de plantas de 10 MW en 1986 y de 100 MW en 1991, considerando que no necesitarán mayores por la presencia de sol en todo el territorio, lo que permitirá alimentar localmente las grandes industrias con sistemas mínimos de distribución.

Empresas japonesas

El esfuerzo actual para la investigación de celdas solares en las empresas japonesas es sumamente importante, aunque algunos programas se encuentran apoyados por fondos gubernamentales.

La Tokyo Shibaura Electric Co. está desarrollando la fabricación de listones monocristalinos de silicio por jalado vertical, y la Toyo Silicon Co. hace lo mismo por jalado horizontal.

Por otra parte, la Nippon Electric Co. y Hitachi Ltd trabajan un sistema equivalente al listón, que consiste en formar películas de silicio depositándolo iónicamente sobre sustratos de alúmina.

Matsushita estudia la fabricación de celdas de sulfuro de cadmio y la Sharp está enfocada junto con la Kyoto Ceramic Co. y Matsushita a la fabricación de listones de silicio con licencia y participación de la Mobil Tyco de los EE.UU. Sin embargo, es en silicio amorfo que el Japón ha avanzado más rápidamente, y tanto Sanyo como Fuji producen celdas solares de silicio amorfo en serie, aplica-

das a diversos usos comerciales.

FRANCIA

Este país es el que ha invertido más esfuerzos en el desarrollo de la energía solar en Europa. Al principio, y desde los años 50, Francia propició una gran expansión principalmente de las aplicaciones térmicas de la energía solar. Es famoso el horno de Odeillo en los Pirineos, con el cual alcanzan temperaturas hasta 3 500 °C, y en este año ya está instalada una planta térmica de energía solar de 3 mega-watts.

A partir de 1970 el impulso se ha dirigido cada vez más al desarrollo de celdas solares, principalmente de sulfuro de cadmio, para el equipamiento de satélites de comunicación.

Recientemente se ha impulsado también el desarrollo de las celdas de silicio avanzadas, en especial la obtención de películas amorfas o listones continuos.

La agencia que se dedica a impulsar en Francia la investigación solar es el "Commissariat de l'Energie Solaire", el cual dedica poco más de 115 millones de dólares al año, para el desenvolvimiento de la energía solar.

La Radiotechnique Compelec —probablemente la segunda o tercera productora mundial de celdas solares (165 kW de celdas de silicio al año)— es una subsidiaria de ELF y de Philips; la cual, tanto en sus laboratorios matrices en Holanda como en sus subsidiarias francesas y alemanas, principalmente ha dedicado sus esfuerzos al silicio. Aunque estas empresas ya han comercializado las celdas convencionales a precios similares a los americanos, su principal esfuerzo consiste en la obtención de listones o películas anchas de silicio, así como investigar la producción de otras celdas.

La energía que consume el metro es suficiente para producir alimentos para 500 000 habitantes.

Paul Wyatt



Otros laboratorios franceses que trabajan en la misma meta son los Laboratoires d'Electronique et de la Physique Appliquée (LEP). La SAT labora, como ya se dijo en el capítulo anterior, en el perfeccionamiento de las celdas de sulfuro de cadmio. Francia tiene planeado cubrir para el año 2000, a partir del sol, del 3 al 5% de sus necesidades totales de energía.

INGLATERRA

Los laboratorios de investigación ingleses han logrado importantes avances. Fueron los primeros en obtener las celdas de arseniuro de Galio, capaces de resistir concentraciones de luz equivalentes a dos mil soles. A pesar de que dichas celdas cuestan alrededor de 500 dólares Watt sin el empleo de concentración solar, al concentrar 2 000 veces es posible pasar a precios cercanos o inferiores a los 50 e de dólar el Watt.

Ferranti, la empresa inglesa que fabrica celdas de silicio comercial, actualmente trabaja en poner en marcha sistemas capaces de producir listones monocristalinos de silicio.

ALEMANIA

El gobierno alemán dedica hoy en día 8 millones de dólares anuales para el crecimiento tecnológico de las celdas solares, a través de las grandes empresas electrónicas como Siemens y AEG-Telefunken.

La Wacker Chemitronic ha construido celdas policristalinas de silicio con un costo potencial sumamente bajo. El proceso fue adquirido por AEG-Telefunken, que había perfeccionado el sistema de producción para lanzarlo comercialmente en 1979.

También Leybold, en Alemania, ha impulsado la obtención de silicio barato y sistemas para la producción en masa de celdas de sulfuro de cadmio.

IV. APROVECHAMIENTO ACTUAL DE LA TECNOLOGIA SOLAR

1. Producción

La producción principal de celdas solares es a base de silicio, a partir de rebanadas obtenidas de barras monocristalinas de dicho material.

Las celdas de silicio comerciales tienen un rendimiento promedio de conversión de energía solar a energía eléctrica del 14% (hace 2 años era del 11%) y a su costo por Watt ha bajado de 20 a 10 dólares en los últimos dos años.

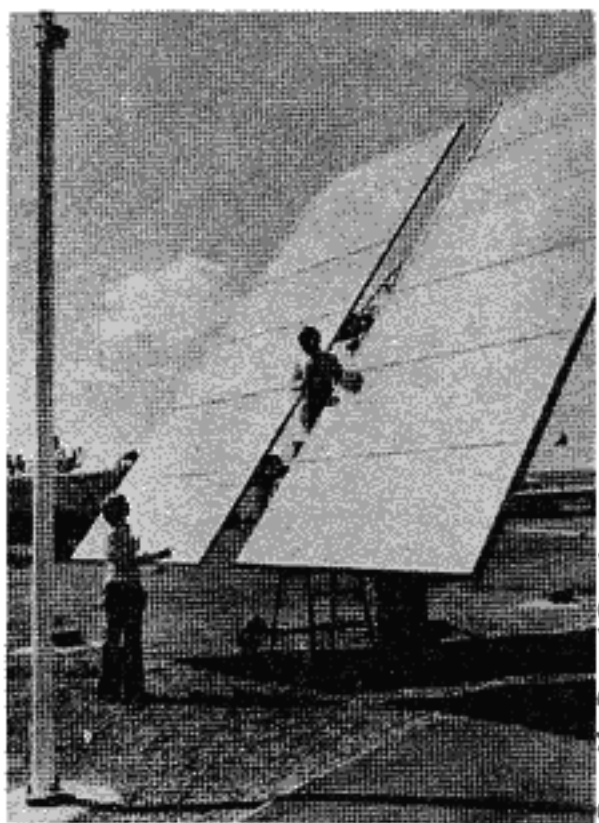


Foto: MacDonnel Douglas

Continuamente se perfeccionan los materiales usados para la captación de luz solar, y que éstos sean a bajos costos.

Es difícil saber el volumen actual de producción en el mundo. Tal parece que, fuera de los países socialistas, la producción es de unos 10 000 kW (la ARCO de los EE.UU. produjo en 1981 más de 2 000 kW duplicándose su producción anualmente).

Hasta fines de 1976 no se fabricaban comercialmente celdas de sulfuro de cadmio para usos terrestres, aunque la SAT francesa las hace en serie para usos espaciales. Sin embargo, tal parece que la Shell Oil Co. Boeing de los EE.UU. ya ha iniciado la producción en serie de dichas celdas.

En los EE.UU. existen aproximadamente 15 compañías con producción comercial de celdas solares sin contar las que iniciarán sus operaciones este año, entre las más importantes podemos citar:

- Solar Technology International, Solar Power Corp. (Exxon), Solarex Corp., Spectrolab Inc., Sensor Technology Inc., M7 International, Motorola, ARCO, E.C.P.

En el resto del mundo las principales compañías productoras de celdas solares son:

- La Radiotechnique Compélec (subsidiaria de ELF y de Holanda) Ferranti, en Inglaterra y Sharp Nippon Electric, Sanyo y Fuji en Japón, Ansaldo, Agip, ACE en Italia. AEG Telefunken en Alemania la cual hace celdas de silicio policristalino.

2. Costos de producción y venta

Generalmente cuando se comparan los proyectos de costos de la energía solar con los de las fuentes convencionales, no

se toma en consideración el enorme egreso por mantenimiento y la inversión que representan las líneas y subestaciones de distribución de las plantas generadoras de electricidad al sitio de consumo.

Estos costos son muy elevados; por cada kW instalado para generación, hay que instalar a su vez 4 a 5 kW en transformadores para su transmisión y distribución a los distintos usos.

Otro costo que se olvida en estos cálculos es el de las tierras utilizadas por el paso de las líneas de transmisión, las cuales representan en general franjas de tierra de 50 m de ancho por cientos y a veces miles de km de largo. Además, tales franjas representan, en las zonas montañosas, focos de erosión acelerada.

Cabe señalar que para 1977 la C.F.E. invirtió 10 186 millones de pesos para el aumento de potencia y 7 782 millones de pesos en sub-estaciones, ampliación de redes, electrificación rural y mantenimiento. La distribución representa por lo tanto un 77% adicional a la inversión de generación.

Lo anterior nos lleva a considerar que las celdas solares necesitarían sistemas mínimos de distribución en unos casos, y la casi ausencia de ellos en otros (puesto que generarán la electricidad *in situ*) pueden competir ventajosamente con las plantas convencionales, aún gravando varias veces más, y conforme se abarata su costo podrán aplicarse en usos masivos, probablemente antes de 1988.

Un programa para el empleo de celdas solares en nuestro país, debe comenzar por cubrir aquellos casos del uso de celdas solares que son ya, en el presente, más económicas, en lugar de hacer llegar las líneas de transmisión hasta el sitio de consumo.

La utilización de las celdas solares ya es rentable en México: en los 83 000 poblados menores de 500 habitantes; los miles de cruceros de ferrocarril sin señalización; los miles de bombas de agua y pozos aislados; las centenas de radiobalizadas, estaciones repetidoras, plataformas de perforación petrolera, cargadores de baterías en barcos pesqueros, campamentos, control de corrosión en gasoductos y oleoductos, etc.

Estas aplicaciones en nuestro país permitirían desde ahora un ahorro sustancial en divisas y combustibles, pues representan en relación al consumo un requerimiento mayor de inversión, y debido a las enormes pérdidas en transmisión de electricidad o transporte de combustibles,

se traduce en un consumo injustificado de energéticos.

V. PRONOSTICO TECNOLÓGICO

a) Implicaciones técnicas y de costo para utilizar la tecnología ya disponible.

Aparte de la tecnología ortodoxa para la fabricación de celdas solares existen otras nuevas que empiezan a comercializarse y consisten, fundamentalmente, en lo siguiente:

Celdas de silicio a partir de listón monocristalino.

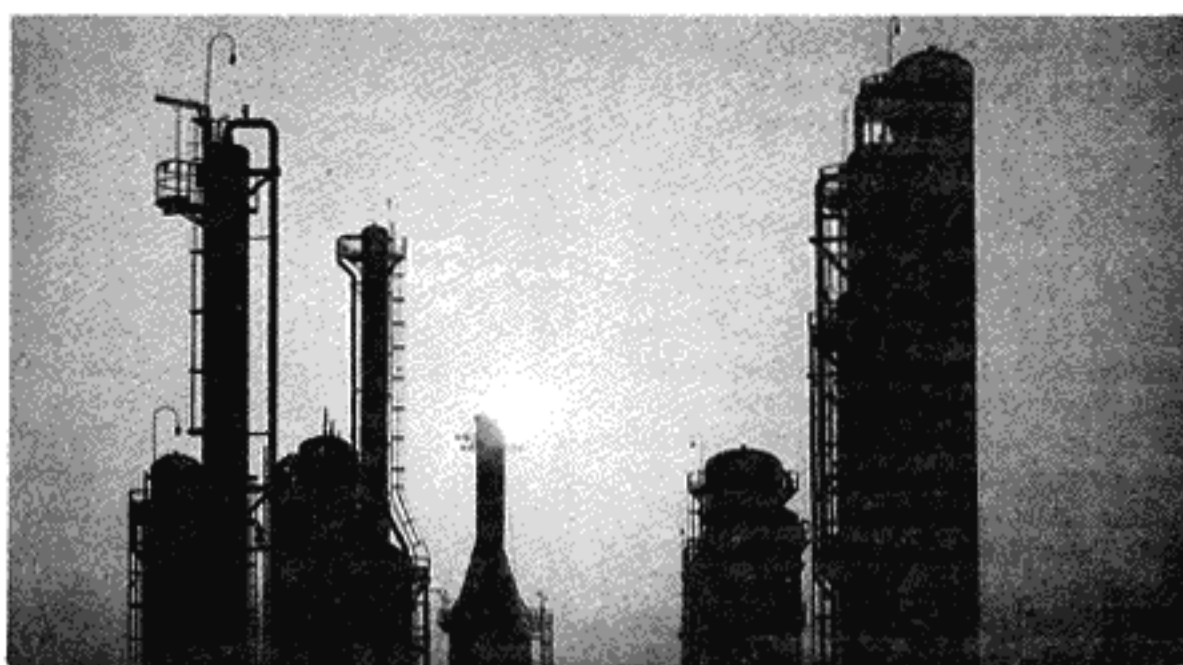
La evolución técnica para producir este listón ha avanzado a grandes pasos, con inusitada rapidez, tanto en la manera de obtenerlo como en la calidad de las celdas. Se ha pasado de un rendimiento del 4% al 15%, contra 16% de las celdas convencionales. Por informaciones existentes tal parece que dicha tecnología se encuentra en la etapa final de su desenvolvimiento. Los responsables de la Mobil Oil Tyco han comercializado las celdas hechas a partir de listón en 1980 (el plan original de la ERDA era para 1981), sin embargo, comenzaron a construirlo en Japón desde 1977 para su evaluación por los fabricantes de celdas.

Es evidente que ante la rapidez del cambio tecnológico que está ocurriendo las empresas no desean hacer las inversiones necesarias para fabricar a gran escala celdas solares, pues las plantas serían obsoletas en sólo unos 3 o 4 años; por ello los productores de celdas, con objeto de bajar los precios y aumentar la capacidad, sólo han introducido aquellos cambios tecnológicos que requieren poca inversión. No obstante, casi todos ellos disponen de pequeñas instalaciones piloto donde se someten a prueba los procesos para la fabricación en masa.

En cuanto al análisis de costos del proceso para producción del listón que se ha estudiado más: el de la Mobil Oil Tyco, los cálculos muestran que con la tecnología disponible, la suma de mano de obra directa, materiales y administración (sin incluir los costos de desarrollo tecnológico, amortización e intereses y ganancias) resulta ser de 18.72 € el Watt.¹¹

Considerando todos los costos más los de venta y las ganancias, se llega a un precio de venta algo menor de 50 € de dólar en Watt, ello es 500 dólares el kW.¹¹

Por tanto, la tecnología inventada por la Mobil Oil Tyco respecto al crecimiento



Tomado de Promoción Industrial 1984

El 90% de la energía consumida en México se obtiene de un recurso no renovable: el petróleo.

de listones, aparece como eminentemente apta de ser desarrollada para producir celdas capaces de competir con los sistemas de producción normales.

b) Desarrollos técnicos a corto, mediano y largo plazo

Tal parece que a corto plazo los principales avances se concentrarán en las celdas producidas por métodos convencionales, automatizando algunos pasos y tratando de aumentar el rendimiento hasta un 17 o 18% en las celdas de silicio; ya se han comercializado celdas de silicio policristalino, varios años antes de lo esperado.

La comercialización de las celdas de silicio amorfo para usos terrestres generada por los japoneses ha cambiado profundamente el panorama como se muestra en los siguientes párrafos.

Lo que ha complicado aún más la situación para los constructores de celdas convencionales y a los desarrollos basados en el silicio monocristalino o policristalino, ha sido la entrada en escena del silicio amorfo.

Los semiconductores amorfos empezaron a estudiarse en la URSS, por Kolomietz, y posteriormente en Europa y EE.UU. En Escocia el grupo Spear logró en 1975 envenenar el material. Desde entonces el avance ha sido espectacular y los grupos soviéticos, japoneses (Hamakawa) y norteamericanos (Ovshinsky) han avanzado tan rápidamente que se ha llegado a la comercialización y el diseño de plantas capaces de producir celdas solares en forma semi-masiva. En 1984 acontece el arranque de plantas capaces de producir entre 10 y 20 MW y si el movimiento en silicio amorfo sigue con el impulso actual, bien puede constituirse como el material idóneo a desarrollar masivamente.

Las ventajas son obvias; un espesor de sólo un micrómetro, posibilidad de producción continua con conexiones integrales eliminando las interconexiones hechas por los obreros o autómatas, empleo de materiales más baratos y en cantidades muy pequeñas, bajo consumo energético durante la fabricación... y la presencia en la tecnología de gigantes como Sanyo, Fuji, Sohio, desligados del negocio nuclear y en especial los japoneses con amplia experiencia en incluir nuevas tecnologías a la producción masiva. Se espera que para 1986 los precios de las celdas de silicio amorfo sean de 60 centavos de dólar el Watt.

La empresa Varian de los EE.UU., está tratando de obtener paneles económicos con precio por Watt de 0.5 y 1 dólares, concentrando la luz solar sobre celdas de arseniuro de galio². Empero, estos sistemas de alta concentración (2,000 soles) tienen la desventaja de necesitar cielos despejados para operar eficientemente, y además, deben seguir la trayectoria solar.

A mediano plazo el énfasis está dado en la obtención de silicio barato, es decir, disminuir el precio por kg de 80 dólares a 10. Esto se logrará principalmente utilizando silicio "grado celda solar" mucho menos puro que el que se usa en la actualidad y es empleado por la industria electrónica.

Otra meta de mediano plazo es la obtención de listones por métodos similares al de la Mobil Tyco, pero se encuentran en la fase experimental de laboratorio.

En relación al listón producido por el sistema Tyco, las metas a mediano plazo son: aumentar la velocidad de formación de listón, disminuir el espesor, aumentar el ancho de los listones producidos y (algo que tendría mucho im-

pacto en el costo) aumentar el rendimiento de las celdas hasta alcanzar el de las celdas convencionales.

Debe recordarse que la meta del DOE a mediano plazo (1986) es llegar a un precio de venta de 70 ¢ de dólar el Watt.

Metas a largo plazo.

A largo plazo, puesto que se espera llegar a un precio por Watt de 20 ¢ de dólar, o menos, el esfuerzo se centrará sobre celdas de película delgada, principalmente de Teluro de Cadmio-Sulfuro de Cadmio, de Sulfuro de Cadmio, de Silicio policristalino y de silicio amorfo. A dichas celdas se les ha llamado de tercera generación, siendo las de segunda generación las de listón de silicio y las de Sulfuro de Cadmio y constituyendo la primera generación las construidas por el método heredado de los satélites.

El énfasis dado a largo plazo a las celdas de película delgada obedece a la facilidad con que dicho sistema (evaporación de alto vacío de sus capas constructivas) puede automatizarse y producirse así en grandes cantidades.¹²

También se trabaja, en vista a resultados de largo plazo, en la obtención directa de hidrocarburos para fotólisis y en efecto fotogalvánico (carga directa de baterías con luz solar).

Por otra parte, se labora en la automatización completa del proceso de construcción de celdas y obtener así directamente paneles.

Esto último se alcanzará alrededor de 1990, época en que los norteamericanos piensan producir 5,000 MW de celdas solares al año, para llegar en el año 2,000 a 50,000 anuales, y cuando los japoneses comercialicen las celdas de silicio amorfo en forma masiva, también programado para esas fechas.

Mientras tanto el precio sigue bajando en términos de dólares desde 1980 en un 20% al año y la producción continúa duplicándose anualmente, lo que significa construir en el futuro —año en año— tanto como el total existente en los años anteriores.

VI. Realizaciones en México.

Tanto la UNAM como el IPN han trabajado desde hace varios años en la fabricación de celdas solares, especializándose el Instituto de Materiales de la

UNAM en celdas de Sulfuro de Cadmio y en Silicio amorfo, y el Centro de Estudios Avanzados del IPN, en las de Silicio monocristalino.

El Politécnico tiene 18 años de actividades relativas a esta área y ha logrado dominar por completo la tecnología ortodoxa, produciendo celdas de Silicio en pequeñas cantidades a partir de monocristales de Silicio importados.

A partir de 1973, el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM atacó el problema de la elaboración de celdas de Sulfuro de Cadmio, utilizando principalmente el proceso de evaporación en vacío de películas delgadas de dicho semiconductor. En 1974 se obtuvieron las primeras celdas, las cuales mostraron un rendimiento de conversión de 4%. Los problemas de degradación han sido afrontados con éxito y están en vías de solución, creándose un "saber cómo" de fabricación. En 1981 se comenzó el trabajo en silicio amorfo.

En conjunto los grupos científicos del IPN y la UNAM constituyen una infraestructura lista para emprender un programa de fabricación en serie, a pequeña escala, de celdas solares que podrían utilizarse en las aplicaciones *ad hoc* para las cuales estos dispositivos ya son económicos. Este grupo de científicos servirá como masa crítica para absorber las tecnologías extranjeras y desarrollar una gran industria fabricante de celdas solares.

Un programa de fabricación en serie, requeriría el apoyo del Instituto de Física de la UNAM, para dirigir a algunos grupos de físicos adscritos a estado sólido a la especialidad de celdas solares; asimismo, el Instituto y la Facultad de Química para la obtención del sulfuro de cadmio y de silano, fosfina y diborano para investigación y del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica para la elaboración del silicio.

La capacidad técnica disponible permitiría iniciar un programa piloto a corto plazo que empezaría a producir comercialmente, en un par de años y que requeriría una inversión moderada. Las metas a corto plazo ya se han realizado y fueron:

- 1978 Fabricación en vistas a demostración de pequeñas cantidades de fotoceldas con las facilidades actuales.
- 1979 Diseño de una planta y pedido de maquinaria para producir

celdas solares por método ortodoxo.

A largo plazo:

- 1987 Construcción de celdas solares en cantidad superior de 50 MW/año.
- 1990 Fabricación de 1,000 MW al año.
- 1995 Fabricación de 2,000 MW al año.
- 2000 Fabricación de 4,000 MW al año.

Para lo anterior, será necesario una acción conjunta de las instituciones mexicanas antes citadas, y una promoción enérgica en ellas de la investigación en energía solar, en particular sobre la fabricación de celdas solares.

El hacer lo anterior, permitiría desarrollar un grupo de científicos altamente calificados en energía solar, y la posibilidad de asimilar y desenvolver fácilmente las ideas internas y externas, y eventualmente desarrollar una tecnología solar propia, cuando menos si no es la tecnología original, sí en "saber cómo", independientemente de que ensamblamos paneles solares con celdas importadas o establezcamos "joint ventures" con las empresas que, como Solarex y Phillips, ya han manifestado su interés en establecer una fabricación en México. ☺

LITERATURA CITADA

1. *Wireless World*, p. 52, Octubre 1976.
2. R.J. Mytton, *Solar Energy*, Vol. 16, pp. 33-34, 1974.
3. S.N. Rea and G.F. Wakefield, Texas Instruments, *ERDA Photovoltaic Semiannual Convention*, Agosto 3-5, 1976.
4. A.R. Kirkpatrick, Simulation Physics, Inc. *ERDA Photovoltaic Semiannual Convention*, Agosto 3-5, 1976.
5. *Electronics*, pp. 109-110, Abril 4, 1974.
6. *Electronics*, pp. 94-99, Nov. 11, 1976.
7. *Electronics*, p. 92, Nov. 11, 1976.
8. Ting L. Chu, 33-34. *Electronics*, Junio 24, 1976.
9. *Wireless World*, Enero 1977, p. 38.
10. *La Recherche* No. 60, p. 872, Octubre, 1975.
11. K.V. Ravi y A.I. Milavskg, EFG Growth of Silicon Ribbon for Solar Cells. *Third ERDA Semiannual Photovoltaic Convention Review, Meeting*, Agosto 3-5, 1976.