



Sistemas Fotovoltaicos



Por Ing. Nicasio Echarte del Sol, Especialista C en Telemática, Energético CSGT Villa Clara, e Ing. Emilio Ramón Cabrera Fernández, Especialista C en Telemática, Energético CSGT Cienfuegos, ETECSA
nicasio.echarte@etecsa.cu, emilio@cfg.etecsa.cu

Introducción

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 y las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880. Sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de sólo 1 %; ya, para 1954, se había logrado incrementar la eficiencia al 6 % en condiciones normales de operación, mientras, en el laboratorio, se lograron eficiencias cercanas al 15 %. Las primeras aplicaciones prácticas se hicieron en satélites artificiales. En 1958 fueron utilizadas para energizar el transmisor de respaldo del Vaguard 1, con una potencia de cinco mili-watts. Desde entonces, las celdas fotovoltaicas han proporcionado energía prácticamente a todos los satélites artificiales, incluyendo el Skylab.

En la actualidad están siendo usadas comúnmente alrededor del mundo para aplicaciones agroindustriales como el bombeo de agua, refrigeración, preservación de productos perecederos, desalación de agua, repetidores de radio y televisión, viviendas, edificios, iluminación de avenidas, escuelas, consultorios médicos y otros.

En 1982 se construyó la primera planta fotovoltaica de potencia, con una capacidad de 1MW. Esta planta generaba suficiente electricidad para satisfacer las necesidades de 300 a 400 casas-habitación en su zona de servicio. Después, se instaló otra planta fotovoltaica de potencia con una capacidad de 6,5 MW, energía eléctrica suficiente para abas-

tecer las necesidades de más de 2,300 casas típicas en el área.

Las celdas solares fotovoltaicas son dispositivos que convierten la luz solar directamente en electricidad, sin necesidad de equipos mecánicos. Las celdas solares están hechas de delgadas capas de material semiconductor, usualmente silicio, están unidas a contactos de metal para completar el circuito eléctrico y encapsuladas en vidrio o plástico.

La forma más popular de arreglo fotovoltaico está hecha de paneles planos y puede responder a la luz difusa del cielo —puede producir electricidad aun en días nublados, aunque su rendimiento disminuye—. Los paneles fotovoltaicos planos pueden estar fijos en un soporte o moverse para seguir la trayectoria del sol [1].

En Cuba, se comenzó en 1986 con un programa de electrificación rural para médicos de la familia con sistemas fotovoltaicos independientes. Este programa tuvo un gran impacto social y permitió estudiar el comportamiento de los sistemas centralizados para uso comunitario, además de conocer el funcionamiento de estos sistemas en condiciones de clima tropical, el efecto de la alta temperatura —aspecto de especial interés para lograr la efectividad de futuras inversiones en el campo de la energía renovable y, en particular, la fotovoltaica [2].

Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas. Sin embargo, el costo de energía eléctrica para hacer funcionar estos sistemas y el alto costo de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. La utilización de los Sistemas Fotovoltaicos (FV) —del inglés, *Photovoltaic Systems* (PV)—

ha permitido solucionar una serie de problemas presentados en la Empresa en la expansión y modernización de la red de telecomunicaciones, sobre todo, en la Red Inalámbrica de Área Local —del inglés, *Wireless Local Area Network* (WLAN)—, la Terminal de Red Inalámbrica —del inglés, *Wireless Network Terminal* (WNT)— y los Sistemas Móviles Celulares.

Funcionamiento FV

La producción de la energía eléctrica a partir del sol está basada en el fenómeno físico denominado “efecto fotovoltaico”, que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas con silicio puro, uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena con adición de impurezas de ciertos elementos químicos —boro y fósforo—. Cada célula es capaz de generar una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,58 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las células se agrupan en serie de 10 a 36, formando los paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota); y la otra parte, debido a la transmisión —atraviesa la célula—.

Esta energía es recogida y conducida hasta un controlador o regulador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hacia el banco de baterías que es el lugar donde es almacenada, y donde se tiene el cuidado de no excederse en los límites de sobrecarga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas.

La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; en cambio, si las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías —limitada por el controlador— es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna.

Cada célula fotovoltaica está compuesta por dos láminas de silicio delgadas —u obleas—, *P* y *N*, separadas por un semiconductor. Los fotones procedentes de la fuente luminosa inciden sobre la superficie de la capa *N* y, al interactuar con el material, liberan electrones de los átomos de silicio, los cuales, en movimiento, atraviesan la capa de semiconductor, pero no pueden volver. La capa *N* adquiere una diferencia de potencial respecto a la *P*. Si se conectan unos conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un dispositivo o elemento eléctrico consumidor de energía, se iniciará una corriente eléctrica continua —los electrones se mueven siempre en el mismo sentido y de los potenciales más bajos a los más altos—. Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. En la figura 1, se muestra el efecto fotovoltaico en una célula [3].

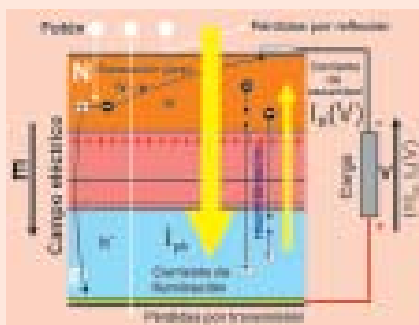


Figura 1 Efecto fotovoltaico en una célula solar [4]

Un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células solares conectadas eléctricamente entre sí, en serie y paralelo, hasta conseguir el voltaje y la corriente adecuados para su utilización. En la figura 2, puede observarse un corte transversal de un panel fotovoltaico; y en la figura 3; una vista frontal del mismo.



Figura 2 Corte transversal de un panel fotovoltaico [4]

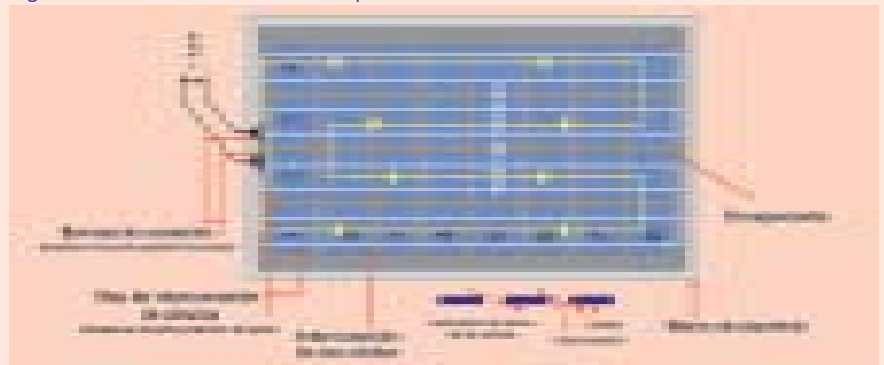


Figura 3 Vista frontal de un panel fotovoltaico [4]

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas de silicio **monocristalino, policristalino o amorfas**. La diferencia entre ellas radica en el procedimiento de fabricación. Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro, que se refunde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro. Una vez que el material se encuentra en estado líquido se le introduce una varilla con un **crystal germen** de silicio, que vuelve a crecer con nuevos átomos procedentes del líquido, y quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal. De esta forma se obtiene una monocristal dopado, que luego se corta en obleas de aproximadamente 3 décimas de milímetro de grosor.

Estas obleas se introducen después en hornos especiales, dentro de los cuales se difunden átomos de fósforo que se depositan sobre una cara y alcanzan una cierta profundidad en su superficie. Posteriormente, y antes de realizar la serigrafía para las interconexiones superficiales, se recubren con un tratamiento antirreflexivo de bióxido de titanio o zirconio.

En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas.

Las células amorfas —*a=sin, morfo=forma*—, como su nombre lo indica, no poseen una estructura cristalina. Precisamente esa simplificación en la estructura conduce a un abaratamiento drástico de las mismas. La eficiencia de un panel es mayor cuanto mayor son los cristales; pero, también, su peso, grosor y costo. La tabla 1 refleja la eficiencia de cada panel FV según el tipo de célula con que está confeccionado.

Tipo Panel	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
Monocrystaliano	24 %	15-18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky)	Se obtiene de silicio puro fundido y se dopa con boro
Policristalino	19 - 20 %	12-14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos de azules	Igual que el del monocrystalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización
Amorfás	16 %	<10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible en células	Tiene la ventaja de depositarse en forma de láminas delgadas y sobre sustrato como vidrio o plástico

Tabla 1 Eficiencia de cada tipo de panel FV según los tipos de células [4]

La producción de electricidad varía linealmente a la luz que incide sobre el panel; un día enteramente nublado equivale aproximadamente a un 10 % de la intensidad total del sol, y el rendimiento del panel disminuye en proporción a este valor.

El rendimiento de un panel fotovoltaico depende de la intensidad de la radiación luminosa y de la temperatura de las células solares [3].

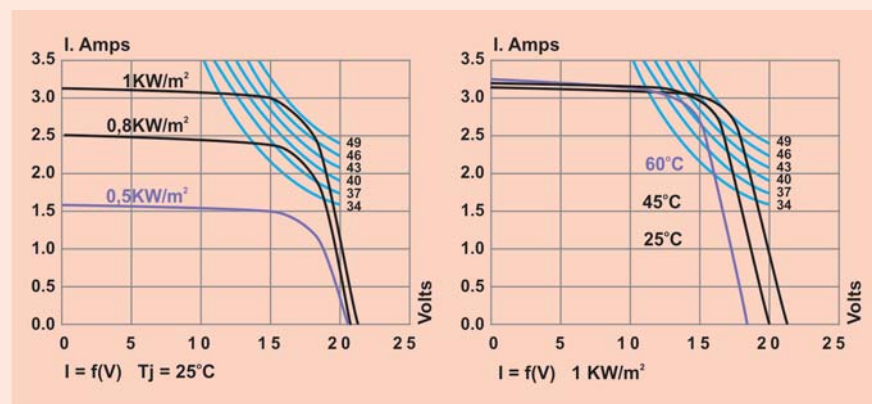


Figura 4 Variación de intensidad y tensión con la radiación y la temperatura según potencia nominal [1]

En la figura 4 se puede observar cómo la intensidad de corriente que genera el panel aumenta con la radiación, y el voltaje permanece aproximadamente constante. En este sentido, tiene mucha importancia la colocación de los paneles —su orientación e inclinación respecto a la horizontal—, porque los valores de la radiación varían a lo largo del día en función de la inclinación del sol respecto al horizonte.

El aumento de temperatura en las células supone un incremento en la corriente; pero, al mismo tiempo, una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Una radiación de 1,000 W/m² es capaz de calentar un panel unos 30 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que reduce la tensión en 2 mV/(célula*grado) * 36 células * 30 grados = 2,16 Voltios y, por lo tanto, la potencia en un 15 %. Por ello, es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien ventilados. En condiciones ideales el rendimiento del sistema puede mejorar hasta un 40 %, no obstante

el mayor costo que supone no compensa el aumento que se consigue. Su aplicación se limita a aquellos casos en que el mayor rendimiento coincide con la mayor demanda —es el caso de sistemas de bombeo para el ganado en regiones muy secas—.

La intensidad de la luz solar que alcanza nuestro planeta varía según el momento del día y del año, el lugar y las condiciones climáticas. La energía total registrada sobre una base diaria o anual se denomina ‘radiación’ e indica la intensidad de dicha luz. La radiación se expresa en Wh/m² por día o, también, en kWh/m² por día.

Con el fin de simplificar los cálculos realizados en base a la información sobre radiación, la energía solar se expresa en equivalentes a horas de luz solar plena. La luz solar plena registra una potencia de unos 1,000 W/m²; por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a 1 kWh/m² de energía.

Esta es, aproximadamente, la cantidad de energía solar registrada durante un día soleado de verano, con cielo despejado, en una superficie de un metro cuadrado, colocada en perpendicular al sol.

La radiación varía según el momento del día. Sin embargo, también puede variar considerablemente de un lugar a otro, especialmente en regiones montañosas. La radiación fluctúa entre un promedio de 1,000 kWh/m² al año, en los países del norte de Europa —tales como Alemania—, y 2,000 a 2,500 kWh/m² al año, en las zonas desérticas. Estas variaciones se deben a las condiciones climáticas y a la diferencia con respecto a la posición relativa del sol en el cielo elevación solar, la cual depende de la latitud de cada lugar —orientación y ángulo de inclinación— [4].

Para establecer las dimensiones de los sistemas FV, es necesario conocer la insolación diaria promedio, preferiblemente para cada mes del año. La insolación diaria promedio comúnmente se expresa en Horas Solares Pico —del inglés, *Peak Sun Hour* (HSP)—. Una hora solar pico es

la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de 1 kW/m². Es decir, 1kW-h/m² es igual a 1 HSP. En la figura 5, puede observarse más fácilmente este concepto. No se debe confundir las HSP con las “horas luz”, que corresponden a la duración del día. Las HSP son relevantes para el diseño de sistemas FV. La insolación diaria promedio varía entre 3 y 7 HSP dependiendo del lugar.

La potencia pico de un panel es la potencia de salida, en Watts, que produce un panel fotovoltaico en condiciones de máxima iluminación solar, con una radiación de aproximadamente 1 kW/m² —que se produce en un día soleado al mediodía solar— [5].

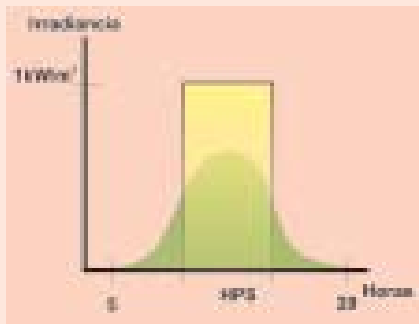


Figura 5 Definición de HSP [6]

Orientación de los paneles FV

La luz solar viaja en línea recta desde el Sol hasta la Tierra. Al penetrar a la atmósfera terrestre, una parte se dispersa y otra cae sobre la superficie en línea recta. Finalmente, una última parte es absorbida por la atmósfera. La luz solar dispersa se denomina radiación difusa o luz difusa. La luz del sol que cae sobre la superficie sin dispersarse ni ser absorbida es, por supuesto, radiación directa. Debido a los baños de sol y al trabajo al aire libre, la radiación directa es la más intensa.

Un panel solar genera electricidad, incluso, en ausencia de luz solar directa. Sin embargo, las condiciones óptimas de operación implican: la

presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el Sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz solar directa. En el Hemisferio Norte, el panel deberá orientarse hacia el Sur y en el Hemisferio Sur, hacia el Norte; en nuestro caso para el Sur.

Angulo de inclinación e incidencia

El ángulo de inclinación (α) es el formado entre la superficie colectora y la horizontal del lugar (Figura 6). Para un valor dado del ángulo de inclinación, dependiendo de la posición del sol sobre el horizonte, existirá un valor para el ángulo de incidencia (β) que forma la perpendicular a la superficie de colección con los rayos incidentes.

Es preferible dar al ángulo de inclinación (α) un valor igual al de la latitud del lugar más 10 ó 15° —posición favorable para el invierno—, y aceptar una pequeña pérdida energética durante el verano [5], [7].

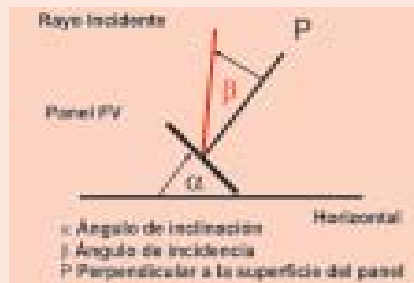


Figura 6 Ángulo de inclinación y de incidencia [5]

Elementos de un Sistema FV

Un sistema fotovoltaico consta principalmente de los siguientes elementos:

♦ **Un generador solar:** compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captan la radiación luminosa procedente del Sol y la transforman en corriente continua a baja tensión (12, 24 ó 48 V) [8].

♦ **Un acumulador:** los acumuladores o baterías tienen una doble función, deben proveer de potencia a la carga cuando no haya luz solar disponible, y amortiguar las varia-

ciones de energía; la función de los paneles solares es recargar diariamente estas baterías o acumuladores. El tipo de acumuladores utilizados en los arreglos fotovoltaicos son los llamados de ciclo profundo, pueden ser como los tradicionales de plomo ácido o las baterías selladas libres de mantenimiento. No deben emplearse acumuladores automotrices porque no están diseñados para este propósito. Los acumuladores de ciclo profundo para los sistemas fotovoltaicos están diseñados para ser descargados lentamente durante muchas horas, sin ser recargados completamente por varios días o semanas, sin que por ello sufran daños y se reduzca su vida útil [9]-[12].

♦ **Un regulador de carga:** su misión es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, que le produciría daños irreversibles, y asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia [13]-[16].

♦ **Un inversor (opcional):** los inversores transforman la corriente continua en corriente alterna. La corriente continua produce un flujo de corriente en una sola dirección, mientras que la corriente alterna cambia rápidamente la dirección del flujo de corriente de una parte a otra. Cada ciclo incluye el movimiento de la corriente primero en una dirección y luego en otra. En la figura 7 se muestran las tres formas de onda que puede entregar un inversor [17, 18].

La corriente alterna suministrada por una compañía eléctrica o por un gene-

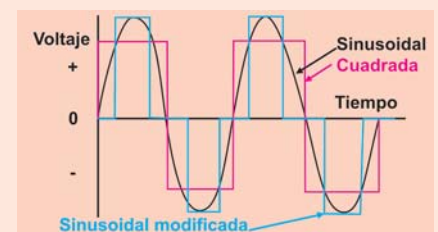


Figura 7 Diferentes formas de onda en corriente alterna [1]

rador diesel o gasolina es —o debería ser— como la que se muestra en la figura 7 en color negro. Los cambios en la magnitud de la tensión siguen una

ley sinusoidal, de forma que la corriente también es una onda senoidal.

La conversión de corriente continua en alterna puede realizarse de diversas formas. La mejor manera depende de cuánto ha de parecerse a la onda sinusoidal ideal para realizar un funcionamiento adecuado de la carga de corriente alterna:

♦ **Inversores de onda cuadrada:** la mayoría de los inversores funcionan haciendo pasar la corriente continua a través de un transformador, primero en una dirección y luego en otra. El dispositivo de conmutación que cambia la dirección de la corriente debe actuar con rapidez. A medida que la corriente pasa a través de la cara primaria del transformador, la polaridad cambia. Como consecuencia, la corriente que sale del secundario del transformador va alternándose en una frecuencia de ciclos completos por segundo. La dirección del flujo de corriente mediante la cara primaria del transformador se cambia muy bruscamente, de manera que la forma de onda del secundario es “cuadrada”, representada en la figura 7 mediante color magenta.

♦ **Inversores de onda sinusoidal modificada:** son más sofisticados y caros, y utilizan técnicas de ondulación de ancho de impulso. El ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda senoidal. La salida no es todavía una auténtica onda senoidal, pero está bastante próxima. El contenido de armónicos es menor que en la onda cuadrada. En la figura 7 se representa en color azul. Son los que mejor relación calidad/precio ofrecen para la conexión de iluminación, televisión o variadores de frecuencia.

Una vez almacenada la energía eléctrica en el acumulador hay dos opciones: sacar una línea directamente de este para la instalación y utilizar lámparas y elementos de consumo de 12, 24 ó 48 Vcc (Figura 7) o bien

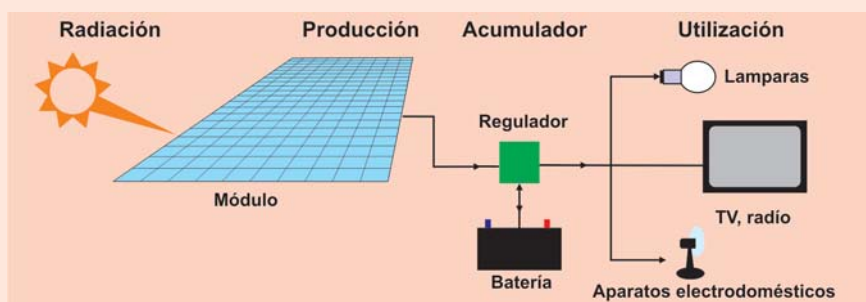


Figura 8 Una instalación solar fotovoltaica sin inversor, utilización a 12Vcc [1]

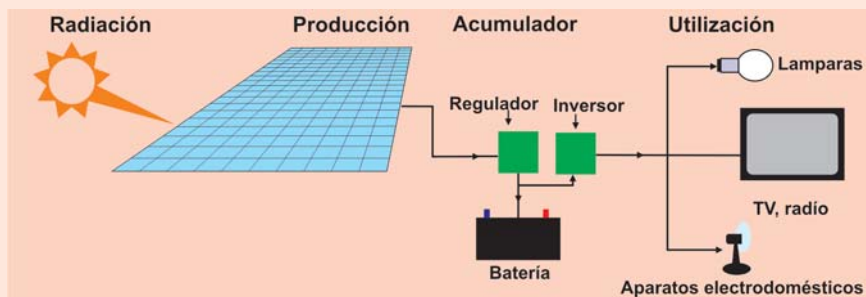


Figura 9 Una instalación solar fotovoltaica con inversor, utilización a 120/230Vca [1]

transformar la corriente continua en alterna de 120/230 V a través de un inversor (Figura 8) [4].

Prácticamente cualquier aplicación que necesite electricidad para funcionar se puede alimentar con un sistema fotovoltaico adecuadamente dimensionado. La única limitación es el costo del equipo y, en algunas ocasiones, el tamaño del campo de paneles. No obstante, en lugares remotos alejados de la red de distribución eléctrica, lo más rentable suele ser instalar energía solar fotovoltaica antes que realizar el enchufe a la red.

Teniendo en cuenta que el panel carece de partes móviles y que las células y los contactos van encapsulados en una robusta resina sintética, se consigue una muy buena fiabilidad junto con una larga vida útil, del orden de 30 años o más. Además si una de las células falla, esto no afecta al funcionamiento de las demás, y la intensidad y voltaje producidos pueden ser fácilmente ajustados añadiendo o suprimiendo células.

Conclusiones

El agotamiento de los combustibles fósiles y el calentamiento global a causa de la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero están obligando a desarrollar alternativas energéticas y comenzar estudios y trabajos sobre este tema, teniendo en cuenta la crisis mundial y las necesidades propias. En este trabajo se ha abordado, de manera resumida, aproximaciones a investigaciones y aplicaciones encaminadas a desarrollar formas de aprovechamiento de la energía solar, a partir de un conocimiento general de la estructura de un Sistema Fotovoltaico, el funcionamiento y las características fundamentales de cada una de las partes que lo componen.

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye, frente a los combustibles fósiles, una fuente inagotable, contri-

buye al autoabastecimiento energético nacional y es menos perjudicial para el medio ambiente, porque evita los efectos de su uso directo —contaminación atmosférica, residuos, etc.— y los derivados de su generación —excavaciones, minas, canteras, etc.—. 

Referencias bibliográficas

- [1] Introducción a los Sistemas Fotovoltaicos. (2005). Disponible en: <http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion/>. (Consulta: 15/11/2007).
- [2] Electrificación de la comunidad de Santa María de Loreto. (4/05/2006). Disponible en: <http://www.citrouv.org/reunion/acrobat/E2PDF5.pdf>. (Consulta: 18/09/2008).
- [3] La célula fotovoltaica. (2005). Disponible en: <http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit03.pdf>. (Consulta: 15/06/2007).
- [4] Ujaen, U. I + D en energía solar y automática. (2004). Disponible en: <http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>. (Consulta: 1/04/2008).
- [5] La radiación solar. (2005). Disponible en: www.epsea.org/esp/pdf2/Capit01a.pdf. (Consulta: 18/09/2008).
- [6] Arresti, D.O. Diseño de una instalación solar fotovoltaica. (2006). Disponible en: http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf. (Consulta: 11/02/08).
- [7] Panel fotovoltaico. (2007). Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico. (Consulta: 15/06/2007).
- [8] Paneles solares fotovoltaicos ISOFOTON. (2003). Disponible en: <http://www.codeso.com/EqPanellsofoton02.html>. (Consulta: 15/08/07).
- [9] Baterías solares. (2007). Disponible en: <http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit06.pdf>. (Consulta: 16/10/2007).
- [10] Manual de Baterías de AGM-VRLA. (2005). Disponible en: http://www.norwatt.es/manuales/pb/AGM_Manual_Rev.0,Enero05.pdf. (Consulta: 17/10/2007).
- [11] Baterías solares Sonnenschein. (2007). Disponible en: <http://www.enervolt.net/pdf/pdfsolar/cat%E1logo%202007%20para%20web/gel.pdf>. (Consulta: 17/10/2007).
- [12] Baterías Deep Cycle. (2004). Disponible en: <http://www.enalmex.com/paginas/baterias.htm>. (Consulta: 16/11/2007).
- [13] Reguladores Isoler 10/20/30 (2005). Disponible en: <http://codeso.com/EqReguladorIsoter02.html>. (Consulta: 15/06/2007).
- [14] Regulador Isoler - 30D. (2005). Disponible en: <http://www.tiendaelektron.com/pdf/268631info.pdf>. (Consulta: 15/06/2007).
- [15] Características Regulador Profesional Isotel 30. (2001). Disponible en: <http://www.asif.org/files/Regulador%20Isotel.PDF>. (Consulta: 15/08/08).
- [16] Regulador Profesional Isotel 30. (2000). Disponible en: <http://www.solener.com/soletel.html>. (Consulta: 15/06/2007).
- [17] Dominicana, T. Inversor TRACE. (2005). Disponible en: http://www.traceinternational.com/catalogo/index.php?scr_name=combos. (Consulta: 15/01/08).
- [18] Inversores/Cargadores DR. (2005). Disponible en: <http://www.europrospect.com/pdf/DR.pdf>. (Consulta: 23/03/2007).