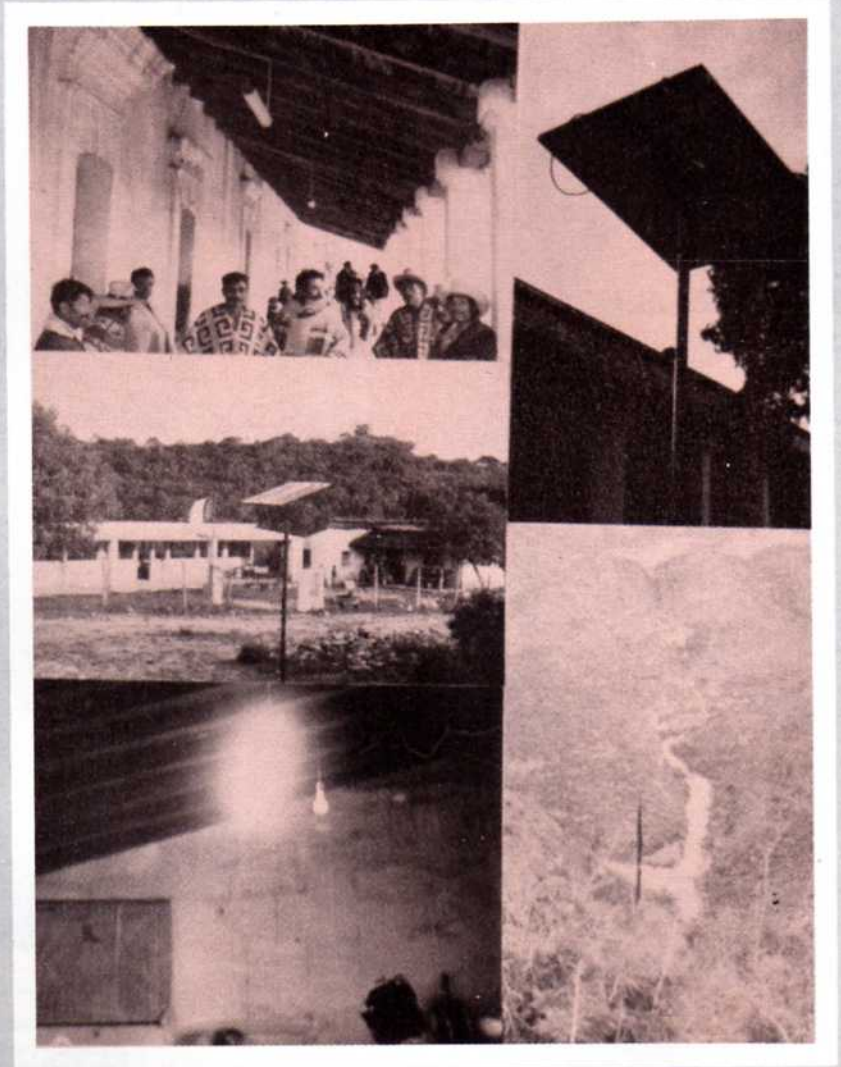
INDICE

LA REVISTA SOLAR

PUBLICACION DE LA ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR (ANES) . NUMERO 16 PRIMAVERA 1989

SECCIÓN MEXICANA DE LA INTERNACIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY (ISES)



ALUMBRADO MUNICIPAL CON **ENERGIA SOLAR** EN LA MIXTECA, OAXACA

EN ESTE NÚMERO:

SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

$ 3000.00

Lo que antes era solo un proyecto...

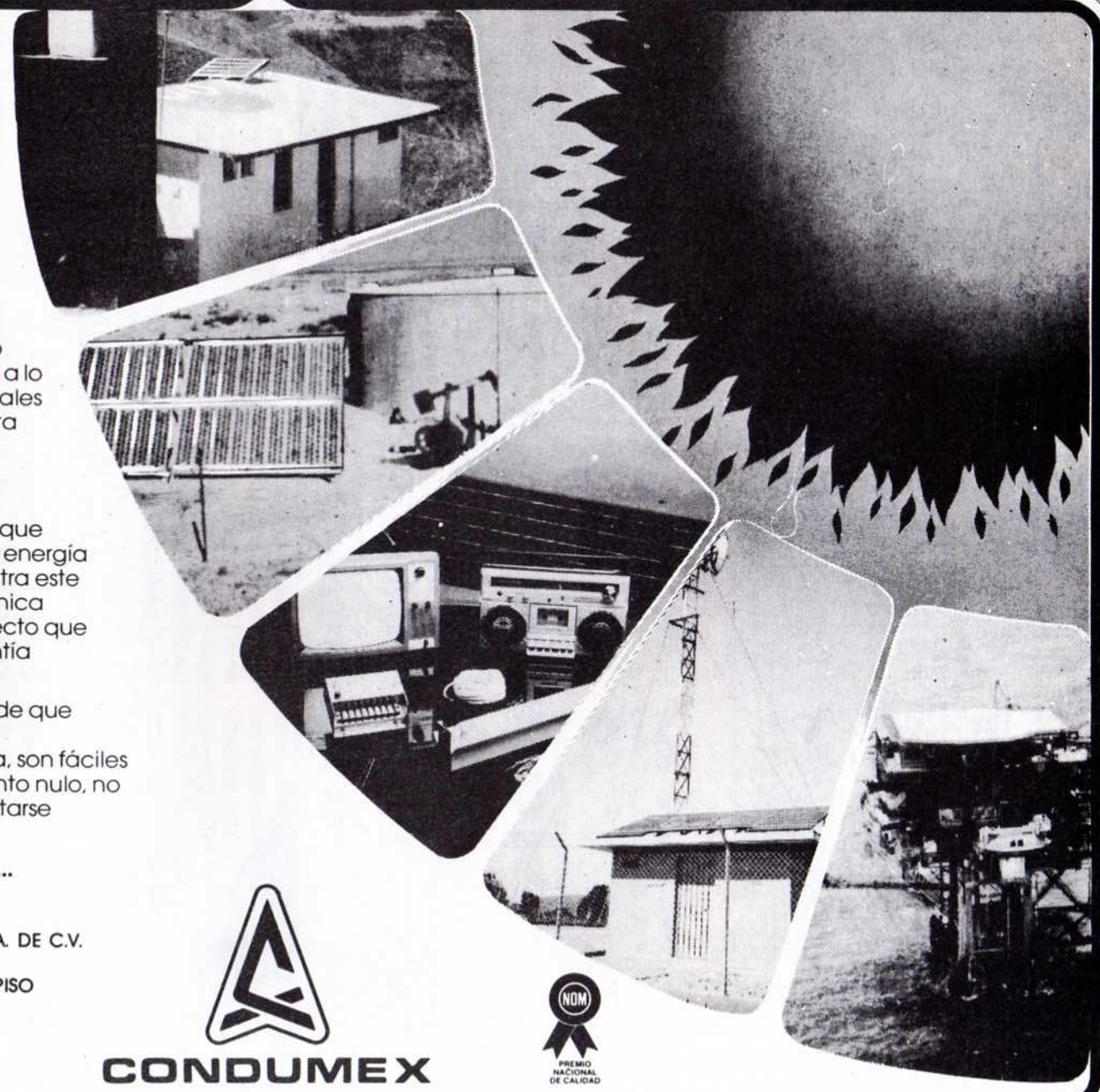
ahora es una electrificante realidad.

A poco tiempo de iniciar el Area de Energía Solar, CONDUMEX ha instalado exitosamente Plantas Eléctricas Solares a lo largo del país, desde casas y clínicas rurales localizadas en zonas montañosas, hasta repetidoras de comunicaciones y plataformas petroleras en la Sonda de Campeche.

CONDUMEX no solo instala los equipos que generan electricidad aprovechando la energía del sol, sino que es el único que suministra este tipo de equipos y ofrece asistencia técnica profesional en la elaboración del proyecto que usted requiere con la tradicional garantía CONDUMEX.

Las Plantas Eléctricas Solares, además de que proveen energía donde la electricidad convencional no satisface la demanda, son fáciles de instalar, confiables, de mantenimiento nulo, no afectan la ecología y puede incrementarse modularmente su capacidad.

En la era de la electricidad solar...



NACIONAL DE CONDUCTORES ELECTRICOS, S.A. DE C.V.
AREA DE ENERGIA SOLAR
SOR JUANA INES DE LA CRUZ # 344, 2º PISO
TLALNEPANTLA, EDO. DE MEXICO TEL. 390 44 20

390 73 71

CONDUMEX

NOM
PREMIO NACIONAL DE CALIDAD

INDICE

ASOCIACION NACIONAL DE ENERGIA SOLAR (ANES)

5º Consejo Directivo

* Presidente: Jorge M. Huacuz V.
* Vicepresidente: Hernando Guerrero C.
* Secretario General: Juan José Ambriz G.
* Tesorera: Ma. Mercedes Fernández
* Secretario de Publicaciones: Juan Ma. Rodríguez Anza, Octavio García M.
* Secretario de Relaciones: Hernando Romero P.
* Secretario de Organización: Vicente Estrada Cajigal
* Secretario de Asuntos Industrialesd: Rodolfo Martínez S.
* Secretario de Asuntos Internacionales: Enrique Caldera M.
* Secretaria de Secciones Regionales: Ernestina Torres
* Secretario de Vocalías: Hugo Solís C.

Editores
Ana María Martínez L.
Roberto Best B.

Colaboración
Jesús Hernández

LA REVISTA SOLAR, publicación trimestral de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) de México. Apartado Postal 20-633, 01000 México, D.F. Los artículos fiemados son responsabilidad de sus autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de la Asociación. Certificado la Licitud de Contenido Nùm. 1357. Certificado de Licitud de Titulo Núm. 2148. Se autoriza la reproducción de la información si se cita la fuente.

Editor invitado: Arturo Morales Acevedo

Arturo Morales Acevedo. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, ESIME-IPN.
Posgrado en Ing. Eléctrica y Física, CINVESTAV-IPN, Purdue University (EUA), Université Pierre et Marie Curie (París, Francia). Actualmente Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Jefe del Grupo de Celdas Solares del CINVESTAV-IPN.

LA REVISTA SOLAR

Contenido

¿COMO FUNCIONAN LAS CELDAS SOLARES?
Arturo Morales Acevedo

TECNOLOGIA DE CELDAS SOLARES DE SILICIO.
M. Ortega L. y Y. Matsumoto K.

EXPERIENCIA DEL CINVESTAV-IPN SOBRE LAS APLICACIONES DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN MEXICO.
José Antonio Urbano Castelán

DE WATTS A MEGAWATTS.
Carlos Flores

TENDENCIAS EN INVESTIGACION Y COMERCIALIZACION DE CELDAS SOLARES.
Manuel Martínez

Presencia ANES
Expo ENERGIA SOLAR '89

LA REVISTA **SOLAR**

Una publicación para los interesados en el Sol y otras energías renovables

Durante varios años, LA REVISTA SOLAR fue una publicación exclusiva para los miembros de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). Hoy en día, nuestra nueva política de difusión permite la suscripción para todo el público, con lo cual un número mayor de personas puede introducirse al mundo de las energía solar y otras fuentes renovables.

Para obtener una suscripción a esta publicación trimestral, ponga sus datos en el reverso de este cupón y envíelo junto con cheque o giro postal a:

ANES. Apartado Postal 20-633.
01000 México, D.F.

SUSCRIBASE

PRECIO DE LA SUSCRIPCIÓN ANUAL: 12,000.00 M.N.

Solicitud de suscripción

NOMBRE _____
APELLIDO PATERNO | APELLIDO MATERNO | NOMBRE

DOMICILIO _____
CALLE | NÚMERO

_____
NÚMERO ANTERIOR | COLONIA | CÓDIGO POSTAL

_____
CIUDAD | ESTADO | TELÉFONO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
DEPARTAMENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGIA

EL AREA DE ENERGIA EOLICA OFRECE A INSTITUCIONES Y PARTICULARES BAJO CONVENIOS DE COOPERACION TECNICA LO SIGUIENTE:

EQUIPO ANEMOMETRICO PARA ESTUDIOS DE VIENTO

INSTALACIONES DEMOSTRATIVAS DE LA AEROBOMBA ITIA

UN PAQUETE DE DISQUETTES CON LAS BASES DE DATOS DE 9 AÑOS CON INFORMACION METEOROLOGICA A NIVEL NACIONAL

INTERESADOS COMUNICARSE CON: ING. ENRIQUE CALDERA MUÑOZ
91 (73) 183811 EXT. 2089
EXT. 2090

editorial

HACE cien años, en el número de abril de 1889, la prestigiada revista "Scientific American" publicó en sus páginas una nota que traducida al Español decía: "La opinión del público en general parece ser que el petróleo debe, al menos en gran medida, tomar el lugar del carbón como combustible. Las ventajas son tan obvias que es difícil encontrar un hombre que no crea que habrá de hallarse un método para producir con el petróleo una flama estable, sin humo, económica y fácilmente controlable con la cual se puedan calentar las calderas. El gran público está cansado del carbón, con sus residuos, humo, polvo y cenizas, y la necesidad de atención constante -para no mencionar los conflictos regulares de los pesos mermados y los precios de extorsión".

Evidentemente en esa época también era difícil encontrar un hombre que pudiera anticipar los problemas que habrían de derivarse del uso masivo del petróleo y sus derivados: problemas geopolíticos, conflictos armados por el control de las fuentes de abastecimiento, destrucción y contamición de selvas durante la exploración y explotación, derrames masivos de crudo en el océano, con los consecuentes daños ecológicos, etc. Y aún ahora, cuando el petróleo constituye el pilar sobre el cual se sustenta la economía mundial, no es fácil encontrar personas conscientes de problemas como la lluvia ácida, el efecto de invernadero y la destrucción de la capa de ozono, causados por el uso masivo y acelerado de los combustibles fósiles. Con todo y eso, la necesidad de contar con alternativas energéticas social, ecológica y económicamente aceptables se hace cada vez más evidente, conforme los problemas causados por el uso del petróleo se dan a conocer al gran público. Y así, mientras hace cien años el cambio de la base ener-gética del carbón al petróleo se gestaba con base en la conveniencia de los consumidores individuales, en la actualidad el cambio del petróleo hacia otras alternativas energéticas, debe gestarse con base en la conveniencia de la sociedad humana como un todo para garantizar nuestra subsistencia en este planeta.

Los procesos de generación de electricidad, la forma de energía más versátil del mundo moderno, en consecuencia también habrán de evolucionar hacia esquemas más compatibles con el medio ambiente. Y entre ellos indudablemente la generación fotovoltaica habrá de jugar un papel muy importante, no sólo por la simplicidad mecánica de los dispositivos sin partes móviles ni fluidos presurizados y su inherente confiabilidad, sino además porque sus costos siguen bajando. Ya en muchos casos de aplicaciones aisladas o remotas, los sistemas fotovoltaicos son económicamente competitivos. Las aplicaciones centralizadas para la generación de potencia se persiguen con ahínco en varios países industrializados.

En México tenemos varias aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos, algunas de ellos resultado de un largo proceso de investigación y desarrollo tecnológico autonómo en instituciones nacionales, lo que muestra que existe aquí la infraestructura humana capaz de sustentar nuevos desarrollos industriales en este campo. Desafortunadamente, la falta de programas oficiales en el sector energético y la tradicional desvinculación entre la industria y los investigadores han malogrado hasta ahora esos desarrollos. Con todo y esto, el mercado nacional de los sistemas fotovoltaicos sigue creciendo como uno de los mercados más dinámicos en el mundo. Y para satisfacerlo se tiene que recurrir cada vez más a la importación. Esto se revierte en los cuadros de investigación nacionales que de vez en vez se desintegran al ver que sus esfuerzos no tienen los frutos esperados.

Este número de la Revista Solar es en parte un recuento del esfuerzo que se ha hecho en el país por desarrollar los sistemas fotovoltaicos. También da un panorama, aunque parcial, del gran potencial existente para su aplicación. Y en su contexto, pone de manifiesto el enorme esfuerzo que el país deberá de hacer para convertir ese potencial en una industria fotovoltaica nacional a la altura del México moderno que los mexicanos del presente tratamos de forjar.

Jorge M. Huacuz V.

¿COMO FUNCIONAN LAS CELDAS SOLARES?

Por ARTURO MORALES ACEVEDO *

Las celdas solares son dispositivos de estado sólido que convierten la energía solar directamente en energía eléctrica. El fenómeno en el cual se basa su funcionamiento se denomina Efecto Fotovoltaico, y pudo explicarse sólo hasta principios del presente siglo, aunque desde 1839 ya lo había observado el científico francés H. Becquerel.

Para entender un fenómeno parecido llamado Efecto Fotoeléctrico, Albert Einstein propuso en 1905 que la luz no es un fenómeno solamente ondulatorio, como se había establecido hasta entonces, sino que la luz interactúa con la materia en una forma cuantizada. En otras palabras, la energía luminosa se transfiere a la materia como si aquella estuviera compuesta de pequeñísimos corpúsculos llamados fotones.

Esta teoría inició el surgimiento de la nueva física que no sólo permitió explicar el Efecto Fotoeléctrico, sino que también hizo posible el advenimiento de la electrónica moderna con los transistores, los lasers, las microcomputadoras, y otros dispositivos importantes en la industria actual.

Así, entre otras cuestiones, la física moderna mostró que dependiendo del arreglo y de las propiedades de los átomos en estado sólido, unos materiales pueden ser buenos conductores, otros buenos aislantes y algunos más pueden ser semiconductores.

Los semiconductores son una clase especial de materiales. Conducen electricidad a niveles pequeños comparados con los metales. De hecho, a bajas temperaturas se comportan como aislantes. Sin embargo, en un semiconductor es posible cambiar la cantidad de corriente que fluye a través del mismo cuando se aplica un voltaje externo. Esta variación de la resistencia óhmica, en un rango amplio, puede lograrse mediante la introducción controlada de átomos extraños en el material.

Sin embargo, es otra propiedad la que causó la gran utilización de los semiconductores en la industria electrónica moderna: la electricidad es transportada por electrones con carga negativa igual que en los metales, pero a diferencia de lo que sucede en éstos, también otro tipo de "partículas" con carga positiva, llamadas huecos, pueden moverse en su interior.

Para visualizar lo anterior, refirámonos a la figura 1. Allí se ilustra en forma esquemática el enlace que hay entre los átomos del silicio, y de otros materiales similares, cuando están en estado cristalino.

Cuando un electrón es liberado de algún enlace por un fotón con suficiente energía, o por la excitación térmica del cristal, deja un hueco en su lugar, el cual puede "moverse" cuando se aplica un voltaje externo. Como se ve en la figura, el movimiento de los huecos es en sentido opuesto al de los electrones libres, como si aquellos tuvieran carga positiva; pero en realidad, son los mismos electrones moviéndose entre enlaces atómicos los que producen este efecto aparente.

Debido a las propiedades mencionadas, en los semiconductores es posible hacer que exista una mayor cantidad de huecos que de electrones, o a la inversa, mayor cantidad de electrones que de huecos. En el primer caso se hablará de un

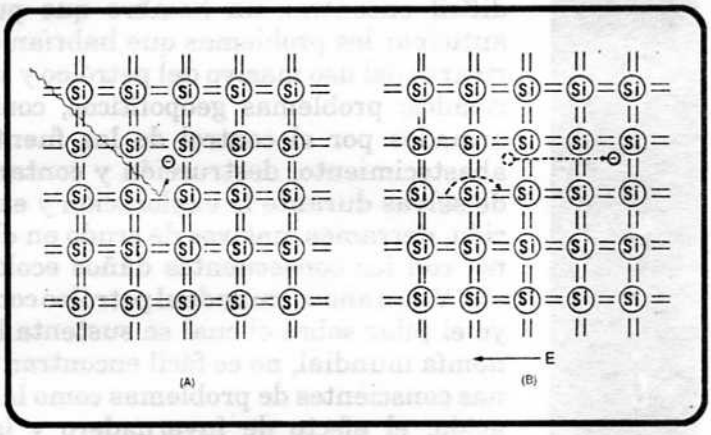


Fig. 1.- Representación esquemática de los enlaces covalentes en un cristal de silicio. (A) Un fotón con suficiente energía rompe uno de los enlaces, libera un electrón y deja un "hueco" en su lugar. (B) Al aplicar un campo eléctrico externo, electrones y "huecos" se moverán en direcciones opuestas.

semiconductor tipo p ("positivo"), y en el segundo de un semiconductor tipo n ("negativo"). Por ejemplo, el silicio será tipo p cuando se le introduzca boro en cantidades pequeñas (concentraciones del orden de 0.000 010 %), y será silicio tipo n cuando se impurifique con fósforo en cantidades similares.

Esto es importante debido a lo que ocurre cuando dos cristales de tipo opuesto se ponen en contacto. Cuando ésto sucede, habrá transferencia de electrones y huecos entre los

dos materiales, ya que es una tendencia natural de las partículas de una misma clase (átomos, moléculas o electrones) la de moverse desde regiones en donde hay muchas hacia aquellas donde hay pocas. Las moléculas del aire, por ejemplo, tienden a llenar cualquier recinto vacío. A este movimiento natural de las partículas se le denomina "difusión", y como veremos es un fenómeno que ocurre con frecuencia en la fabricación y en el funcionamiento de las celdas solares de silicio.

Sin embargo, la transferencia de huecos y electrones se detendrá después de un corto período debido a que en la interfaz entre los dos materiales la carga eléctrica ya no estará balanceada, y aparecerá un campo eléctrico como consecuencia de ésto (en la interfaz el cristal tipo n se hará positivo y viceversa). Este campo eléctrico tendrá una dirección tal que se opondrá al movimiento subsecuente de electrones de la región tipo n hacia la p, y de huecos desde la región p hacia la n.

En otras palabras, después de un tiempo pequeño (menor que 0.000 000 001 s) de haber puesto en contacto íntimo dos cristales de diferente tipo, aparecerá un campo eléctrico muy intenso (mayor que 100 000 V/cm) en la interfaz entre los dos materiales. Esto es lo que se ilustra esquemáticamente en la figura 2. Es importante hacer notorio aquí, que la unión de dos semiconductores de tipo opuesto es la base no sólo de las celdas solares, sino también de los transistores, de los diodos emisores de luz y de otros dispositivos electrónicos de estado sólido.

Con estos antecedentes se podrá entender cómo ocurre el mencionado efecto fotovoltaico mediante el cual se obtiene energía eléctrica de una celda solar al incidir luz sobre ésta.

Ya se explicó que podemos imaginar que la luz está constituida de fotones con energía que es proporcional al color de la luz: los fotones "verdes" son más energéticos que los "rojos", y los "azules" más que aquellos.

Si la energía de los fotones incidentes es suficiente para liberar a los electrones de los enlaces en el material de la celda solar, se producirán simultáneamente electrones y huecos que podrán moverse en su interior. Estos tardarán un tiempo muy pequeño (0.0001 s) desde el momento de ser generados hasta que se recombinen. En otras palabras, un electrón libre podrá encontrar en su trayecto un enlace suelto, es decir, un hueco, y perderse al ser atrapado por éste.

Es aquí donde se ve la importancia del campo eléctrico en la interfaz entre los cristales tipo n y p. Este campo evitará el flujo de electrones desde la región n hacia la p y viceversa, por lo que los huecos y electrones generados por la luz serán separados antes de que se recombinen. Podrán fluir así a través del circuito externo y proporcionar energía a alguna carga eléctrica externa, tal como un radio, una lámpara, o cualquiera otra. Lo anterior se ilustra en la figura 3.

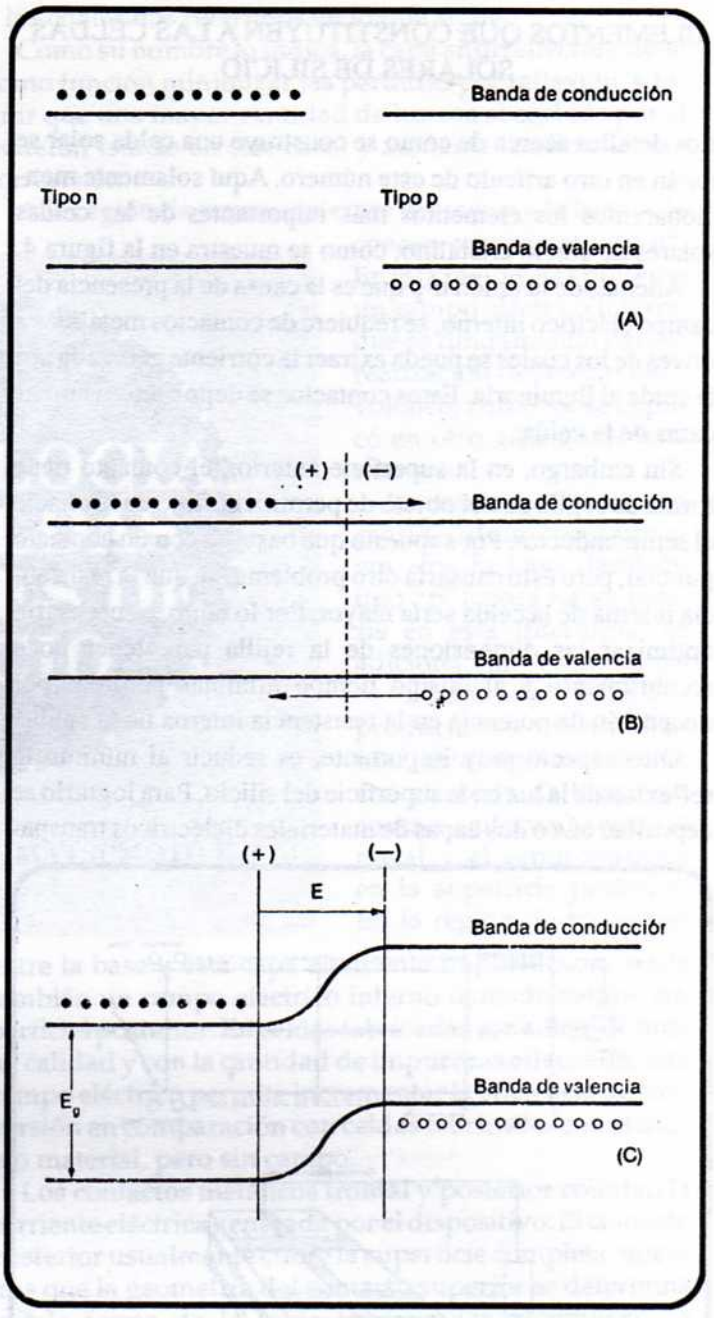


Figura 2. Aparición de un campo eléctrico interno entre un semiconductor tipo n y otro tipo p puestos en contacto.
(A) Semiconductores n y p antes del contacto. (B) Movimiento de los portadores por difusión inmediatamente después del contacto. Se genera carga positiva en el lado n y carga negativa en el lado p, debido a las impurezas ionizadas. (C) Estructura de bandas de un diodo n-p cuando se ha alcanzado el equilibrio. El campo eléctrico evita el movimiento subsecuente de electrones del material n al p, y de huecos del material p al n.

En resumen, para que una celda solar funcione es necesaria la presencia de un campo eléctrico interno que separe a los huecos y electrones que se generan como consecuencia de la interacción cuántica entre la luz y el semiconductor. Los portadores fluirán a través de la carga proporcionándole energía como se desea.

ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN A LAS CELDAS SOLARES DE SILICIO

Los detalles acerca de cómo se construye una celda solar se darán en otro artículo de este número. Aquí solamente mencionaremos los elementos más importantes de las celdas solares de silicio cristalino, como se muestra en la figura 4.

Además de la unión n-p que es la causa de la presencia del campo eléctrico interno, se requiere de contactos metálicos a través de los cuales se pueda extraer la corriente generada por la celda al iluminarla. Estos contactos se depositan en ambas caras de la celda.

Sin embargo, en la superficie anterior, el contacto tiene forma de rejilla con el objeto de permitir el flujo de luz hacia el semiconductor. Por supuesto que bastaría con un contacto puntual, pero ésto causaría otro problema, ya que la resistencia interna de la celda sería mayor. Por lo tanto, es necesario optimizar las dimensiones de la rejilla para tener poco recubrimiento y al mismo tiempo mínimas pérdidas por disipación de potencia en la resistencia interna de la celda.

Otro aspecto muy importante, es reducir al mínimo la reflexión de la luz en la superficie del silicio. Para lograrlo se depositan una o dos capas de materiales dieléctricos transpa-

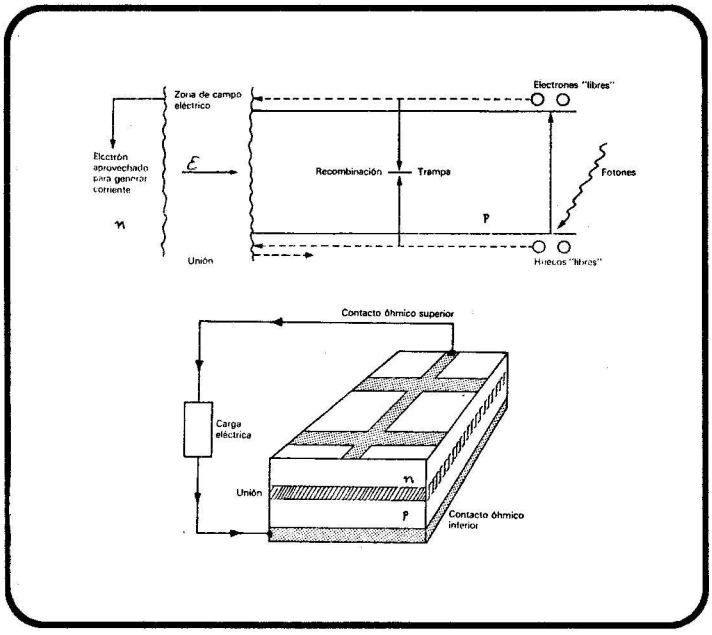


Figura 3. Generación de corriente al iluminar una celda solar. Los electrones fluyen por el circuito externo a través de la carga a la que se proporciona potencia eléctrica.

rentes que permiten un mejor acoplamiento óptico entre el silicio y el aire.

Las celdas solares se interconectan para formar módulos, de forma que se pueda tener la potencia requerida para una determinada aplicación. Estos módulos, a su vez, pueden arreglarse en páneles fotovoltaicos de mayor potencia. Con

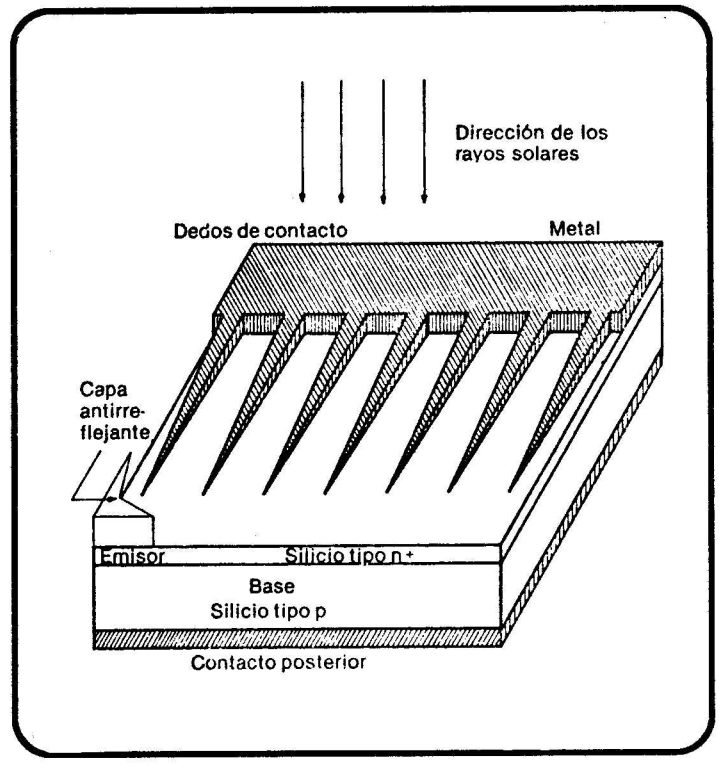


Figura 4. Estructura de una celda solar convencional de unión n-p. El contacto superior se hace en forma de rejilla para permitir el flujo de luz hacia el semiconductor. En la cara superior se deposita una película de un material adecuado (nitruro de silicio u otro) para reducir al mínimo la reflexión de la luz.

ésto se tendrá energía eléctrica suficiente en los satélites, y posiblemente en pequeñas poblaciones en el futuro próximo.

Actualmente hay otros materiales que se utilizan para fabricar celdas solares, desde el silicio amorfo y policristalino, hasta cristales de semiconductores compuestos como el arsenuro de galio, el telururo de cadmio, y otros. Sin embargo, el principio de funcionamiento es el mismo que el que hemos descrito en este artículo.

En caso de que el lector requiera de una explicación más extensa, se recomienda la lectura de las siguientes referencias.

1.-"Hacia una celda solar de alta eficiencia", por A. Morales Acevedo en la revista CIENCIA Y DESARROLLO, Vol.77, Pág.33 (1987).

2.-"Celdas Solares" por A. Morales Acevedo en la Revista CIENCIA Y DESARROLLO, Vol.57, Pág.70 (1984).

3.-SOLAR CELLS por M. Green, Englewood Cliffs, New York (1985). Este es un buen libro de texto escrito en inglés.

---

* Ing. en Electrónica, PhD Electrónica, Investigador, Dpto. Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN. Apdo. Postal 14-740, México, D.F. 07000.

TECNOLOGIA DE CELDAS SOLARES DE SILICIO

Por M. ORTEGA L. y Y. MATSUMOTO K. *

Hoy en día existe una gran variedad de materiales para fabricar celdas solares. Sin embargo, las celdas solares a base de silicio monocristalino y policristalino son las que han recibido una mayor atención, y desde los años 70 se fabrican a nivel industrial para aplicaciones terrestres.

En el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CIEA-IPN) existe una planta piloto para la fabricación de celdas solares de este tipo, y en este artículo se describe el proceso empleado para fabricar las celdas de acuerdo con una tecnología desarrollada en la propia planta.

LA ESTRUCTURA FOTOVOLTAICA "n^+pp^+"

Con el fin de que el lector establezca la conexión entre el efecto fotovoltaico y la celda solar, como un dispositivo que permite su realización, es conveniente explicar la función que tiene cada una de las partes de una celda solar.

Cuando en un material incide energía luminosa, suceden simultáneamente tres fenómenos. Una fracción de la energía que incide es absorbida, otra se refleja en la superficie iluminada, y por último otra se transmite a través del material. En una celda solar sólo puede aprovecharse la luz que se absorbe, las porciones que se reflejan o se transmiten significan pérdidas de energía.

La figura (A) ilustra en forma simplificada las diversas partes que componen una celda solar de silicio "n^+pp^+" y los nombres con que son denominadas cada una de ellas, a las cuales nos referimos en lo que sigue.

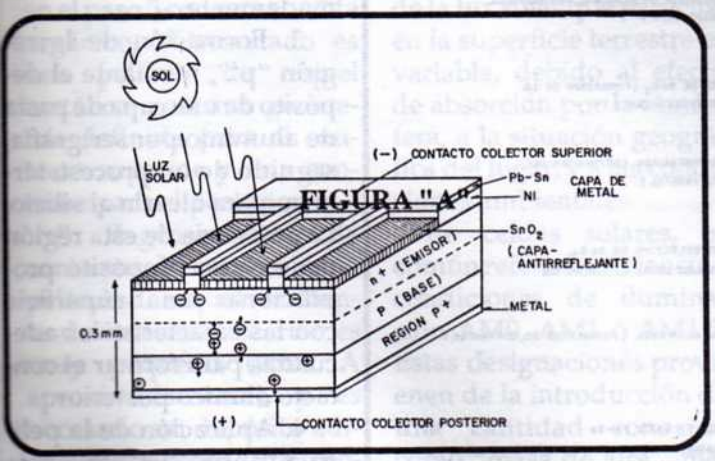


FIGURA "A"

Fig. (A) Celda solar de silicio con estructura n^+pp^+. (Para fines de ilustración no se guarda la proporción entre las dimensiones de cada una de sus partes, con las correspondientes a una celda solar real).

Como su nombre lo indica, la capa antirreflectora tiene como función minimizar las pérdidas por reflexión, y lograr que una mayor cantidad de luz sea absorbida por el material (silicio en este caso) y aumente la eficiencia de conversión.

A la región de transición entre el emisor y la base se le conoce como unión "p-n". En esta región está presente un campo eléctrico interno que es fundamental para la realización del efecto fotovoltaico, como ya se explicó en otro artículo de este número.

La región "p^+" tiene una cantidad de impurezas mayor que la base (también tipo "p"); para hacer énfasis en esta diferencia, se adiciona un superíndice "+" a la letra "p". En celdas producidas a nivel industrial, esta región se forma con el objeto de lograr un contacto adecuado entre el metal y el semiconductor en la superficie posterior. En la región de transición entre la base y esta capa altamente impurificada, existe también un campo eléctrico interno llamado campo superficial posterior. En celdas fabricadas con silicio de buena calidad y con la cantidad de impurezas adecuada, este campo eléctrico permite incrementar la eficiencia de conversión en comparación con celdas fabricadas con el mismo material, pero sin campo.

Los contactos metálicos frontal y posterior colectan la corriente eléctrica generada por el dispositivo. El contacto posterior usualmente cubre la superficie completa, mientras que la geometría del contacto superior se determina por la forma de la celda (rectangular o circular). La distribución de las líneas de metalizado y sus dimensiones están determinadas por la condición de minimizar, en forma simultánea, las pérdidas por resistencia serie y las debidas al sombreado por el contacto mismo.

FABRICACION DE LA CELDA SOLAR

Las técnicas y secuencia de fabricación de una celda solar "n^+pp^+" pueden variar de una tecnología a otra. En la tecnología que se desarrolló en los laboratorios del CIEA-IPN y que será descrita enseguida, se han usado técnicas tales como la de difusión térmica de impurezas para formar el emisor; la de serigrafía de pastas conductoras para la formación de la región "p^+" y de pastas alcalinas en la definición del contacto frontal; y depósitos autocatalíticos de níquel para formar los contactos.

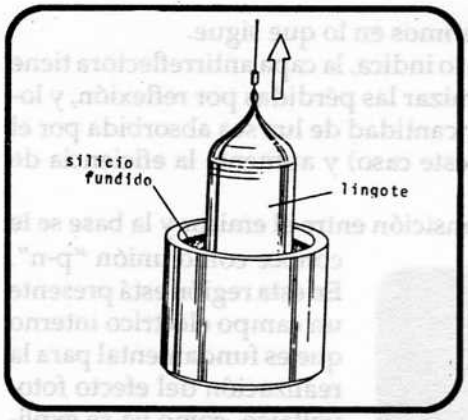


Fig. (B) Lingote de silicio monocristalino obtenido por el método de Czochralski. Los átomos de silicio se solidifican siguiendo la estructura de la semilla.

La técnica de difusión térmica es la más usada en la fabricación de dispositivos electrónicos a base de semiconductores y consiste básicamente en calentar el semiconductor a altas temperaturas, en un tubo saturado con los átomos de la impureza que se desea introducir en el mismo. Al calentarse, el material se dilata y las impurezas se introducen por un fenómeno de difusión. La profundidad a la que penetran depende de la temperatura, del tiempo de permanencia dentro del tubo, y del tipo de impureza.

La técnica de serigrafía es la de uso común en la impresión de motivos comerciales sobre tela o algún otro material, aunque también encuentra amplia aplicación en la industria de los semiconductores. En esta técnica, los motivos geométricos a imprimir sobre el semiconductor se definen en una malla de nylon o acero inoxidable, previamente tensada y sujeta a un marco; los motivos a imprimir quedan como áreas abiertas en las mallas, mientras que el área restante se cubre con resinas orgánicas. La impresión en sí se realiza poniendo una pasta sobre la malla que está en contacto con la superficie del semiconductor, y la pasta se fuerza a pasar por las áreas abiertas.

Con el fin de presentar una visión más completa acerca de las etapas que se siguen para fabricar una celda solar, en primer término se describirá el método de obtención de silicio, y después el proceso de fabricación.

- Método de obtención del silicio

El método de Czochralski es el que se emplea usualmente en la obtención del silicio para celdas solares. En términos generales, el método consiste en la inmersión de una pequeña muestra de silicio cristalino, la "semilla", en un recipiente en el cual se ha fundido silicio metalúrgico de alta pureza. La semilla se jala lentamente hacia afuera (tiramiento) y se rota alrededor de un eje que coincide con la dirección del tiramiento, de modo tal que el fundido cristaliza alrededor de la semilla. El resultado es una barra de sección transversal aproximadamente circular, llamada lingote. El proceso se esquematiza en la Fig. (B).

Las dimensiones (largo y diámetro) del lingote, dependen de las condiciones del proceso y del equipo utilizado. El tipo de la conductividad del material resultante puede ser tipo "n" o tipo "p", dependiendo del tipo de impureza que se le agregue al silicio fundido. El material que usamos es tipo "p" y la impureza que le da este carácter es el boro.

Una vez obtenido el lingote, se lleva a cabo su rectificación mecánica con el fin de formar un cilindro de sección transversal uniforme. Subsecuentemente, el lingote se corta en láminas de sección transversal circular llamadas "obleas".

- Etapas de la fabricación

El material de partida es silicio monocristalino tipo "p" y la oblea usada en la fabricación es de 3 pulgadas de diámetro. La fabricación consta de las etapas siguientes (ver Fig.C):

1. Limpieza y pulido químico, para eliminar las grasas en las superficies de la oblea y eliminar los daños que fueron introducidos en el corte.

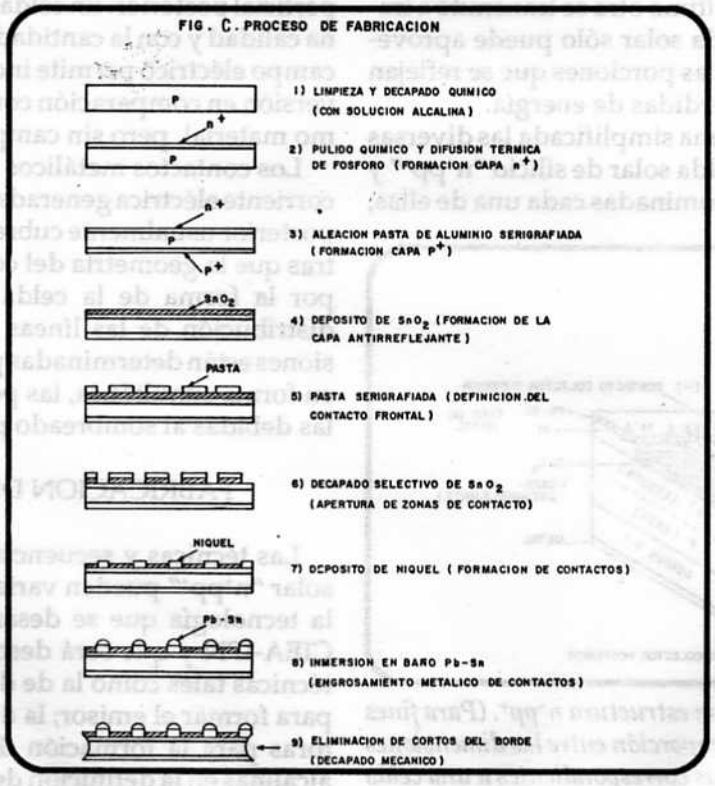


Fig. (C) Proceso de fabricación.

2. Formación del emisor, mediante una difusión térmica de fósforo a 900°C. El espesor del emisor, o sea la profundidad a la que penetran los átomos de fósforo, es de 0.000 050 cm aproximadamente.

3. Formación de la región "p+", mediante el depósito de una capa de pasta de aluminio por serigrafía, seguido de un proceso térmico para alearla al silicio. La presencia de esta región tiene como propósito proporcionar una superficie con las características adecuadas para formar el contacto óhmico posterior.

4. Aplicación de la película antirreflejante. Esta película es de dióxido de estaño y se deposita sobre la superficie del emisor por

"rocío químico". La técnica consiste en calentar la pieza a 300 - 400°C y rociarla con cloruro de estaño diluído en alcohol. La película resultante es de color azul marino, y tiene un espesor aproximado de 800 A (1 A = 0.000 000 010 cm).

5. Definición de la geometría del contacto frontal mediante la impresión serigráfica de motivos con la geometría apropiada. En este paso se usa una pasta capaz de resistir inmersiones en soluciones ácidas y básicas.

6. Apertura de zonas de contacto. Una vez definida la distribución de contactos, se procede a remover selectivamente la película de dióxido de estaño para descubrir zonas de la superficie de silicio y fijar a ella los contactos metálicos.

7. Formación de contactos mediante el depósito de una película de níquel. El método, conocido como "electroless" de níquel, consiste en la inmersión de la muestra en una solución preparada a base de cloruro de níquel, a una temperatura de 90°C. Una vez removida la pasta aplicada en el paso 5 con un solvente orgánico, el resultado es una película de níquel metálico, con una geometría definida para el contacto superior y una continua para el posterior.

8. Engrosamiento de contactos. El espesor de la película de níquel resultante del proceso anterior es muy pequeño (2500 A aproximadamente), y es necesario un depósito adicional de soldadura plomo-estaño. Este se lleva a cabo por inmersión de la muestra en soldadura plomo-estaño previamente fundida.

9. Eliminación de "cortos-circuitos" en las celdas, ya que durante el proceso de fabricación los polos positivo y negativo de la celda quedan conectados a través del borde. Estas conexiones se eliminan mediante un desbastado mecánico.

CARACTERIZACION DE LAS CELDAS SOLARES

La caracterización de una celda solar bajo iluminación permite clasificarla en cuanto a su calidad, o sea su eficiencia de conversión. Esta es, en términos simples, una medida de la cantidad de energía luminosa que es transformada a energía eléctrica útil.

Para caracterizar las celdas es necesario conocer las condiciones de iluminación bajo las cuales se realiza la medición, ya que la eficiencia de una celda solar depende tanto de la distribución espectral de la luz que incide sobre ella, como de su intensidad.

La intensidad luminosa es usualmente dada en términos de potencia por unidad de área. La intensidad de la luz solar que se recibe en la superficie terrestre es variable, debido al efecto de absorción por la atmósfera, a la situación geográfica del lugar, y a las condiciones ambientales.

En celdas solares, es común referir la eficiencia a condiciones de iluminación AM0, AM1 ó AM1.5. Estas designaciones provienen de la introducción de una cantidad conocida como "masa de aire", mediante la cual se cuantifican los efectos de la atmósfera y del medio ambiente sobre la luz solar. A nivel laboratorio, las condiciones de iluminación antes mencionadas se reproducen mediante "simuladores solares".

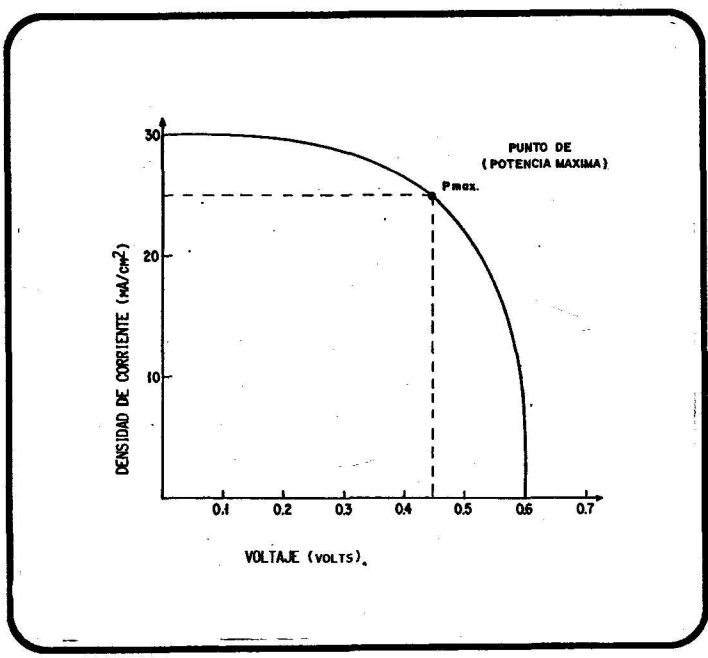


Fig. (D) Características corriente-voltaje de una celda solar de silicio n^+pp^+.

En nuestro laboratorio las condiciones de iluminación bajo las cuales se realiza la caracterización son AM1.5, y la potencia por unidad de área es de 100 mW/cm². En la Fig. D se muestran las características corriente-voltaje de una celda solar. En el caso mostrado,

$V_m = 0.45$ V

Voltaje

$J_M = 25$ mA/cm²

Corriente/cm²

$P_{MAX} = V_M \cdot J_M = 11.25$ mW/cm²

Potencia/cm²

son los valores máximos de voltaje, corriente y potencia por unidad de área proporcionados por este dispositivo.

Si, por ejemplo, un área de 1 m² fuese cubierta con celdas de las características mostradas y expuesta a la intensidad luminosa mencionada, se obtendrían más de 100 Watts de potencia eléctrica utilizable.

En resumen, se ha presentado una visión general acerca de la fabricación de las celdas solares de silicio monocristalino. La descripción de las etapas de fabricación se ha hecho en base a una tecnología desarrollada en nuestro laboratorio. Aun cuando en la presentación nos referimos en todo momento al silicio monocristalino como material de partida, la tecnología puede aplicarse a la obtención de celdas solares de silicio policristalino.

* Ingenieros en Electrónica, Investigadores, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN. Apdo. Postal 14-740, México, D.F. 07000.

EXPERIENCIA DEL CINVESTAV-IPN SOBRE LAS APLICACIONES DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN MEXICO

Por JOSE ANTONIO URBANO CASTELAN *

La energía en cualquiera de sus formas y manifestaciones, ha sido de capital importancia para el desarrollo de la humanidad a través de los siglos; de aquí que su disponibilidad, y los conocimientos y recursos económicos para aplicarla, han permitido en gran medida el progreso de las sociedades pasadas, presentes y futuras.

Por tal motivo, el CINVESTAV-IPN a través de su departamento de Ingeniería Eléctrica, ha trabajado desde hace 20 años en el desarrollo integral de la conversión fotovoltaica de la energía solar, al cubrir los campos de: investigación básica, investigación aplicada, desarrollos tecnológicos en celdas de concentración, modelación de celdas solares de alta eficiencia, fabricación de celdas y módulos solares fotovoltaicos (fig. 1), fabricación de arreglos (fig. 2), desarrollo de controladores electrónicos (fig. 3), desarrollo de sistemas fotovoltaicos para telesecundarias (fig. 4), bombeo de agua e iluminación (figs. 5 y 6), ejecución de proyectos masivos en sistemas solares fotovoltaicos, capacitación de personal técnico en el campo, seminarios nacionales, asesorías a dependencias públicas, federales y estatales, instalaciones de equipos (fig. 7), ingeniería de sitio (fig. 8), y mantenimiento en algunos casos. Además, el CINVESTAV-IPN ha diseñado, instalado y puesto en operación, una planta piloto de celdas y módulos solares fotovoltaicos de 50 kW-pico/año en dos turnos de trabajo, con el fin de probar y evaluar los desarrollos tecnológicos alcanzados en esta disciplina (fig. 1). La planta piloto es el antecedente para una planta industrial con tecnología 100% nacional, cumpliendo así un eslabón dentro del desarrollo integral de la conversión fotovoltaica en México.

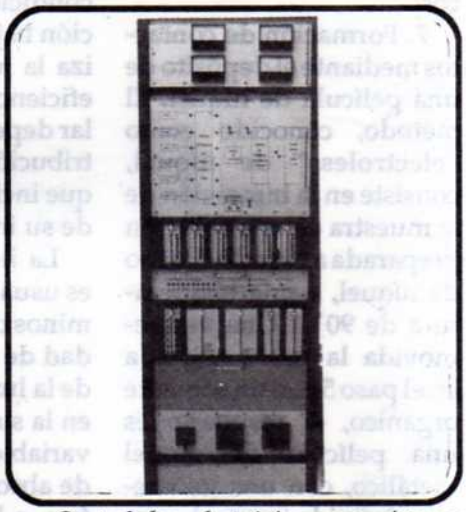
Arreglos fotovoltaicos de 8 Amp a 15 Volts para utilizarse en equipo de radio telefonía rural para la S.C.T.

El impulso que provocó el desarrollo de la conversión fotovoltaica para aplicaciones terrestres a nivel mundial, data de hace sólo 13 años, a consecuencia de los aumentos de los precios del petróleo en los años 73-75. Anteriormente, las celdas solares sólo se utilizaban para aplicaciones en el espacio exterior, en satélites.

A partir de entonces en los EE.UU., Japón y Europa, las fuentes no convencionales de energía fueron impulsadas fuertemente. Este esfuerzo mundial ha propiciado resultados espectaculares en estos 14 años (de 1975 a 1989).

La figura 9 muestra los logros obtenidos respecto a la eficiencia en celdas solares; por otro lado, la figura 10 muestra los logros obtenidos tanto en eficiencia, costo y durabilidad, ambas a nivel mundial. Estos avances han renovado las expectativas de aplicar la conversión fotovoltaica a nivel masivo en sistemas solares, ya que presenta ventajas comparada con otros sistemas convencionales de producción de energía, por ejemplo:

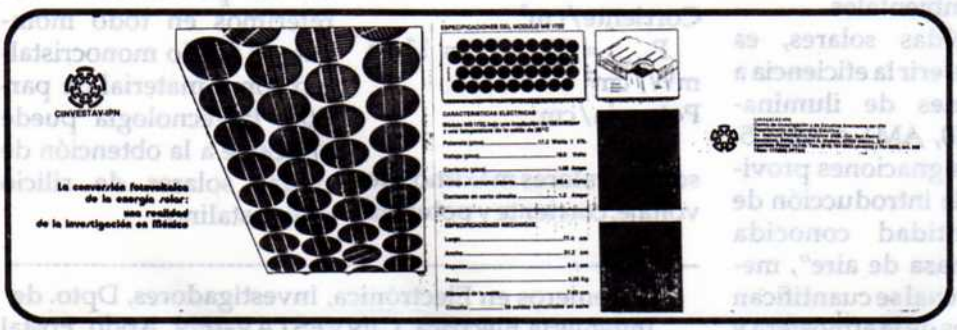
- es modular (de microwatts para relojes y calculadoras hasta Megawatts para centrales fotovoltaicas).
- requiere de poco mantenimiento (revisar el electrolito de las baterías y limpiar los módulos de polvo y partículas).
- no contamina ni se desgasta (ya que no tiene partes móviles, debido a que el proceso de transformación energética es directo de luz a electricidad).
- no produce ruido.
- el energético primario se encuentra disponible en mayor o menor grado en el lugar de la aplicación (el sol).



Controlador electrónico para sistemas fotovoltaicos de baja potencia y control electrónico de 5 kW para alimentar un sistema de bombeo de agua de 1/2 H.P.

- es de fácil instalación y el personal técnico no necesita preparación profesional.
- los módulos fotovoltaicos tienen tiempos de vida promedio de 20 años.

La principal desventaja de la utilización de la conversión fotovoltaica es que requiere de una alta inversión inicial, aunque al amortizarse durante la vida útil del equipo solar, resulta más rentable que otros sistemas de generación convencional, los cuales tienen



Módulo fotovoltaico fabricado en la planta piloto de celdas solares en México.

PRESENCIA ANES

Energía solar, una alternativa energética viable para impulsar el desarrollo del país. Expo energía solar 89

Con el objetivo central de promover la vinculación y facilitar la transferencia de tecnología entre los sectores industrial, comercial y de investigación y desarrollo, del 5 al 8 de abril del presente año se llevó a cabo la Expo Energía Solar 89. La realización de este evento fue posible gracias al apoyo otorgado por la Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA) y al entusiasmo de la Secretaría de Asuntos Industriales de la Asociación Nacional de Energía Solar.

La relevancia de este foro fue puesta de manifiesto en la Ceremonia Inaugural con la presencia del Ing. Alberto Escofet Artigas, Subsecretario de Energía de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal; el Ing. Sergio Reyes Osorio, Subsecretario de Agricultura de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; el Dr. Edmundo de Alba Alcaraz, Coordinador Ejecutivo de la Comisión Nacional de Ecología; el Ing. José Antonio Esteva Maraboto, Director General de los Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial; el Dr. Roberto Villarreal Gonda, Director General de Invenciones, Marcas y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial; el Dr. Ariel Valladares Clemente, Director del Instituto de Investigaciones en Materiales de la U.N.A.M.; el Lic. Vicente Gutiérrez Camposeco y el Ing. José María Campos Fonseca, primer y cuarto vicepresidentes de CANACINTRA; y el Dr. Jorge Huacuz Villamar, Presidente de la Asociación Nacional de Energía Solar entre otras distinguidas personalidades.

Adicionalmente a la Exposición Industrial y de Servicios, la Expo Energía Solar 89 comprendió la realización de un seminario y una visita técnica. En el seminario fueron impartidas 21 ponencias por destacados expositores de la administración pública, de la industria y de las instituciones de investigación y desarrollo tecnológico. el programa fue estructurado de manera que se abordaran los diferentes aspectos relacionados con el aprovechamiento de la enegía solar: política energética nacional, estímulos fiscales y financieros, desarrollo tecnológico y aplicaciones comerciales de calentadores solares de agua, generación de electricidad mediante concentradores y fotoceldas, almacenamientos de energía, secado solar de productos agropecuarios, arquitectura bioclimática y energía del viento, de la biomasa y microhidráulica.

La visita técnica fue a las instalaciones de la planta piloto de celdas fotovoltaicas del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en donde los asistentes tuvieron la oportunidad de conocer un programa de investigación y desarrollo a nivel comercial con tecnología netamente nacional.

La parte medular del evento fue la exposición de equipos y servicios. En ella se dieron cita los principales fabricantes y distribuidores de equipo solar para el calentamiento de agua, generación de electricidad fotovoltaica y eólica, así como firmas de ingeniería para el desarrollo de sistemas y de helio-arquitectura para la optimización del habitat. La participación de instituciones de investigación y desarrollo permitió conocer las líneas de trabajo y los principales logros obtenidos en los últimos años.

No obstante que se trata de la primera exposición nacional en su tipo, gracias al apoyo de los medios masivos de comunicación, la afluencia de visitantes fue contínua durante los cuatro días.

En el estand de la A.N.E.S. se atendieron decenas de solicitudes de información en el amplio campo de la utilización de la energía solar; que iban desde estudiantes a nivel básico hasta de posgrado, industriales, representantes de poblados rurales y público en general. Se editaron las memorias del Seminario y el directorio de expositores.

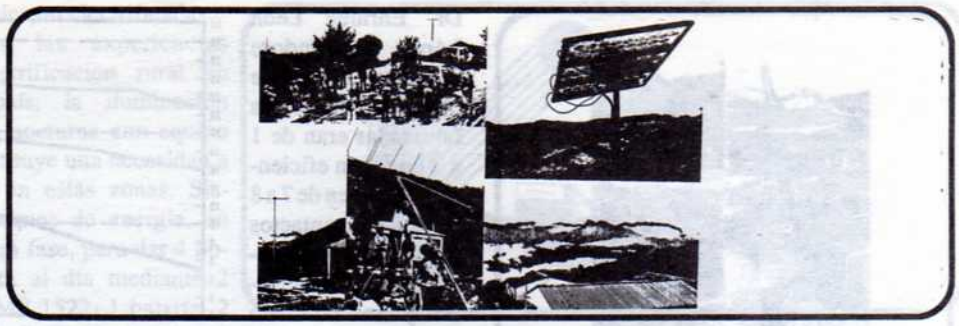
La realización de la Expo Energía Solar 89 es un gran paso en el cumplimiento de los fines de la Asociación Nacional de Energía Solar ya que permitió confrontar la realidad de la industria solar nacional y los enormes requerimientos de los usuarios potenciales. Los fabricantes, vendedores e investigadores en el área seguramente sabrás sacar fruto de ésta importantes experiencia.

Dr. Juan José Ambriz García
Ing. Rodolfo Martínez Strevel

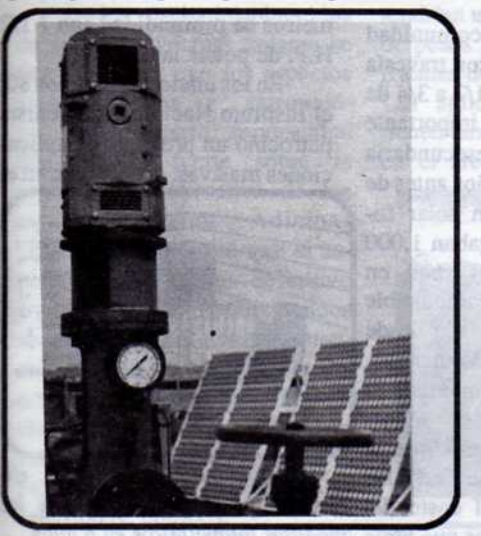
gastos de operación, mantenimiento y reposición de equipo.

Sin embargo, cuando se requieren bajas potencias eléctricas (menores de 10 kW-pico), la energía solar fotovoltaica presenta factibilidad técnica y económica para aplicarla en zonas no electrificadas en nuestro país alejadas de las redes eléctricas.

El potencial energético solar es abundante en México (del orden de 5.5 kWh/m² al día o bien 2.0 MWh/m² al año (fig. 11), por lo que se puede esperar que la energía solar será



Aplicaciones en telesecundarias en el Estado de Oaxaca, alimentadas con celdas solares.



Sistema experimental de bombeo de agua de 7 1/2 H.P. alimentado con un banco de baterías de 1.5 kW-pico en arreglo fotovoltaico.

de gran importancia en las próximas décadas en nuestro país. Por ejemplo, podría contribuír en mejorar la calidad de vida de más de 10 millones de pobladores distribuídos en 87,438 comunidades, y de las cuales el 79% tienen menos de 100 habitantes. En estos lugares no ha sido costeable tender líneas convencionales de energía eléctrica, pero la opción fotovoltaica representa una alternativa técnica y económica viable para las zonas rurales que no cuentan con las redes de suministro eléctrico convencional.

Habiendo mencionado la disponibilidad del recurso solar y las ventajas y desventajas de la conversión fotovoltaica y su posible utilización en comunidades rurales sin electrificar, a continuación daremos una breve descripción de lo que es un sistema solar fotovoltaico.

LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS (SSF)

Los sistemas solares fotovoltaicos (SSF), son equipos que funcionan con la luz solar como fuente primaria de energía, la cual es transformada y almacenada para suministrar electricidad a los diversos equipos que la requieran.

Para acostumbrarnos con la terminología convencional de los SSF, la figura 12 muestra las diferencias entre celda, módulo, panel y arreglo.

Un SSF, cuya idea básica se muestra en la figura 13, está integrado por 4 elementos:

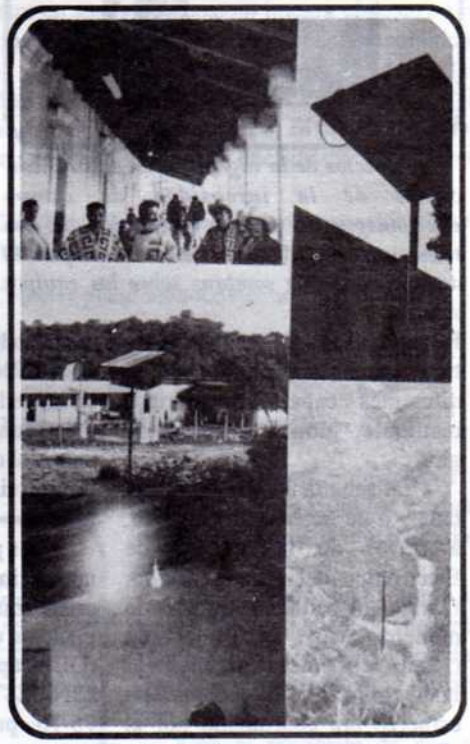
1. El convertidor de energía, formado por el o los módulos solares que constituyen el arreglo fotovoltaico. Este es el elemento que convierte la energía radiante del sol en electricidad.

2. La carga eléctrica que se quiera energizar, constituída por el o los equipos eléctricos a operar.

3. El banco de baterías formado por uno o varios acumuladores conectados en serie o paralelo, los cuales tienen la función de dar al SSF una autonomía energética de las condiciones de insolación, además de fijar y estabilizar el voltaje de operación de todo el sistema solar.

4. El controlador electrónico (más un inversor C.D.-C.A. en algunos casos), cuya función es transferir la energía a los equipos eléctricos (baterías a carga) y suministrar la corriente del arreglo al banco de acumuladores (arreglo solar a baterías).

El dimensionamiento adecuado de un SSF debe garantizar una autonomía energética durante el año, brindando una confiabilidad de 99% para los meses de más baja insolación.

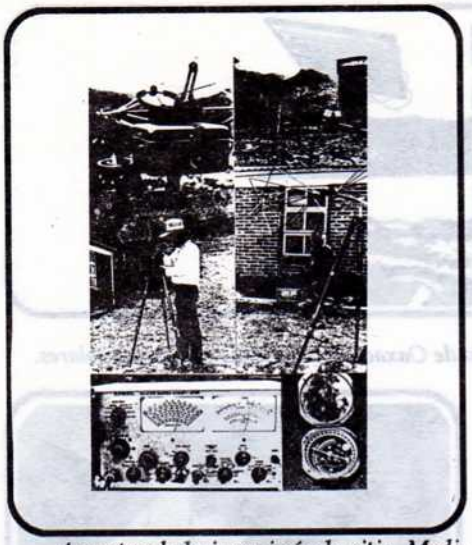


Sistema de alumbrado municipal en la Mixteca Alta, Oaxaca.

Aspectos del acceso a las comunidades para hacer las instalaciones de equipos.

APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

Los inicios de las aplicaciones fotovoltaicas en el CINVESTAV-IPN datan de los años 60's, cuando la hoy desaparecida Comisión Nacional del Espacio Exterior dependiente de la SEPAFIN (Secretaría de



Aspectos de la ingeniería de sitio. Mediciones de la intensidad de campo electromagnético para la instalación de una telesecundaria. Medición de horizonte para la determinación de sombras sobre los equipos solares.

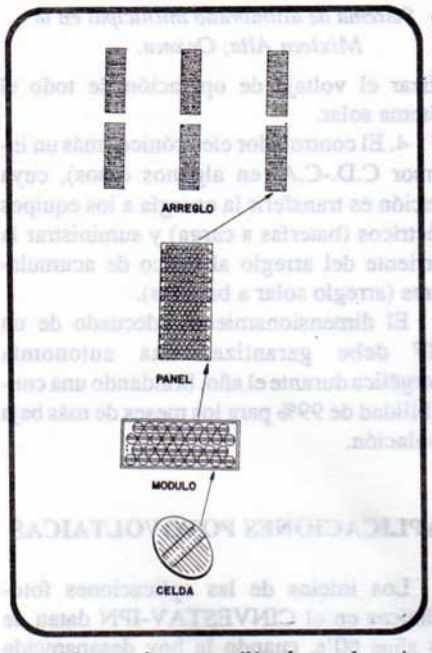
Patrimonio y Fomento Industrial), iniciaba sus estudios de las diferentes capas atmosféricas mediante globos meteorológicos.

En aquella época, el Departamento de Ingeniería Eléctrica, a través de la Sección de Electrónica del Estado Sólido, fabricó un pequeño número de módulos solares de 1/4 de Watt (32 mA a 9 Vots) para alimentar la electrónica de medición. Este esfuerzo era coordinado por el Dr. Enrique León López, auxiliándose de estudiantes de maestría. Las celdas fabricadas eran de 1 x 2 cm², con eficiencias del orden de 7 a 8 %, tenían contactos metálicos de oro evaporado y capa antirreflejante de dióxido de silicio.

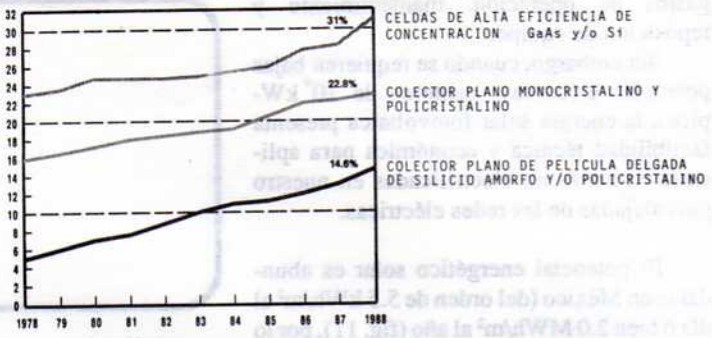
Dado el costo tan bajo del petróleo en aquella década, las fuentes alternas de energía no eran viables para utilizarse en forma masiva, sólo en casos específicos. Sin embargo, a raíz del aumento en los precios de los hidrocarburos en los años 70, el CINVESTAV-IPN reforzó sus programas en investigación básica, tecnológica y en las aplicaciones, para cubrir el desarrollo integral de la conversión fotovoltaica en México.

Los primeros logros de este nuevo impulso fotovoltaico se cristalizaron cuando la Organización de Estados Americanos (OEA) apoyó financieramente al CINVESTAV-IPN, en los años 75-76, para investigar sobre la conversión fotovoltaica de la energía solar. Con este financiamiento se obtuvieron las bases para desarrollar la planta piloto de celdas y módulos.

Dentro de las aplicaciones, se instaló la primer telesecundaria reportada en América Latina, alimentada con energía solar fotovoltaica en la Sierra Norte de Puebla (Bienvenido de Galeana, 6 de enero de 1977). El sistema solar fotovoltaico consistía de dos módulos de fabricación nacional (en el CINVESTAV) de 15 Watt-pico c/u conectados en serie para operar a 24 Volts de C.D., sobre un televisor de 24 pulgadas en diagonal, adaptado para operar con



Nomenclatura utilizada en los sistemas solares fotovoltaicos.



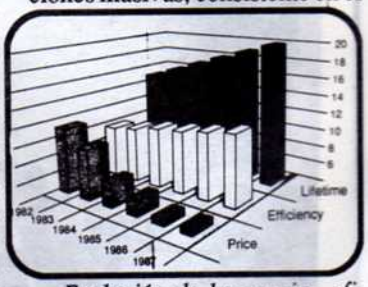
Evolución de las eficiencias de las celdas solares a través de los años

C.D. El acceso a esta comunidad era por 2 vías: a pie con travesía de 8 - 10 horas, o de 1/2 a 3/4 de hora en avioneta. Es importante mencionar que la telesecundaria llevaba operando 2 años antes de contar con la opción solar fotovoltaica y que erogaban 1,000 pesos (de 1976) al mes en gasolina, ya que el combustible tenía que se transportado desde Zacatlán de las Manzanas, Puebla, hasta la comunidad. El energético competía en importancia con los víveres que la comunidad adquiría en las ciudades grandes. El costo del energético en dos años que tenía de operar la telesecundaria antes de la solución solar, equivalió al costo del equipo solar incluyendo el televisor.

Las aplicaciones fotovoltaicas siguieron desarrollándose satisfactoriamente, ahora en el campo del bombeo de agua. El CONACYT patrocinó un prototipo de sistema solar para el bombeo de agua de 3/4 de HP a 15 metros de profundidad, con un gasto de 3.5 litros/segundo en 1979, y el BID-CONACYT apoyó otro proyecto similar, de 90 metros de profundidad con 7 1/2 H.P. de potencia en 1982.

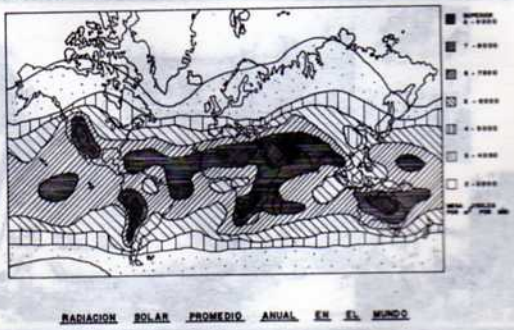
En los inicios de los años 80, el Instituto Nacional Indigenista patrocinó un proyecto de aplicaciones masivas, consistente en el diseño, construcción e instalación de 160 SSF para alumbrado nocturno a escuelas-albergues instalados en zonas indígenas de 9 estados de la República. Estos albergues imparten la educación básica y alfabetización, además de hospedar durante 5 días a la semana a los niños. El equipo solar instalado consistía de 4 módulos CINVESTAV, 1 controlador de carga, 1 batería de 200 A-h,

9 lámparas fluorescentes adaptadas, un mástil para soportar los módulos, cableado y apagadores. El sistema brindaba 8 horas-lámpara al día en promedio anual.



Evolución de los precios, eficiencias y tiempo de vida de los módulos fotovoltaicos en 6 años.

Durante la ejecución del proyecto sucedieron varias anécdotas dignas de



Radiación solar promedio anual en el mundo.

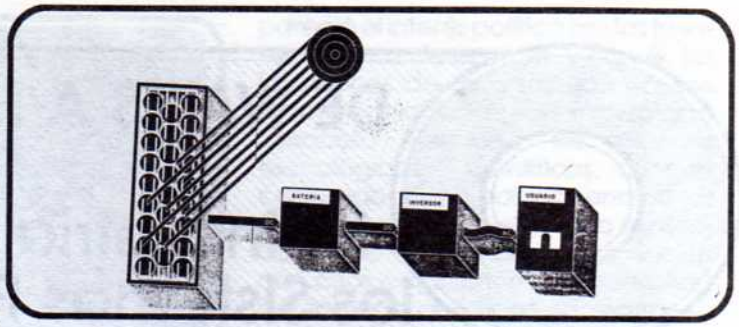
mencionar. Recordamos que en un albergue de la Sierra Tarahumara se oía decir: "¿cómo es posible que ese vidrio y metal generen electricidad?", "¿no se enojarán los dioses porque se le está robando al sol su luz durante el día, para brindarla por la noche?", "oye mi niño, ¿en dónde está el generador que prende estas lámparas?", a lo que el niño contesta, "allá, allá arriba, en el sol".

De los resultados obtenidos de los 160 sistemas solares se pudo concluir que los aspectos socio-culturales y antropológicos del usuario, representan una barrera fuerte sobre la optimización operativa de los equipos solares. Adicionalmente, se confirmó que el aspecto económico es definitivo para el uso masivo de los equipos solares, ya que el usuario potencial no tiene los recursos económicos parta adquirir un sistema fotovoltaico, y no existen las políticas y mecanismos que le hagan factible la adquisición de este tipo de equipos.

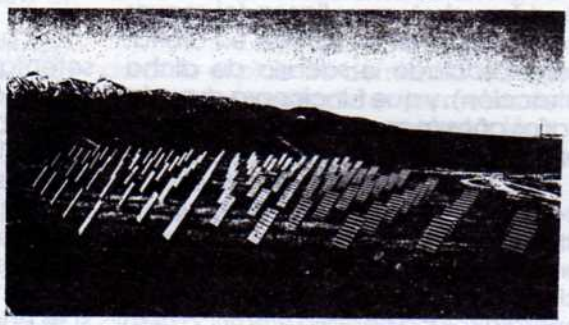
Actualmente, el costo del kWh de origen fotovoltaico es de 1,100 pesos (de noviembre de 1988) para sistemas acoplados a la red y de 1,500 pesos para sistemas autónomos, comparados con la red eléctrica convencional de 82 pesos el kHh en el área metropolitana (precio subsidiado). Esto da un factor de 13 a 18 veces más cara la opción solar, y origina que los sistemas solares sean factibles económicamente en áreas distantes de la red eléctrica convencional. Los costos antes mencionados obedecen a los precios nominales del mercado nacional, tanto en módulos, herrajes, baterías, cableado, asesoría, ingeniería de sitio e instalación y 5.5 horas-pico de insolación, para una vida promedio del equipo solar de 20 años.

Desde los inicios de las aplicaciones fotovoltacios hasta la fecha, se ha participado directa e indirectamente en las instalaciones de 20 kW-pico, confirmando que la opción solar representa una alternativa técnica y económicamente viable para las zonas rurales no electrificadas.

Dadas las experiencias sobre electrificación rural en nuestro país, la iluminación doméstica nocturna con equipo solar constituye una necesidad a satisfacer en estas zonas. Sistemas mínimos de energía, en una primera fase, para dar 4 horas-lámpara al día mediante 2 módulos MS 1522, 1 batería, 2 luminarias fluorescentes de 20 Watts c/u, herrajes y accesorios, tendrían un costo de 1.2 millones de pesos por familia (pesos corrientes de noviembre de 1988). Las aplicaciones comunitarias tienen también gran importancia en el área rural. Por ejemplo:



Elementos básicos que integran un sistema solar fotovoltaico.



Celdas de alta eficiencia de concentración GaAs y/o Si

Colector plano monocristalino y policristalino

Colector plano de película delgada de silicio amorfo y/o policristalino

Vista de una planta de 100 MW en EE.UU.

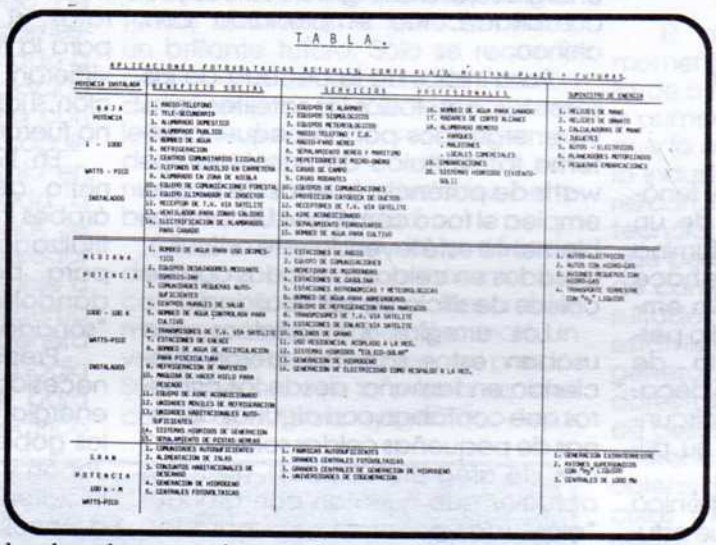


TABLA.

APLICACIONES FOTOVOLTAICAS ACTUALES, CORTO PLAZO, MEDIANO PLAZO Y FUTURAS

POTENCIA INSTALADA	BENEFICIOS SOCIALES	SERVICIOS PROFESIONALES	APOYOS DE ENERGIA
BAJA POTENCIA 1 - 1000 WATTS - PICO INSTALADOS	1. RADIO-TELEFONO 2. TELE-SECUNDARIA 3. ALUMBRADO DOMESTICO 4. ALUMBRADO PUBLICO 5. BOMBEO DE AGUA 6. REFRIGERACION 7. CENTROS COMUNITARIOS ESCOLARES 8. CLINICAS DE AUXILIO EN CARRETERA 9. ALUMBRADO EN ZONA DE AGUADA 10. ESTUDIO DE COMUNICACIONES FORESTAL 11. ESTUDIO ELECTROGRAFICO DE INDUCTOS 12. RECEPTOR DE T.V. VIA SATELITE 13. HOSPEDAJE PARA ZONAS CALIDAS 14. ELECTRIFICACION DE ALAMBRADOS PARA GANADO	1. ESTUDIOS DE ALAMBRES 2. ESTUDIOS SISMOLOGICOS 3. ESTUDIOS METEOROLOGICOS 4. RADIO TELEFONO Y C.B. 5. CRUCE FERRO VIARIO 6. SEÑALAMIENTO AEREO Y MARITIMO 7. MONITOREOS DE MICRO-ONDAS 8. CRUCE DE CAMPO 9. CRUCE FERROVIARIO 10. EQUIPOS DE COMUNICACIONES 11. PROTECCION CATODICA DE DUCTOS 12. RECEPTORES DE T.V. VIA SATELITE 13. AIRE ACONDICIONADO 14. SEÑALAMIENTO FERROVIARIO 15. BOMBEO DE AGUA PARA CULTIVO 16. BOMBEO DE AGUA PARA GANADO 17. RADARES DE CORTO ALCANCE 18. ALUMBRADO REMOTO - FAROLES - MALECONES - LOCALES COMERCIALES 19. COMUNICACIONES 20. SISTEMAS HIBRIDOS (Sistemas-SOLAR)	1. MOTORES DE BOMBEO 2. MOTORES CON HORNO-GAS 3. CALENTADORES DE AGUA 4. ENLACES 5. MOTOR - ELECTRICOS 6. ALUMBRADOS METROPOLITANOS 7. PEQUEÑAS COMUNICACIONES
MEDIANA POTENCIA 1000 - 100 K WATTS-PICO INSTALADOS	1. BOMBEO DE AGUA PARA USO DOMESTICO 2. EQUIPOS DESALADORES MEDIANOS 3. COMUNICADORES PEQUEÑOS AUTO-SUFICIENTES 4. CENTROS MEDICOS DE SALUD 5. BOMBEO DE AGUA CONTROLADA PARA CULTIVO 6. TRANSPONDEDORES DE T.V. VIA SATELITE 7. ESTACIONES DE ENLACE 8. BOMBEO DE AGUA DE RECIRCULACION PARA PISCICULTURA 9. REFRIGERACION DE MARISCOS 10. MEDICINA DE VACIO SOLO PARA PESCADO 11. EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO 12. UNIDADES MOVILES DE REFRIGERACION 13. UNIDADES HABITACIONALES AUTO-SUFICIENTES 14. SISTEMAS HIBRIDOS DE GENERACION 15. SEÑALAMIENTO DE PISTAS AEREAS	1. ESTACIONES DE RADIO 2. EQUIPO DE COMUNICACIONES 3. MONITOREOS DE MICROONDAS 4. ESTACIONES DE ENLACE 5. ESTACIONES METEOROLOGICAS Y METEOROLOGICAS 6. BOMBEO DE AGUA PARA ABREVADEROS 7. EQUIPO DE REFRIGERACION PARA MARISCOS 8. TRANSPONDEDORES DE T.V. VIA SATELITE 9. ESTACIONES DE ENLACE VIA SATELITE 10. MOLINOS DE GRANO 11. USO RESIDENCIAL ACOPLADO A LA RED. 12. SISTEMAS HIBRIDOS "SOLAR-DIESEL" 13. GENERACION DE HIDROGENO 14. GENERACION DE ELECTRICIDAD COMO RESPALDO A LA RED.	1. MOTORES-ELECTRICOS 2. MOTOR CON HORNO-GAS 3. MOTORES PEQUEÑOS CON HORNO-GAS 4. TRANSPORTE TERRESTRE CON H_2 LIQUIDO
GRAN POTENCIA 100 K - M WATTS-PICO	1. COMUNICADORES AUTOMATICOS 2. ALIMENTACION DE ENLACE 3. CONJUNTOS HABITACIONALES DE DESIERTO 4. GENERACION DE HIDROGENO 5. CENTRALES FOTOVOLTAICAS	1. FABRICAS AUTOMATICAMENTE 2. GRANDES CENTRALES FOTOVOLTAICAS 3. GRANDES CENTRALES DE GENERACION DE HIDROGENO 4. UNIVERSIDADES DE OBSERVACION	1. GENERACION ELECTROTERMICA 2. MOTORES SUPERIORES CON H_2 LIQUIDO 3. CENTRALES DE 1000 MW

bombeo de agua, tele-secundarias, centros de salud, radiotelefonía, purificación de agua, señalamiento aéreo, marítimo y ferroviario, son algunas de las aplicaciones de los SSF.

Nos encontramos en los inicios del desarrollo de un energético "nuevo" a través de la conversión fotovoltaica, pese a que el efecto fotovoltaico se conocía desde el siglo pasado. No se ha llegado al nivel de saturación tecnológica, sino todo lo contrario, se encuentra en sus fases de transición más interesantes.

La meta económica de rentabilidad en el precio del kWh de origen fotovoltaico, no está muy lejano, sólo hay que abaratar entre 3 y 5 veces el kWh para llegar a índices competitivos (precios de grandes centrales fotovoltaicas y precios del kWh en los países avanzados).

¿Qué nos depara el futuro energético? Es un poco incierto de predecir, pero cuando se eviten errores al evaluar los precios reales de los energéticos, se podrá tener un marco real de comparación. Por ejemplo: 1) El costo actual de algunos energéticos, no integra el costo en la restauración del daño ecológico; aspecto aberrante que en las próximas décadas tendrá que corregirse. 2) El precio subsidiado de la energía eléctrica. ¿Qué herencia energética dejaremos a las futuras generaciones, cuando los hidrocarburos se hayan extinguido?

Por otro lado, en el futuro la generación espacial de energía fotovoltaica mediante grandes superficies de captación, tomará gran importancia mundial.

Con el propósito de que el lector tenga una visión general de la potencialidad de la conversión fotovoltaica, se presenta la tabla que muestra las aplicaciones actuales, a corto, mediano y largo plazo, y una vista de una planta de 100 MW en EE.UU. (fig. 14).

Para finalizar, diremos que el sol ha sido, es y será la primera fuente de energía de la humanidad, que es limpia, gratuita y abundante, que el ingenio humano sólo ha utilizado subproductos de este energético primario, que sin el sol los hidrocarburos actuales no hubieran existido, y por todo ésto, los habitantes de este planeta tenemos que mirar otra vez hacia el sol.

---

* Ing. en Electrónica, Investigador, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN. Apdo. Postal 14-740, México, D.F. 07000.

DE WATTS A MEGAWATTS

La Industrialización de los Sistemas Fotovoltaicos

Por
CARLOS FLORES *

Durante los últimos 30 años la tecnología de la generación de electricidad a partir de la luz del Sol ha venido lenta, pero constantemente, forjando el camino hacia su uso masivo.

Queremos aquí, una vez que se ha descrito qué es y cómo funciona un generador eléctrico-solar y cuáles son sus aplicaciones actuales, reseñar su evolución histórica y tratar de vislumbrar su futuro a corto y largo plazo, en base al avance logrado hasta hoy. Esto con el fin de que el lector tenga una perspectiva global de los enormes retos que enfrenta esta fascinante tecnología y también de las grandes esperanzas que se pueden cifrar en ella.

ALGO DE LA HISTORIA

Hacia el espacio

Como ya se ha descrito, el fenómeno físico de la aparición de un voltaje eléctrico cuando se ilumina un material, se descubrió desde hace tiempo (1839 por Bequerel). Sin embargo, por más de siglo y medio permaneció como experimento de laboratorio, hasta finales de la década de los 50, cuando varias circunstancias hicieron que tuviera su primera aplicación práctica.

Por un lado, la física electrónica del estado sólido (la ciencia que estudia el comportamiento eléctrico de los materiales sólidos), avanzó lo suficiente para explicar cómo ocurría este tipo de fenómenos (lo cual, entre otras cosas, llevó al desarrollo de los primeros transistores, iniciando la era de la electrónica moderna). Por otro lado, el comienzo de la carrera espacial en 1957 y su identificación instantánea como objetivo político para las superpotencias, aceleraron la necesidad de múltiples desarrollos técnicos, uno de los cuales urgía a los ingenieros espaciales: una fuente de electricidad para alimentar el equipo de los satélites, que fuera al mismo tiempo confiable (no es agradable invertir millones de dólares y la reputación de un país en un equipo que fallará después de un "empujoncito" para salir de la atracción de la gravedad terrestre), muy ligera (el mayor costo de poner un satélite en órbita, es el asociado a sacarlo de dicha atracción), y que funcionara durante varios años (para que valiera la pena el gasto realizado).

El "flechazo" fué instantáneo; las celdas solares cumplían con los requisitos y aun cuando su costo era alto, un esfuerzo de optimización de su eficiencia (la razón de conversión de energía solar a energía eléctrica) y su durabilidad, fue emprendido con ahínco.

Para inicios de la década de los sesentas, casi todos los satélites eran ya energizados por un pequeño sistema fotovoltaico de unos cuantos watts de potencia (menos de lo que emplea el foco con el que Ud. probablemente esté leyendo este artículo), basados en celdas formadas con de obleas de silicio de alta calidad.

Los arreglos fotovoltaicos que usaban estos satélites fueron creciendo en tamaño: desde los primeros que contaban con algunas decenas de pequeñas celdas solares (1 x 2 cm. de área eran típicas), hasta los actuales que cuentan con grandes "alas" (de varios metros cuadrados) que se despliegan para recibir los rayos solares una vez que el satélite ocupa su posición en el espacio.

Sin embargo la producción de total de celdas continuaba siendo relativamente pequeña, de sólo algunos miles de watts al año. Surgió en esta época el germen de la industria fotovoltaica, incipiente pero con sólidas bases científicas. Un pequeño grupo de compañías especializadas en tecnologías del espacio, que se podían contar con los dedos de una mano, contribuyeron con su experiencia a sentar las bases tecnológicas para la siguiente etapa: el regreso, por así decirlo, de las celdas solares a la Tierra.

- Los Soñadores "Aterrizan" Las Celdas Solares

A principios de la década de los setentas sólo un puñado de ingenieros y científicos soñaban con usar esta incipiente y minúscula tecnología en forma extensiva como fuente de energía eléctrica, compitiendo con las formas de generación tradicionales (termoeléctricas, hidroeléctricas, etc.). Una cantidad de condicionantes se interponían en su sueño: si se encontraran materiales más baratos, si se desarrollaran técnicas para la fabricación en serie, si se invirtieran más recursos en investigación, si las otras formas de generación no fueran tan baratas, si...

En 1973, el embargo en el suministro de petróleo que los países árabes impusieron a los países industrializados, actuó como detonador para borrar las condicionantes, dándoles la oportunidad a los "soñadores" de "aterrizar" sus ideas.

Presionados políticamente por la necesidad de contar con fuentes de energía alterna a los hidrocarburos, los gobiernos de los Estados Unidos, Japón y de varios países de Europa iniciaron programas vigorosos para el desarrollo y fomento de estas fuentes "no convencionales". Millones de dólares se invirtieron en investigación básica, desarrollo de tecnología y proyectos de apoyo a la industrialización. En este ambiente los sistemas fotovoltaicos, o mejor dicho, sus promotores, no tuvieron problemas para agenciarse recursos y echar a andar sus ideas.

Se establecieron objetivos a corto y mediano plazo de lo que debería hacerse en materia de avance técnico y científico, se crearon nuevas compañías, que apoyadas con el

capital de los grandes consorcios petroleros, rápidamente desplazaron a las pequeñas empresas que habían vivido de la Era Espacial (de donde los soñadores habían salido).

Los resultados no se hicieron esperar y fueron más bien espectaculares. Tan sólo en unos cuantos años:

- la industria creció, entre 1975 y 1982, de producir algunos miles de watts de celdas solares, a producir 29 millones de watts. (1)
- el precio de las celdas solares en el mismo período, decreció de $80.00 dólares por watt a $5.00 dólares por watt; ésto es, una reducción de 16 veces, aun cuando el proceso de fabricación en esencia era similar al usado en las celdas solares para el espacio. (2)
- se identificaron varias tecnologías y materiales de fabricación promisorios para lograr las reducciones de costo adicionales que se requerían para un uso realmente masivo.
- se demostró prácticamente el uso de los sistemas fotovoltaicos en una variedad de aplicaciones: equipos de telecomunicación, servicios sociales y comunitarios (clínicas de salud, TV educativa, bombeo de agua, etc.), servicio eléctrico doméstico (autónomo e interconectado a la red eléctrica), y otros. La instalación más admirable fué una planta con capacidad de 6 megawatts localizada en el Estado de California en Estados Unidos, interconectada a una red eléctrica convencional. Se demostró en 1982 que un generador eléctrico inherentemente variable a lo largo del día, como es un sistema fotovoltaico, y que de hecho genera cero electricidad en la noche, podía ser usado convenientemente para complementar el sistema eléctrico durante el pico de demanda que se presenta al mediodía en los meses de mayor calor (y de mayor insolación), en las sociedades urbanas.

1.- Estación de la Red Federal de Microondas con Sistema Solar. Agua Prieta, Son. (1986).

La Cruda Realidad

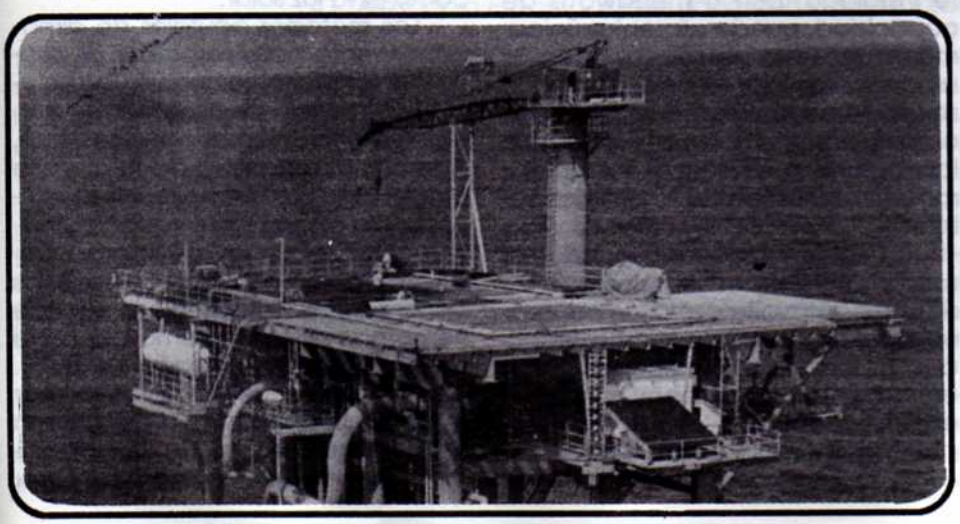
En ese momento, y en todos los aspectos (económico, tecnológico, científico e incluso político), los sistemas fotovoltaicos parecían tener un brillante futuro. Sólo se requería continuar el esfuerzo de disminución de costos para que se llegara al objetivo de los soñadores (ahora ya desplazados), de "conectar al sol" nuestras grandes sociedades hambrientas de electricidad.

Hacia mediados de la década de los ochentas, el panorama fue cambiando lenta pero inexorablemente: primero, el petróleo inció un vertiginoso descenso en su precio. Súbitamente, con la misma rapidez con la que había aparecido, desapareció el interés político por las fuentes alternas de energía, y con él, las inversiones de recursos que en ese momento habían logrado acelerar su desarrollo. Segundo, los avances tecnológicos y científicos, aunque continuaban, no habían rendido los frutos deseados en el tiempo esperado, por lo que los costos resultaban aún altos para obtener un mercado del tamaño que unos años atrás se había vaticinado.

Se sufrió entonces un proceso de retirada, que visto históricamente se puede considerar como preventivo. Aun cuando los recortes presupuestales oficiales en casi todos los países redujeron la investigación básica a mera subsistencia, y varias industrias desaparecieron o se contrajeron como consecuencia de la falta de apoyo oficial, un mercado real había ya sido creado para los generadores fotovoltaicos: sistemas autónomos en el medio no urbano y productos de consumo de muy pequeña potencia pero de alto volumen de fabricación (calculadoras portátiles, relojes, cargadores de baterías, etc.).

LA SITUACION PRESENTE

El mercado creado hasta el momento, y la perspectiva de que tarde o temprano el petróleo volverá a aumentar de precio, ha permitido que la actividad científica así como la industrial y comercial no desaparezcan, como ha sucedido con otras tecnologías. Más aún, las industrias que permanecieron en este período de cambio, han consolidado sus resultados de años de investigación y están listas para introducir la segunda generación tecnológica de convertidores fotovoltaicos: las celdas solares de película delgada. Estas celdas, a diferencia de sus antecesoras, no son obleas de material sensible, sino películas muy finas (de unas cuantas milésimas de milímetro) depositadas a partir de la descomposición de algunos productos en estado gaseoso directamente sobre un material de



2.- Plataforma Marina de PEMEX, con monitoreo alimentado por un Sistema Fotovoltaico de CONDUMEX. Sonda de Campeche. (1986).

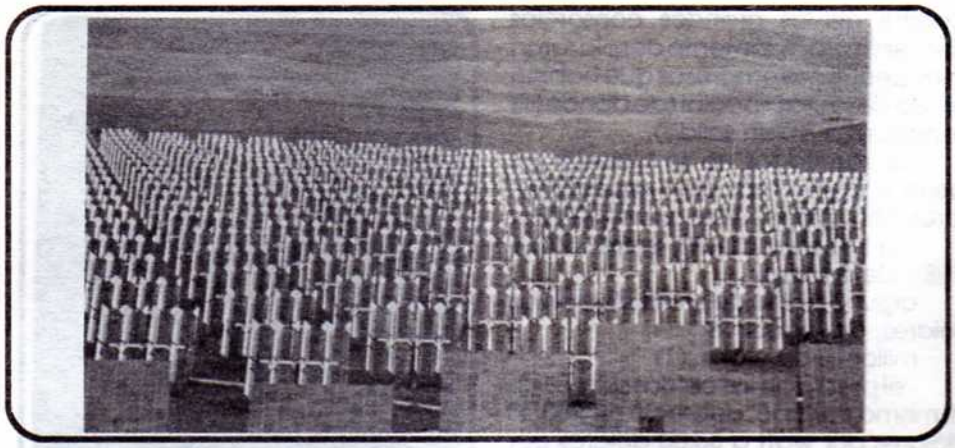
bajo costo, que les sirve de soporte (por ejemplo el vidrio y el acero inoxidable en lámina).

Esta técnica da la oportunidad de predecir menores costos en los sistemas fotovoltaicos, ya que facilita la producción masiva y ahorra material sensible.

En la actualidad, se está dando el siguiente paso: establecer plantas de producción de celdas de película delgada con gran capacidad de fabricación para lograr abatir efectivamente los costos. Actualmente, se hallan en construcción plantas cuyo total de producción duplicará el volumen de producción actual y que iniciarán operaciones en uno ó dos años más.

Un balance del estado presente en la industrialización de los sistemas fotovoltaicos muestra que (1):

- existe un mercado mundial real (sin apoyos oficiales) de 29 millones de watts al año.
- el 51% de esta producción se destina a aplicaciones remotas, donde la línea eléctrica convencional no llega. El 38% se emplea en productos de consumo como calculadoras electrónicas, relojes, luces para jardín, etc., cuyo volumen de fabricación es enorme, de millones de unidades al año, pero cuya potencia por aparato es pequeñísima, de décimas de watt.
- el volumen de ventas totales de la industria fotovoltaica alcanza los 400 millones de dólares anuales.
- Japón es lider de la industria con casi la mitad de la producción mundial, aun cuando la mayor parte de ella está dedicada a los productos de consumo. Le siguen los Estados Unidos con el 30% de la producción total, dedicada en su mayoría a las aplicaciones de potencia en el medio no urbano.
- el precio internacional promedio de venta de los páneles fotovoltaicos ha bajado a menos de $4.00 dólares por watt (en 1980 era de más de $10.00 dólares por watt).
- se espera reducir en los próximos dos años este precio a dos dólares por watt, aproximadamente, una vez que las celdas solares de película delgada estén en el mercado.
- continúa activa la investigación científica en el desarrollo de nuevos materiales y métodos de fabricación que permitan abatir los costos de las celdas solares por debajo de 1 dólar por watt. Esta actividad ha pasado de ser mayoritariamente apoyada por presupestos de gobierno (de los países desarrollados) a ser realizada principlamente en los laboratorios de las industrias.



3.- Planta Central Fotovoltaica de 6.5 Megawatts, interconectada a la Red Eléctrica. Carrisa Plains, Calif. E.U.A. (1984).

MIRANDO HACIA EL FUTURO

La Revolución Silenciosa

De la misma forma en que las celdas fotovoltaicas convierten la luz del Sol en electricidad en total silencio, así harán su aparición calladamente y sin fanfarrias como una fuente de energía comercialmente viable. La revolución no es notable pero existe: decenas de millones de personas usan calculadoras o relojes alimentados por la luz. Miles de gentes en todo el mundo viven en casas rurales iluminadas por sistemas fotovoltaicos. Y millones de comunicaciones telefónicas de larga distancia son posibles gracias a equipos alimentados por generadores solares.

Sin embargo, ésto es sólo el comienzo, ya que la estación de generación más grande actualmente instalada, con 6 megawatts de capacidad, puede alimentar únicamente unos cuantos cientos de casas urbanas. Con lo anterior, es obvio que se requiere recorrer todavía un largo camino para cumplir con el sueño de los hombres que hace 15 años iniciaron el "aterrizaje" de las celdas solares.

La siguiente década puede ser muy importante en el futuro de los sistemas fotovoltaicos. Nuevas tecnologías harán su aparición, las fábricas actualmente en construcción entrarán en operación, y la consecuente reducción de costos ampliará los mercados actuales.

Si todos los esfuerzos (técnicos, económicos, políticos y comerciales) se conjugan, es muy posible que iniciemos el siglo XXI totalmente familiarizados con esta tecnología, como ahora lo estamos con la hidroeléctrica o la nucleoeléctrica.

Aun cuando no todos los objetivos fueran cumplidos, los generadores fotovoltaicos tienen asegurada la existencia por sus propios méritos. Cuando mucho la tecnología tendría que volver a enconcharse durante algunos años, hasta que el siguiente desarrollo técnico o científico, o una nueva crisis en los combustibles fósiles, la reconsideraran una vez más como la fuente de energía idónea.

Hacia el Siglo XXI

Seguramente el mayor reto que enfrentan los sistemas fotovoltaicos a largo plazo, no es solamente el de bajar los costos a niveles competitivos con generadores de energía electrica tradicionales, sino obtener un suministro constante a partir de una fuente de naturaleza tan variable como es la luz solar.

Los métodos acutales de almacenamiento para respaldar al generador fotovoltaico cuando la insolación es insuficiente o inexistente, son simplemente demasiado costosos. Además la magnitud de la energía que se requiere almacenar hace impensable esta alternativa. El concepto técnico más innovativo para evitar esta limitación, es la idea de poner los generadores fotovoltaicos donde siempre reciban la misma cantidad de insolación: en el espacio exterior. Ahí, enormes arreglos fotovoltaicos se ensamblarían en una plataforma espacial que orbitaría la Tierra, manteniendo su posición sobre un lugar

predeterminado. Así, convertirían la luz solar en electricidad constantemente, ya que ahí no existen ciclos día-noche o condiciones climáticas adversas. La electricidad se convertiría a su vez en microondas y sería dirigida en un haz desde la plataforma a 35,000 kilómetros de la Tierra, hacia una antena terrestre donde sería recibida y convertida nuevamente a electricidad. Por ejemplo, una plataforma con 65 kilómetros cuadrados de arreglos fotovoltaicos podría entregar a la Tierra posiblemente 10,000 megawatts de energía eléctrica. Con únicamente cuatro de estos satélites se podría abastecer el consumo eléctrico nacional en su totalidad.

Por supuesto en la actualidad un proyecto de tal magnitud es casi ciencia-ficción, pero al menos toda la base científica y muchos de los desarrollos técnicos necesarios existen ya; así que no es imposible ni demasiado remoto el día en que la luz que nos ilumina en las noches, provenga directamente de la atrapada en el espacio por un satélite artificial. ¿Difícil de creer? Posiblemente, pero si hace 30 años Ud. hubiera sugerido que exisitrían computadoras del tamaño de la palma de su mano, su idea no habría tenido gran aceptación.

EL PANORAMA EN MEXICO

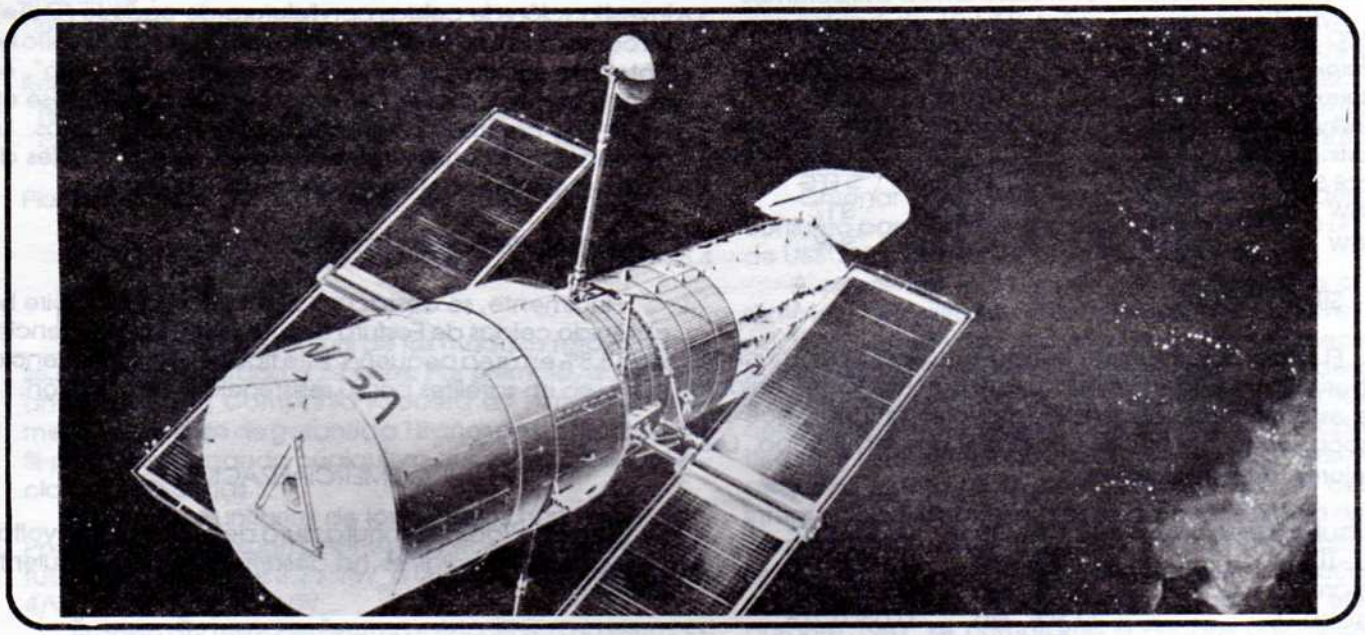
En forma sorprendente, para un tecnología que es más bien incipiente, en nuestro país se ha generado una apreciable actividad, tanto científica como técnica y comercial, alrededor de los sistemas fotovoltaicos. Los primeros trabajos se remontan a 1966, cuando el Centro de Investigaciones del IPN fabricó en laboratorio, la primera celda solar mexicana. Hacia mediados de la década de los setentas, tanto el IPN como la UNAM contaban ya con investigadores y laboratorios dedicados al desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica. A principios de la década de los ochentas se estableció inclusive una planta piloto de fabricación de celdas solares con obleas de silicio en los laboratorios del IPN.

Sin embargo, la apertuara de los mercados nacionales a la competencia internacional y el no contar con los recursos financieros millonarios que los países desarrollados asignaron al desarrollo fotovoltaico la pasada década, impidieron el establecimiento de una industria nacional integrada verticalmente, ésto es, que fabricara desde las obleas de silicio hasta la instalación del sistema completo. A pesar de ello, se formaron recursos humanos calificados para enfrentar el reto de absorber e integrar la tecnología a las condiciones de nuestro país, siempre y cuando un programa coherente de desarrollo de fuentes alternas de energía se lleve a cabo.

En el lado comercial, las aplicaciones actuales son principalmente en telecomunicaciones y para servicios eléctricos básicos en casas habitación del medio rural. El uso de generadores fotovoltaicos para bombear agua poco a poco ha ido creciendo. El tamaño del mercado nacional en el contexto mundial, es más bien pequeño (0.3% del total), pero mantiene tasas de crecimiento anual altas, del orden del 30 al 40 % que en comparación al 3% de crecimiento mundial, hacen pensar que nuestra participación puede llegar a ser importante en unos cuantos años.

Al menos una compañía nacional importante en el sector eléctrico como es Condumex, ha tomado ya el reto del desarrollo local de experiencia práctica, tanto técnica como comercial, en espera del momento en que las condiciones de entorno a los sistemas fotovoltaicos permitan su industrialización intensiva.

La Revolución Silenciosa avanza lenta pero implacablemente. El futuro es de quien lo tome ahora.



4.- Telescopio Espacial Alimentado con Caldas Solares. NASA, E.U.A.

REFERENCIAS:

(1)PHOTOVOLTAICS INSIDER'S REPORT. Dallas, Texas, February 1988, July 1987, February 1987.

(2)Maycock and Stirewalt. "A GUIDE TO PHOTOVOLTAIC REVOLUTION", Rodale Press, Emmaus, PA. USA., 1985.

---

* Ing. en Electrónica, Area de Energía Solar, CONDUMEX.

TENDENCIAS EN INVESTIGACION Y COMERCIALIZACION DE CELDAS SOLARES

Por MANUEL MARTINEZ *

La investigación en celdas solares se está desarrollando básicamente alrededor de cinco materiales: silicio, tanto monocristalino como policristalino y amorfo, arsenuro de galio, cobre/indio/selenio, telururo de cadmio y fosfuro de indio.

Silicio cristalino

Con silicio, tanto monocristalino como policristalino, se continúa la investigación en celdas del tipo de homounión. Los mejores resultados obtenidos son:

Marca	Eficiencia	Tamaño muestra	Material
ARCO	15.0%	106.5 cm^2	Si Cz
Solarex	13.8%	130.0 cm^2	Si-poli
Solarex	15.3%	8.0 cm^2	Si-poli
Westinghouse	14.7%	24.5 cm^2	Si dendritic-web
Westinghouse	16.7%	1.0 cm^2	Si dendritic-web
Mobil Solar	14.5%	44.4 cm^2	Si EFG
UNSW	20.6%	12.0 cm^2	Si FZ
UNSW	19.6%	45.7 cm^2	Si FZ

Silicio amorfo

El silicio amorfo sigue siendo estudiado por muchos laboratorios. Existen veintidós que han fabricado celdas de este tipo con eficiencias mayores al 10%: trece en Japón, ocho en Estados Unidos y uno en Europa. Los mejores resultados son:

Mitsui-Toatsu	12.0%	en	0.090 cm^2
SEL-TDK	12.0%	en	1.050 cm^2
Solarex	11.9%	en	0.260 cm^2
Osaka U.	11.9%	en	0.030 cm^2
ECD	11.8%	en	1.000 cm^2
Sanyo	11.7%	en	1.000 cm^2
Fuji	11.7%	en	1.000 cm^2

Arsenuro de Galio

El arsenuro de galio sigue teniendo el record de eficiencia, tanto en celdas sencillas como en tandem con celdas de otros materiales. Se espera que su utilización será en aplicaciones espaciales, o terrestres en sistemas con concentración de la radiación solar mediante espejos, para aprovechar mejor su alta eficiencia. Los laboratorios Sandia han obtenido el record mundial de eficiencia, 31.0% con una celda tandem de GaAs/Si de 0.317 cm^2, a una concentración de 350 a 500 soles. En relación a celdas sencillas, Varian tiene la mayor eficiencia con 29.2% bajo concentración de 206 soles y es seguida por Spire con 25.4% bajo concentración de 200 soles, ambas en áreas pequeñas.

Cobre/indio/selenio

Las celdas de cobre/indio/selenio, $CuInSe_2$, han sido investigadas con gran éxito por ARCO, quien para áreas de 990 cm^2 obtuvo 11.1% y en áreas de 3.3 cm^2 12.9% de eficiencia. También, en celdas tandem de Si-a:H/$CuInSe_2$ tienen la mejor eficiencia al haber obtenido 13.7%, en áreas pequeñas.

Telururo de cadmio

Se han obtenido avances importantes en la investigación de celdas con telururo de cadmio (CdTe). La compañía Amtek al fabricarlas por electrodepósito ha obtenido eficiencias del 11%. Estas son el tipo "nip", en donde la n es CdS, i es CdTe y p es ZnTe, habiéndose estabilizado contra la degradación por los contactos. La compañía Photon Energy obtuvo en celdas simples de CdTe eficiencias del 6% en áreas de 1000 cm^2.

Fosfuro de indio

Finalmente, se destacará que la compañía Spire ha obtenido celdas de Fosfuro de Indio (InP) con eficiencias del 18.8% en área pequeña. Este tipo tiene gran potencial para uso en satélites por su resistencia a la radiación.

COMERCIALIZACION

La actividad de manufactura de módulos fotovoltaicos, a nivel mundial, se ha desarrollado de la siguiente manera:

En 1986 ..... 26.1 MW_{pico}/año,
en 1987 ..... 29.1 MW_p/año y
en 1988 se estima entre 32 y 35 MW_p/año.

Los embarques totales de celdas y módulos para aplicaciones terrestres han aumentado poco de 1983 a 1987, aunque existen marcados cambios en las regiones que producen los dispositivos, en las tecnologías producidas y en los sectores económicos que reciben los embarques.

Los embarques por región han sido, en MW_p:

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	198
USA	2.5	3.5	5.2	12.7	11.5	7.7	7.6	8.1
Japón	0.5	1.1	1.7	4.3	6.2	8.1	11.3	10.9
Europa	0.3	0.8	1.4	3.3	3.3	3.5	4.0	4.5
Otras	-	-	0.1	0.5	0.6	1.2	1.7	1.9
	3.3	5.4	8.4	20.8	21.6	20.5	24.7	25.4

La distribución de embarques por tecnología ha sido, en MW_p:

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Si mono	1.9	2.5	4.5	9.9	9.6	9.9	12.1	10.5
Si poli	1.0	1.3	2.1	3.2	4.5	4.5	4.2	5.8
Si amorfo	0.3	0.6	0.8	3.0	4.3	5.8	8.2	8.9
Conc.	0.0	0.9	0.9	4.6	3.1	0.1	<.1	<.1
Listón y otras	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	<.1
	3.3	5.4	8.4	20.8	21.6	20.5	24.7	25.4

Los embarques según el mercado de uso final han sido, en MW_p:

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Sistemas Autónomos	2.6	3.9	4.3	7.4	10.2	11.0	12.5	14.6
Productos Electrónicos	0.4	0.9	1.5	3.6	4.9	6.7	9.3	9.5
Red								
residencial	0.0	<.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1
comercial	0.3	0.6	0.7	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4
Planta Central	0.0	0.0	1.8	8.6	5.5	1.9	2.0	0.8
	3.3	5.4	8.4	20.8	21.6	20.5	25.0	25.4

Los tiempos de vida útil de los módulos fotovoltaicos se han incrementado a 20 años. Por ejemplo, durante el año pasado la Compañía Kyocera de América incrementó el período de garantía a 12 años de sus módulos de Si-poli, reemplazando cualquiera que reduzca su potencia por 10% ó más.

Los precios unitarios de los módulos han disminuido. Por ejemplo, las exportaciones de Estados Unidos en 1987 fueron las siguientes: 3.23 MW_p a US$ 5/W_p, 3.86 MW_p a US$ 4/W_p y 2 MW_p a US$ 3/W_p.

El costo del resto del sistema fotovoltaico ha permanecido constante los últimos años. El almacenamiento de energía sigue siendo de 100-150 US$/kWh útil a 30-35 US$/kWh útil, ya sean baterías de plomo-ácido o rebombeo hidráulico, respectivamente. El costo de los inversores sigue estando alrededor de US$ 550/kW.

Los ingresos de la industria fotovoltaica han decrecido a US$ 360 millones en 1987, de US$ 380 millones en 1986, ya que el precio unitario ha decaído más rápidamente que el aumento en los embarques. Sin embargo, la inversión acumulada para investigación y desarrollo en los últimos años, a nivel mundial, es del orden de tres mil millones de dólares.

La Compañía ARCO considera que su tecnología actual de celdas sencillas de $CuInSe_2$ puede producir electricidad a un costo de 13 centavos de dólar por kWh. Sin embargo, el mayor esfuerzo se está dedicando a silicio amorfo, que a nivel comercial tiene los siguientes resultados:

ARCO	7.8%	en	4700 cm^2
ARCO	12.3%	en	843 cm^2
Fuji	8.6%	en	1200 cm^2
Solarex	8.0%	en	1000 cm^2
Chronar	6.4%	en	930 cm^2
Fuji	6.3%	en	4880 cm^2
ECD	5.1%	en	4110 cm^2

La Compañía Chronar informó que el costo directo actual de manufactura de sus módulos de Si amorfo es de US$ 1/W_p, mientras que la Compañía Solarex considera que con su tecnología actual de silicio amorfo, si pudiera fabricar 10 MW_p/año, su costo sería de US$ 1.15/W_p.

Algunos de los proyectos actuales más importantes son:

- Solarex está construyendo una planta de celdas de Si amorfo con capacidad de producción de 10 MW_p por año.

-Glasstech aprobó la construcción de una planta ensambladora de módulos fotovoltaicos de Si amorfo, con capacidad de 10 MW_p/año. Los primeros 5 MW_p serán usados para construir un sistema fotovoltaico que estará conectado a la red de la Compañía Toledo Edison.

-El Gobierno de la India aprobó un contrato con Sovonics (filial de ECD) para montar una planta que fabrique 3 MW_p/año de módulos de Si amorfo.

-Chronar y SeaWest Industries firmaron un desarrollo conjunto para instalar una central de 50 MW_p, a un costo de US$ 125 millones, en el sur de California.

A pesar del éxito y grandes perspectivas que los sistemas fotovoltaicos han demostrado a nivel internacional, en México todavía no se ha establecido un programa serio que apoye la investigación, el desarrollo y la utilización masiva de esta tecnología. El 90% de los conocimientos necesarios para fabricar los módulos se tienen a nivel nacional. El CINVESTAV del IPN tiene una pequeña planta piloto para la fabricación de celdas e integración de módulos a base de la tecnología de silicio monocristalino. Sin embargo, toda esta infraestructura no se ha traducido en una industria fotovoltaica nacional, y en consecuencia se importan módulos; por ejemplo, durante 1987, se compraron a Estados Unidos un total equivalente a US$ 520,000.

REFERENCIAS

Photovoltaics Insiders Report, varios números, 1988.

International Solar Energy Intelligence Report, varios números 1988.

* Físico, PhD, Investigador del Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Investigación en Materiales, UNAM, Apdo. Postal 34, Temixco, Mor. 62580.

AUXILIO VIAL CON ENERGIA SOLAR

Ciento ochenta y cuatro teléfonos "SOS" operados con energía solar prestan un valiosos servicio en las modernas carreteras nacionales y ayudan a salvar vidas.

Por: JORGE M. HUACUZ V.

dos los automovilistas estamos sujetos a la posibilidad de sufrir percances en carreteras: ponchaduras, descomposturas, e incluso accidentes. Cuando esto ocurre la situación puede tornarse traumática, especialmente en caminos poco transitados o en medio de la noche. Hace todavía pocos años no quedaba más que esperar a que algún automovilista bondadoso se detuviera a prestar auxilio. Esta situación está cambiando dramáticamente en las principales carreteras del país, gracias a las celdas fotovoltaicas. Un total de 184 teléfonos de auxilio vial, operados con energía solar, funcionan día y noche en las carreteras a cargo de Caminos y Puentes Federales de Ingresos (CPFI), organismo descentralizado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Pequeños páneles fotovoltaicos de 10 ó 25 watts de potencia (dependiendo del modelo) convierten la luz solar en electricidad para recargar una batería automotríz de 60 amperes hora y 12 volts. En caso de emergencia, el usuario enciende el sistema y se comunica telefónicamente al Departamento de Radio de CPFI. De ahí, su mensaje es turnado de inmediato al Departamento de Servicios Médicos, a la Cruz Roja, a la Policía Federal de Caminos, o a distintas asociaciones de auxilio automovilistico, según el caso. El sistema permanece encendido por un máximo de cinco minutos durante la transmisión y se apaga automáticamente para ahorrar energía, garantizando de esta manera la disponibilidad del teléfono durante las 24 horas del día.

El programa de instalación de teléfonos SOS se inició en 1983, y desde entonces cientos de automovilistas en desgracia han recibido auxilio y se han logrado salvar muchas vidas. Estos teléfonos se encuentran ubicados cada tres kilómetros a lo largo de carreteras: 34 en la autopista México-Querétaro, 33 en la México-Puebla, 27 en la México-Pachuca, 29 en la Tijuana-Ensenada, 19 en la México-Cuernavaca, 30 en el camino Cuernavaca-Iguala, y 12 en el tramo La Pera-Cuautla. Según el Ing. Eduardo Bernal Castañón, Jefe del Departamento de Radio de CPFI, el proyecto ha sido todo un éxito. Y más aún, ha sido una experiencia valiosa en el proceso de adaptación de la tecnología fotovoltaica. Todos los sistemas instalados hasta ahora han sido diseñados por personal técnico del propio Departamento de Radio de CPFI, e integrados con componentes comerciales. Las celdas fotovoltaicas son de importación (Solavolt y ArcoSolar), pero el resto de los componentes son de fabricación nacional. Los primeros sistemas experimentales que construyeron utilizaban pequeños radio tipo portátil de 5 watts de potencia. En la actualidad utilizan radios de 25 watts y estaciones repetidoras. Los diseños de la generación actual están ya prácticamente estandarizados, lo que constituye una muestra de la ingeniería solar nacional. Los sistemas son altamente confiables, pero cuando se presentan fallas, éstas por lo general ocurren en las baterías. El uso de baterías automotrices ha sido preferido a otras alternativas (Niquel-Cadmio por ejemplo) dado su menor costo de reposición y mantenimiento y la disponibilidad en el mercado nacional.

El programa de modernización de la red nacional de carreteras ensancha el horizonte para la aplicación de sistemas fotovoltaicos. De acuerdo con el Ing. Bernal, el programa incluye no sólo la instalación de más teléfonos SOS en otras carreteras, sino la modificación de los ya instalados para adecuarlos a una red computarizada que efectuará de manera automática el monitoreo y control de las unidades, y llevará una estadística de la operación de la red. Esto significará incrementar la potencia de los paneles fotovoltaicos. También se contempla el uso de celdas para iluminación de señalamientos en tramos peligrosos o complicados de las carreteras. Se espera que una vez iniciado el programa se estén instalando alrededor de 100 paneles fotovoltaicos por año. Esto trae aparejado el proyecto de continuar efectuando la ingeniería de los sistemas dentro de CPFI, incrementar el grado de integración nacional de los equipos y estandarizar los diseños.

La próxima vez que viaje por estas carreteras recuerde que la energía solar está ahí para ayudarle.

Red Solar

Ingeniería, Diseño, Distribución
e Instalación de Equipos y
Sistemas Solares; Fotovoltáicos
y Fototérmicos

¡Llámenos e
Intégrese a la Red
de concesionarios!

Red Solar Hermosillo Aguascalientes No. 174, Col. San Benito C.P. 83190.
Hermosillo, Sonora. Tel. (621) 55462 Fax. 73994

Red Solar Cuernavaca Atlacomulco No. 418 . Acapantzingo C.P. 62430.
Cuernavaca, Morelos. Tel. (73) 140882 Fax.123607

Red Solar Cuicuilco Insurgentes Sur esq. San Fernando Tlalpan, México D.F.
Parque ecológico "Manantial de Peña Pobre". Tel. (5) 5896137 Fax. 5468424

Grupo General Solar

SOLARMEX, S.A.

PTE. 148. No. 519 INDUSTRIAL VALLEJO
TEL. 368-13-44 ó 55

FABRICANTE DE CALENTADORES SOLARES

PARA USO: DOMESTICO

INDUSTRIAL

ALBERCAS

HOTELES

LOS CALENTADORES SOLARES AHORRAN COMBUSTIBLE, NO CONTAMINAN, SU MANTENIMIENTO ES MINIMO Y SE AMORTIZAN A CORTO PLAZO

Instale un calentador solar SUNWAY™ para:

- *Uso Doméstico.*
- *Calefacción de Albercas.*
- *Hoteles, etc...*

Colectores 100% de cobre.

Tels. *686-9470*
395-0041

Con 25 años de experiencia en la fabricación de

CALENTADORES SOLARES

le ofrece para su ■CASA ■ALBERCA ■HOTEL ■INDUSTRIA

* Absorbedores solares 100% de cobre
* Calentadores de agua hasta 100ºC
* Colectores solares planos para agua y aire
* Colectores solares con 1 y 2 cubiertas
* Proyectos de sistemas de captación de energía solar
* Secadores
* Destiladores
* Calefacción

INSTALACIONES TECNICAS ESPECIALIZADAS S. A.

Bahía de Chachalacas # 42-1 Col. Veronica Anzures 11300 México, D.F.

(TELS) **545.11.51 545.08.33 203.96.98** (FAX) **255.25.84**