

ESTUDIO PARA EL USO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR TECHNOLOGY STUDY

JANETT BARBOSA URBANO*
FAIVER HUMBERTO TRUJILLO
GONZÁLEZ**
PABLO ELÍAS VELÁSQUEZ
PERILLA***
JOSÉ ULISES CASTELLANOS
CONTRERAS****

Recibido: 5 de mayo del 2010

Aprobado: 15 de junio del 2010

Resumen

La tecnología solar se basa en el principio físico de convertir ese tipo de energía, absorbida por un material altamente conductor, en corriente eléctrica. Los materiales utilizados son semiconductores en gran variedad de estructuras; lo esencial es lograr una máxima captación de energía con un mínimo costo. Este trabajo da a conocer los aspectos iniciales del proyecto: "Factibilidad para el diseño de un sistema de captación, almacenamiento, distribución y uso de energía fotovoltaica en Bogotá", elaborado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia. Se explican las normas actuales relacionadas con la implementación, prueba y desempeño de paneles solares fotovoltaicos; además, se relacionan algunos trabajos realizados por diferentes instituciones en el ámbito mundial y se presentan elementos preliminares del software de control para el sistema fotovoltaico.

Palabras clave: colectores solares, energía solar, normatividad, semiconductores, celdas solares, fotovoltaica, corriente, electricidad.

Abstract

Solar technology is based on the physical principle of converting solar energy absorbed by a highly conductive material in electrical current. The materials used are semiconductors with a variety of structures; it is essential to achieve maximum energy capture with a minimal cost. This work presents the initial aspects of the project: "Feasibility to design a system for capturing, storing, distributing and usage of photovoltaic energy in Bogotá", developed by the "Universidad Cooperativa de Colombia"'s Engineering Faculty. It explains the current norms related to implementation, testing and performance of photovoltaic solar panels, plus some related research performed by several institutions worldwide. It also presents control software's preliminary elements for the photovoltaic system.

Keywords: solar collectors, solar energy, regulations, semiconductors, solar cells, photovoltaic, current, electricity.

• Cómo citar este artículo: Barbosa, J. et ál. (2010), "Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica", en *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 6, núm. 10, pp. 69-81.

* Licenciada en Física. Maestría en Docencia e Investigación Universitaria. Docente de tiempo completo en la Universidad Cooperativa de Colombia. Correos electrónicos: janbau05@gmail.com y janbau05@yahoo.com

** Ingeniero Electrónico, Especialista en Automática e Informática Industrial. Docente de tiempo completo en la Universidad Cooperativa de Colombia. Correo electrónico: faiverht@yahoo.com.ar

*** Ingeniero electrónico. Docente de tiempo completo en la Universidad Cooperativa de Colombia. Correo electrónico: pabloperilla@yahoo.com

**** Ingeniero electrónico. Docente de tiempo completo en la Universidad Cooperativa de Colombia. Correo electrónico: julisesc@hotmail.com

Introducción

El planeta Tierra enfrenta en estos momentos una de las crisis más complejas de su historia: nos referimos a la energía y su uso. El daño que se ha causado al medio ambiente por la sobre explotación de recursos naturales antes de su propia regeneración ha puesto a nuestro mundo en estado de alerta máxima. Según un estudio realizado por el Banco Mundial (BM) y el Gobierno colombiano sobre el medio ambiente en Colombia: “Los contaminantes que arrojan a la atmósfera el transporte y la industria producen problemas críticos especialmente en los corredores Bogotá-Soacha, Cali-Yumbo, Medellín-Valle de Aburrá, Sogamoso y Barranquilla” (2008, p. 15). Adicionalmente, este estudio menciona: “Los problemas que genera el contaminante conocido como material particulado (diminutas piezas de combustible quemado que viaja por el aire y que salen de los exhostos de los vehículos, principalmente), incluidos los que afectan la salud, se reflejan en mayor proporción en las zonas de Fontibón, Puente Aranda y Kennedy en Bogotá” (2008, p. 20).

El informe también da cuenta de la calidad del aire en Bogotá, donde estadísticamente se tienen 31 micropartículas por metro cúbico, muy cerca de México que se considera una de las capitales más contaminadas del mundo, con 51; analiza también la utilización de los recursos hídricos, las áreas forestales y, en especial, el impacto que ha tenido el desgaste del ambiente en las poblaciones rurales y urbanas. Señala dicho documento que ha habido pérdidas por \$1,44 billones de pesos anuales en productividad de los suelos por deforestación que, a pesar de que ha bajado de 600.000 hectáreas en los años sesenta a 90.000 en el 2004, no es suficiente para disminuir el riesgo de la pérdida de suelos en el Caribe y la zona de los Andes.

El grupo de investigadores que escribe este artículo tiene el propósito de contribuir con el auge del uso de la energía solar, ante la comunidad universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia, como forma de ayudar a solucionar el problema energético en nuestro país, específicamente en Bogotá. Las ventajas que ofrece el uso de la tecnología solar la convierten en un recurso muy atractivo para

trabajar de manera inteligente y eficiente. Es una fuente inagotable, está siempre disponible, limpia y en cantidades que sobrepasan nuestra capacidad de consumo. Así mismo, el incremento de la tecnología solar ha puesto de manifiesto que es posible un uso de la energía más acorde con los ecosistemas y con un desarrollo sostenible de la sociedad.

Desde este punto de vista, el proyecto que está desarrollando el grupo *Ingeniería* tiene como hipótesis de trabajo que la utilización de sistemas fotovoltaicos para solucionar necesidades de energía eléctrica en el país de forma masiva puede contribuir significativamente a solucionar problemas de demanda de energía y uso inteligente de la misma. En especial, la Universidad Cooperativa de Colombia puede ayudar a concientizar sobre el problema. Por lo tanto, se está realizando un estudio de factibilidad sobre el uso de un sistema fotovoltaico en particular, para proponerlo a la Universidad con fines pedagógicos, inicialmente, pero también con proyecciones de uso como solución energética. Para ello, se está haciendo una revisión del estado del arte sobre la utilización de la tecnología solar en nuestro país y en Bogotá. Se tomarán dos tipos de paneles: monocristalino y policristalino para realizar mediciones de radiación y voltaje, hacer comparaciones y establecer costo/eficiencia, y proponer un sistema fotovoltaico con una configuración determinada.

En nuestro país, el interés en la tecnología solar ha estado en las empresas comercializadoras, pero algunas universidades e instituciones del estado han comenzado a realizar esfuerzos valiosos para convertir en centro de investigación científica este tipo de energía.

Actualmente, las nuevas tendencias en investigación para obtener energía de forma menos costosa y más amigable con el medio ambiente están presentando un aumento considerable; desarrollos en energías no convencionales están dando como resultado la aparición de nuevos y diversos equipos que facilitan el acceso y el aprovechamiento de estas diversas fuentes de energía, dentro de las cuales nos vamos a centrar específicamente en la fabricación de paneles, sus componentes y software de control. Mencionaremos algunas de las entidades internacio-

nales encargadas de la estandarización y normatividad sobre los diferentes parámetros de la tecnología e investigación que han venido trabajando, desde hace ya dos décadas, en la creación de lineamientos que faciliten el análisis, construcción o prueba de los diferentes equipos.

La tecnología solar fotovoltaica

El descubrimiento del efecto fotovoltaico realizado por Becquerel en 1839 constituyó uno de los más importantes aportes a la ciencia en el siglo XIX. La tecnología solar se basa en el principio físico de convertir este tipo de energía, absorbida por un material altamente conductor, en corriente eléctrica. Hacia los años cincuenta los laboratorios Bell lograron fabricar una celda que podía convertir la radiación solar en electricidad. Este resultado tecnológico animó a otros investigadores y empresas a fabricar celdas fotovoltaicas de capa delgada.

Los materiales utilizados son semiconductores y existen en gran variedad de estructuras actualmente; lo esencial es lograr máxima captación de energía con un mínimo costo. En principio, se ha utilizado el silicio monocristalino, multicristalino y amorfo con diferentes grados de eficiencia que han llegado hasta un 30% de uso de energía. Sin embargo, se están manipulando otras combinaciones de elementos como: fosforo de indio y arseniuro de galio, entre otros.

La materia compuesta por átomos, en cuya estructura externa encontramos el núcleo y los electrones girando alrededor de él, en niveles o bandas de energía, en condiciones normales se comporta eléctricamente neutra; en condiciones diferentes adquiere características eléctricas muy interesantes que son las que se han podido manipular, convirtiendo a ciertos materiales, como el silicio, en semiconductores. El silicio tiene la ventaja de que se encuentra en abundancia en la naturaleza, y posee cuatro electrones de valencia en la última capa que pueden ser compartidos por otros átomos que se encuentren colindantes, formando así una estructura cristalina. En estado puro, el silicio es aislante porque los electrones tienen poca movilidad en la estructura, pero mezclado con otros elementos o, en otros términos, cuando se colocan impurezas al silicio, su conductividad se altera de forma extraordinaria y permite el paso acelerado de los electrones.

El proceso de mezcla de impurezas con el silicio se llama dopaje, y los elementos usados para ello son los dopantes. Existen dos tipos de mezclas según el material: tipo n cuando las impurezas tienen la capacidad de ceder electrones, y p cuando carecen de electrones.

Logrado el dopaje, se construyen los diodos semiconductores que son básicamente la unión de dos semiconductores de distinto tipo; ésta es la base de la fabricación de las celdas fotovoltaicas.

Cuando la luz solar incide sobre una celda fotovoltaica, los fotones llevan energía a los semiconductores, logrando que los electrones de valencia salten de sus enlaces y queden libres, lo que genera huecos en los átomos. Éstos son como cargas positivas, así, cuando hay un par electrón-hueco, el material disminuye su resistencia. Para separar el hueco del electrón o la carga positiva de la negativa se aplica un campo eléctrico, lo que permite que los electrones vayan a la capa n y los huecos a la p. Pueden acumularse muchas cargas en la superficie del material, lo cual es el voltaje que puede medirse externamente; esto es el llamado efecto fotovoltaico.

La forma de utilizar este efecto es conectando un circuito eléctrico exterior, que será el camino por el cual pasarán los electrones, generando una corriente fotovoltaica. Puede generarse una corriente alterna o continua si el circuito se encuentra abierto, en el primer caso, mientras que en el segundo estaría en cortocircuito.

Así, la energía solar que llega a nuestro planeta puede ser aprovechada para generar electricidad a partir del efecto fotovoltaico con la tecnología de los paneles solares.

A continuación se hará una explicación más detallada de algunos de los aspectos más sobresalientes aquí señalados.

Energía solar

La energía solar se define como aquella proveniente del sol mediante radiación, la cual puede aprovecharse para calentar ya sea directamente o por medio de dispositivos colectores. Es un tipo de energía renovable, limpia y de bajo costo.

La radiación solar total interceptada por la Tierra es de unos $1,73 \times 10^{14}$ kW, o equivalentemente $1,51 \times 10^{18}$ kWh/año, o $5,4 \times 10^{12}$ TJ/año. La radiación solar recibida fuera de la atmósfera terrestre es prácticamente constante, mientras que la tomada sobre la superficie varía considerablemente. La energía recogida del sol en un área unitaria expuesta perpendicularmente a sus rayos, a una distancia promedio entre el sol y la Tierra y en ausencia de la atmósfera, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor aceptado de $1,353 \text{ kW/m}^2$ (+- 1, %), unos $11,85 \times 10^3 \text{ kWh/m}^2$ por año o $42,668 \text{ MJ/m}^2$ por año.

La radiación que llega a la superficie terrestre puede presentarse de la siguiente forma:

- *Radiación directa*: aquella que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias, la cual puede reflejarse y concentrarse para su posterior uso.
- *Radiación difusa*: es la radiación emitida por la bóveda celeste debido principalmente a los fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera. No es posible concentrar la radiación difusa puesto que, por lo general, proviene de diferentes direcciones.

En Colombia, el aprovechamiento de esta fuente de energía está en sus comienzos, apenas es posible encontrar oferta de sistemas de calentamiento de agua y la mayoría de estudios académicos no han podido ser llevados a la práctica industrial masiva. Aún así, estamentos dedicados a la investigación del valor energético de la radiación percibida en Colombia han dado como resultado la obtención de celdas fotovoltaicas de un bajo costo (puesto que el estudio en esta área es más avanzado que en el área térmica). El trabajo del grupo de Materiales Semiconductores de Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia ha aportado a la ciencia dispositivos capaces de hacer funcionar salones de informática y elementos audiovisuales, por un costo ajustado a las restricciones económicas propias de Colombia.

Sistemas fotovoltaicos

Desarrollo histórico

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el físico francés A. E. Becquerel en sus estudios

sobre celdas electrolíticas. Varios años después, en 1873, W. Smith descubrió la fotoconductividad en el selenio. Tres años más tarde, en 1876, el efecto fotovoltaico fue observado por G. W. Adams y R. E. Day en una estructura semiconductor de selenio. La primera celda fotovoltaica de selenio fue descrita en 1883 por D. C. Fritts. En 1884 Hallwach observó la fotosensitividad de estructuras de cobre/óxido de cobre (Cu/Cu₂O), luego E. H. Kennard y E. O. Diterich ligaron el efecto fotovoltaico con la existencia de una barrera (Martínez, 2009, p. 18).

Entre la primera y la segunda guerra mundial los esfuerzos por entender y desarrollar dispositivos fotovoltaicos se incrementaron. En 1930, E. Schottky formuló las primeras teorías para explicar la ocurrencia del efecto fotovoltaico (en cobre/óxido de cobre) y desarrolló el circuito eléctrico equivalente aún en uso. En el mismo año Lange fue el primero en sugerir el empleo de fotoceldas para la conversión directa de la luz en electricidad, y en 1932 Audubert y Stora observaron por primera vez el efecto fotovoltaico en sulfuro de cadmio (CdS). En esta época no se disponía aún del silicio en monocristales de alta pureza. Fue hasta 1941 que Olh, en los Bell Telephone Labs., descubrió el efecto fotovoltaico en este material. Si bien a las estructuras fotovoltaicas de cobre/óxido de cobre les siguieron versiones mejoradas de selenio y sulfuro de cadmio, sólo hasta 1949 Billing y Plesner realizaron las primeras mediciones sobre eficiencia de conversión de energía de tales dispositivos (del orden de 1%) (Martínez, 2009).

En 1954, Pearson, Fuller y Chapin de Bell Telephone Labs., habiendo desarrollado el método de disfunción de impurezas para la formación de uniones *p-n* un año antes, obtuvieron el primer dispositivo fotovoltaico práctico de silicio monocristalino. Durante ese mismo año, Welker descubrió el efecto fotovoltaico en el arsenuro de galio (GaAs), y Reynolds y otros desarrollaron dispositivos con sulfuro de cadmio (CdS). La eficiencia de conversión de energía solar a electricidad de estas primeras celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino y sulfuro de cadmio era de 3% a 6% (International Standards Organization, 1989).

En el transcurso de los años sesenta, las actividades de investigación y desarrollo se centraron en:

a) las celdas de silicio, cuya eficiencia permaneció entre el 11% y el 13% durante la década; b) las de telurio de cadmio (CdTeCu_2Te) con eficiencia del 6%, que fueron descartadas hacia finales del decenio por sus problemas de estabilidad y, c) las de arsenuro de galio, en las que se abandonaron los trabajos temporalmente a mediados de la década por falta de resultados satisfactorios (ver figura 1).



Figura 1. Panel solar de silicio

Fuente: img.directindustry.es/imagenes_di/photo-g/panel

Principios de operación

Las celdas solares (fotovoltaicas) son dispositivos que absorben energía de los fotones presentes en la luz, que incide sobre ellas y la convierten en energía eléctrica. El efecto fotovoltaico ocurre en dispositivos en los cuales: a) en los materiales que los componen se generan portadores móviles de carga eléctrica mediante la adsorción de la energía de los fotones presentes en la luz y, b) existe, además, una barrera de potencial que permite separar a los portadores de carga de la región en que se generan.

Los materiales semiconductores, en los que la brecha de energía entre la banda de valencia y la de conducción es suficientemente pequeña como para que electrones en estados de energía cercanos a la parte superior de la banda de valencia alcancen la de conducción al excitarse térmicamente, satisfacen la primera condición. La conducción de energía eléctrica en los semiconductores ocurre por los electrones que saltan a la banda de conducción por los “huecos” dejados por ellos en ésta. Cuando el número de electrones y huecos que se forman son iguales, el semiconductor se denomina intrínseco y se agregan

entonces impurezas a un material semiconductor de tipo n ; cuando los huecos son mayoritarios, el semiconductor recibe la denominación de tipo p .

Al poner en contacto semiconductores de tipo n y p se tiene en la unión la barrera de potencial a que se refiere la condición b) anotada arriba. Los semiconductores no son los únicos materiales en que puede ocurrir el efecto fotovoltaico, ni está restringido a los sólidos. Sin embargo, todas las celdas solares fotovoltaicas son actualmente fabricadas a partir de estos.

Los semiconductores aprovechan sólo los fotones cuya energía excede la brecha entre las bandas de valencia y conducción. La luz solar presenta un espectro continuo con longitudes de onda que están entre $0,5 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$ (la energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda). Los semiconductores más comúnmente empleados tienen brechas entre 1 eV y 2,5 eV, entre la banda de valencia y la de conducción, y pueden clasificarse como directa o indirecta. Los materiales de brecha directa absorben protones más fácilmente. Para un valor dado, el grosor de un semiconductor de brecha directa requerido para absorber una fracción fija de protones es bastante menor que el de uno de brecha indirecta (ver figura 2).

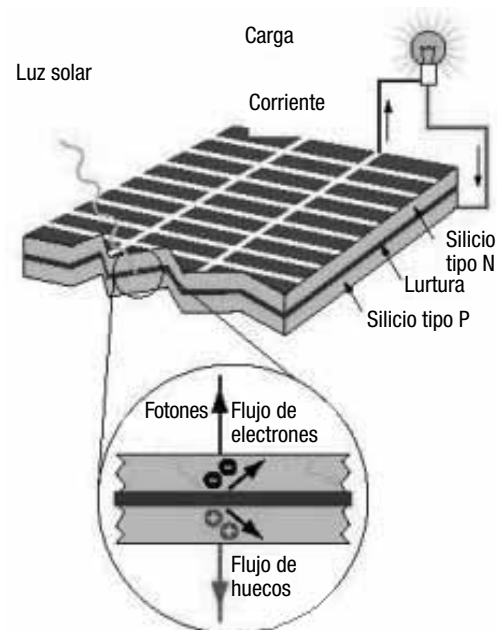


Figura 2. Estructura de una celda solar

Fuente: electronicosonline.com/noticias/notas.php?id=

En la actualidad pueden distinguirse diferentes tipos de celdas solares fotovoltaicas según los materiales empleados en las capas que las conforman (entre paréntesis se anotan los valores de eficiencias AM_I que se han obtenido con ellos en el laboratorio):

Homounión: un mismo material base con diferentes impurezas para obtener los semiconductores tipo *n* y *p*. Los semiconductores más comunes y sus eficiencias AM_I son: silicio monocristalino (18%), silicio policristalino (10%), silicio amorfo (7%), arsenuro de galio monocristalino (22%), fosfuro de indio (6%), y Al_xGa_{1-x}As/GaAs.

Heterunion: el semiconductor base tipo *n* es diferente del tipo *p*. Las celdas más comunes y sus eficiencias son: CuS/S (5%), InP/CdS (14%), CdTe/CdS (8%), Cu_xS/CdS (10%).

Schottky: la unión está formada por un semiconductor y un metal. Tal es el caso de las celdas de Al/W₂Se y Al/Si, con eficiencias del 5% y 13 %, respectivamente.

MIS (Metal Insulation Semiconductor): unión tipo Schottky con una capa aislante de 10 micrones a 15 micrones entre metal y semiconductor. En silicio se han obtenido eficiencias del 12% y en arsenuro de galio del 15%.

SIS (Semiconductor Insulator Semiconductor): unión entre dos semiconductores con una capa aislante de 10 micras a 16 micras entre ellos. Por ejemplo, ITO/Silicio (12%) y óxido de estaño/silicio (12%).

Electroquímicos: un semiconductor (arsenuro de galio monocristalino) con unión líquida; el semiconductor está inmerso, por ejemplo, en una solución líquida de compuesto de selenio.

Las celdas homo-union *p-n* de silicio y arsenuro de galio monocristalinos son en las que se ha logrado una mayor eficiencia de conversión. Sólo algunos semiconductores resultan adecuados para la construcción de celdas homo-unión, mientras que un gran número de ellos puede formar heterouniones (ver figura 3 y 4).



Figura 3. Celda solar monocristalina

Fuente: www.sunpower.com.mx/sistemas%20fotovoltaicos.htm

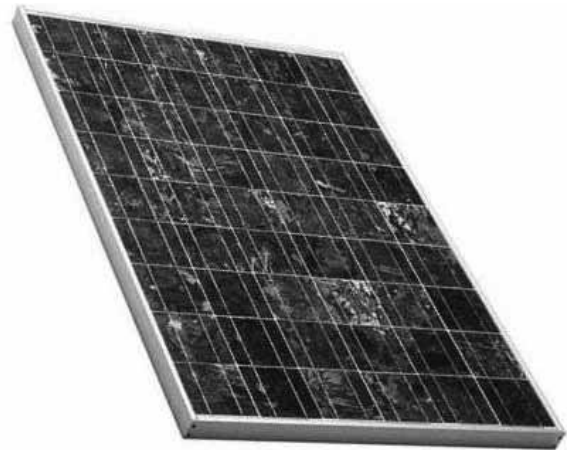


Figura 4. Panel solar policristalino

Fuente: www.sitiosolar.com/paneles%20fotovoltaicas.htm

Las celdas solares fotovoltaicas son modulares, no tienen partes móviles, operan a temperatura ambiente, poseen una vida útil larga, responden tanto a la radiación directa como a la difusa y prácticamente no requieren de mantenimiento.

Las celdas fotovoltaicas son unidades pequeñas y generan bajas potencias, por lo que su aplicación requiere la conexión eléctrica de varias de ellas y su encapsulamiento en una armazón que les proporcione soporte y protección, formándose así lo que se conoce como un módulo fotovoltaico. La fracción del área expuesta al sol de este último cubierta por las celdas solares está entre 75% y 90%, según su forma y distribución. Los módulos suelen reunirse en conjunto, que se denominan arreglos, para adecuar el voltaje y potencia entregados a la demanda.

Nivel internacional

Las eficiencias máximas teóricas alcanzables de los dispositivos fotovoltaicos simples están entre 10% y 26%, según los materiales empleados. En celdas de laboratorio se han alcanzado, en algunos casos, eficiencias del 14% al 16% y mayores (por ejemplo 19% con silicio monocristalino y 22% con arsenuro de galio). Los dispositivos comerciales tienen eficiencias típicas que van del 3% al 13% según el material y la tecnología de fabricación utilizado. La principal diferencia entre los resultados de laboratorio y de celdas comerciales es que las primeras poseen áreas de captación máximas de 4 cm^2 (típicamente mucho menos), en tanto que las segundas tienen áreas del orden de 100 cm^2 .

Colectores concentradores

Colectores solares parabólicos

Estos colectores se caracterizan porque el elemento reflector tiene forma parabólica o de sección de esfera. El objetivo es dirigir los rayos incidentes del elemento colector hacia un punto común o foco, donde se produce un aumento de temperatura. Una aplicación característica de esta configuración se conoce como cocina solar, en la que la cocción de los alimentos se da debido a las altas temperaturas que pueden obtenerse por este método de concentración (ver figura 5).



Figura 5. Calentador solar de la cafetería de la antigua Empresa de Energía de Bogotá (EEB)

Fuente: www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-499320.

Estos mecanismos pueden adaptarse fácilmente con sistemas de seguimiento solar, para un mejor aprovechamiento de la radiación a lo largo de un día.



Figura 6. Cocina solar parabólica

Fuente: <http://www.bioenergylists.org/node/2261>

Colectores solares lineales

En estos, el elemento reflector es una sección circular lineal, conocidos también como cilindro-parabólicos. Aquí, el foco es un tubo de vacío por donde circula el fluido a calentar, usualmente. Al igual que los colectores parabólicos, pueden adaptarse con sistemas de seguimiento con la diferencia de que sólo es posible el movimiento en un eje.



Figura 7. Concentrador solar cilindro-parabólico

Fuente: http://energiasolarok.blogspot.com/2009_10_01_archive.html

Radiación en Colombia

Colombia, según el estudio realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM2) en sinergia con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME3), tiene un muy buen potencial energético solar en lo amplio

de su extensión, con un promedio diario cercano a $4,5\text{kWh/m}^2$. Las entidades que han trabajado la radiación en nuestro país son:

1. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).
2. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
3. Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA).
4. American National Standards Institute (ANSI).
5. American Society of Heating, Refrigeration and Air Cooling Engineers (ASHRAE).
6. American Society of Testing Materials (ASTM).
7. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).
8. International Organization for Standardization (ISO).
9. Guía Técnica Colombiana (GTC).
10. Norma Técnica Colombiana (NTC).

Las regiones con mayor incidencia solar por año son la Guajira y la Costa Atlántica, seguidas de la Orinoquía, región Andina, Amazonía y finalizando con la Costa Pacífica.

Las zonas con menor intensidad, con valores inferiores a $3,5\text{kWh/m}^2$ por día, se presentan en sectores de Chocó, Valle, Cauca, Nariño, Putumayo, Tolima, Eje Cafetero y Santander.

En Bogotá, se cuenta con tres estaciones para medir la radiación global en forma horaria, dos de la Red del DAMA4 y la estación del Aeropuerto El Dorado. De forma general, se puede observar que los meses con mayores valores promedio de radiación global incidente durante el día son enero, diciembre y agosto; los de menor valor son mayo, junio, septiembre y noviembre (ver figura 8).

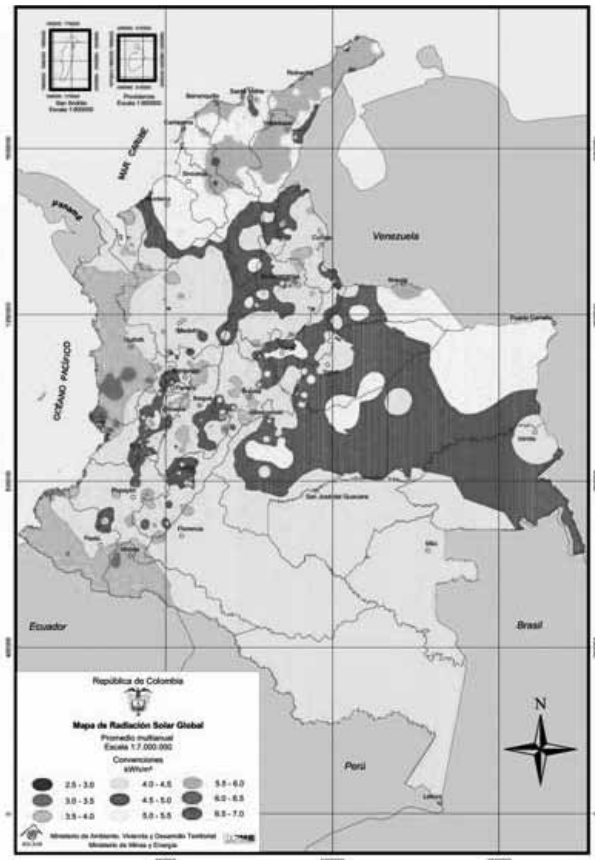


Figura 8. Distribución espacial de la Radiación Global en Colombia, promedio multianual

Fuente: www.ideam.gov.co/radiacion.htm

Normatividad

Normas internacionales relacionadas

Mundialmente se puede observar que las normas que rigen directamente los métodos de prueba de colectores solares son las ANSI/ASHRAE 93-2003, 96-1986 y 109-1986.

La norma ANSI/ASHRAE 93-2003 describe los métodos para determinar el desempeño térmico de los colectores solares; define los accesorios y elementos requeridos para realizar las pruebas y los procedimientos para las mismas. Muestra ecuaciones básicas para realizar los cálculos pertinentes y referencia las condiciones según las cuales se puede realizar la prueba, la información a registrar y cómo debe ser mostrada en el reporte final.

La norma ANSI/ASHRAE 109-86 muestra exactamente los mismos parámetros que la norma anterior, pero en esta ocasión se enfoca en colectores de placa plana.

La norma ASTM E1056-85 describe los sistemas solares domésticos de calentamiento de agua y la manera como deben instalarse; hace referencia, principalmente, a la norma ASTM E772 para la terminología relacionada con la conversión de energía solar, estándares de construcción de ductos de fibra de vidrio, estándares de instalación y desempeño de ductos flexibles, de 1/2 presión, clasificación de combustibles líquidos, válvulas de alivio y dispositivos para sistemas de agua caliente.

También encontramos estándares para la determinación de la transmitancia y reflectancia de la energía solar y los materiales utilizados en los sistemas: la norma ASTM E424-07, en la que se mencionan dos métodos principales para efectuar dicho cálculo: el primero es utilizando un espectrómetro y el segundo un piranómetro.

Igualmente, existe una norma INTA 8610001 que se refiere principalmente al ensayo de colectores solares; contiene su clasificación, instrumentación requerida, definición de los ensayos, condiciones generales de los ensayos, proceso de ensayo, cálculo y presentación de resultados. Hace mención a la referencia de la American Society of Heating y a la obra del profesor Tamami Kusuda (Unidad de Planeación Minero Energética, 2003).

Dentro de las normas ISO 9 podemos encontrar aquellas en las que se describe la forma de calibración de pirheliómetros y piranómetros, en las se establece la clasificación y especificación de los instrumentos para la medición de radiación solar hemisférica y guías para la selección del material en sistemas de calentamiento de agua. Esta última provee una discusión de los parámetros que se deben tener en cuenta para la corrosión interna de sistemas de calentamiento de agua solares y omite temas como los problemas de compatibilidad entre materiales poliméricos y fluidos, riesgos de corrosión concernientes a las superficies externas del absorbedor y dudas sobre salud y seguridad.

Normas colombianas relacionadas

En cuanto a la normatividad en Colombia respecto a energía solar térmica, podemos encontrar las mencionadas a continuación.

Norma GTC 10 108 trata principalmente sobre las especificaciones de calentamiento de agua con energía solar destinada al uso doméstico.

Norma NTC 11 1736 y norma NTC 2775 establecen las principales definiciones utilizadas en normas relativas a energías fotovoltaicas, a su clasificación y designación.

Norma NTC 3507 determina cómo deben ser las instalaciones de sistemas domésticos de agua caliente que funcionan con energía solar.

Igualmente, se encuentran documentos de la UPME como formulación de programas básicos de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Existe un anteproyecto de norma que define los sistemas de calentamiento solar doméstico de agua (transferencia de calor de un líquido a otro), e incluye el desempeño, durabilidad y seguridad de los sistemas integrados diseñados para uso en edificaciones pequeñas.

Software para el dimensionamiento y simulación de sistemas fotovoltaicos (FV)

Existe una amplia gama de programas para diseñar y simular el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos (FV). Con dichos programas es posible determinar la información requerida desde la planeación del sistema a usar, hasta el cálculo del rendimiento final según diferentes condiciones, simulando pronósticos de viabilidad, amortización, ganancias, entre otros.

Además de ayudar en la fase de planeación, los programas de simulación se usan para elaborar ofertas y presentaciones para el cliente. Si se trata del diseño y plantación de un proyecto grande, es posible generar reportes con todos los datos y gráficos necesarios acerca de la viabilidad económica, la cantidad de CO₂ no emitido, análisis de costos y diferentes resultados acerca de pronósticos de comportamiento.

Para que los resultados obtenidos al realizar una simulación representen la realidad del sistema, es necesario que la persona encargada de ésta tenga amplios conocimientos técnicos sobre el tema. La combinación de estos factores permite obtener resultados confiables. Finalmente, un buen ingeniero planeando un sistema usando un programa de simulación errado es tan equivocado como un buen programa de simulación usado por un ingeniero sin los conocimientos técnicos requeridos para dicho trabajo. A través de la óptima combinación de estos dos factores se pueden evitar errores en la planeación y avanzar rápidamente en todo el proceso hasta completar la instalación del sistema.

Diseño de un sistema fotovoltaico

Para diseñar un sistema FV es necesario conocer tanto la posición geográfica donde se montarán los módulos (su latitud) como las medidas, tipo de estructura, orientación y sitio donde se desea instalar (tejados, paredes o superficies planas).

Si es posible, una fotografía del lugar facilita en gran medida la elaboración de la oferta. En todo caso, se puede realizar una observación y una medición aproximada del lugar o usar herramientas como el programa “Google Earth”, obteniendo así una información detallada del lugar y permitiendo identificar elementos que puedan causar sombreado u otros problemas.

Se debe considerar que el valor de los módulos representa entre el 70% y el 80% del costo total del sistema. Con estas consideraciones, se puede aplicar la siguiente relación para obtener rápidamente el monto aproximado de la cotización inicial:

$$1 \text{ kWp} = 10 \text{ m}^2 \text{ del área del generador FV.}$$

Los aspectos a tener en cuenta en la visita técnica son los siguientes:

- *Tipos y análisis de sombras:* el sombreado recibido en los módulos de un sistema FV tiene consecuencias importantes en el rendimiento que puede alcanzar.

Los tipos de sombras se clasifican en:

- Sombras temporales
- Sombras dependientes del lugar
- Sombras producidas por el mismo edificio

- Sombras producidas por los módulos
- Sombras cercanas

En un estudio realizado sobre la influencia del sombreado, en el programa gubernamental en Alemania (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU]) (Reiche, 2009), para la promoción de la FV “1.000 tejados”, se observó una variación de entre 5% a 10% de diferencia en la generación de energía, dependiendo del nivel de sombra recibido en los módulos. Para grandes instalaciones, este porcentaje constituye una pérdida muy alta, que representa gran cantidad de dinero. Por esta razón, es sumamente importante realizar un adecuado análisis de sombras en el lugar donde se van a instalar los módulos con el fin de obtener la menor cantidad posible de sombreado. Hay que tener cuidado especial con las sombras producidas por objetos cercanos, ya que éstas son las más críticas.

- *Tamaño del sistema y elección de los módulos:* tomando como punto de partida el deseo del cliente y la información adquirida en la visita técnica, se pueden elegir los módulos FV a instalar, teniendo en cuenta el tipo de material del que están contruidos (monocristalino, policristalino, amorfo, CdTe o CIS) y según posean o no un marco.
- *Formas de conexión entre los módulos:* la forma de conectar los módulos entre sí está determinada por las condiciones de generación eléctrica que se quieran alcanzar, por la influencia de los elementos de sombreado, por su ángulo de inclinación y por el tipo de inversor o de inversores que se requieran. De esta forma, se diferencia inicialmente entre dos tipos de conexión: centralizada y descentralizada.
- *Dimensionamiento del inversor:* la configuración del sistema y de las conexiones deben corresponder con la potencia y características técnicas del inversor. Para elegir el lugar de instalación del inversor es importante tener en cuenta las condiciones exigidas por el fabricante para su desempeño óptimo. El lugar ideal debe ser fresco, seco, libre de suciedad y, en lo posible, dentro de la edificación.
 - Potencia: teniendo como base la potencia total del sistema FV y del tipo de configuración seleccionada se puede determinar la potencia del inversor.

— Tensión: el valor de la tensión en el inversor se determina adicionando la cantidad de módulos en serie conectados en un string.

La tensión registrada en los módulos y en el generador FV depende fuertemente de la temperatura, por tal razón, el dimensionamiento de tensión del inversor debe realizarse teniendo en cuenta las condiciones extremas de funcionamiento.

- *Dimensionamiento del cableado:* teniendo en cuenta el plano con las medidas y características del lugar de instalación, es posible determinar de manera aproximada la longitud de los cables requeridos para la conexión del sistema. Realizando una adecuada disposición del cableado a través de los módulos es posible reducir las pérdidas de transmisión por los acoples.

En el dimensionamiento del cableado se deben tener en cuenta básicamente tres criterios esenciales: la rigidez eléctrica del cable utilizado (electric strength), su capacidad de conducción de corriente (ampacity) y su nivel de pérdidas por conducción.

- *Protección contra rayos, sobretensiones y puesta a tierra:* normalmente se puede afirmar que un sistema FV no pone en peligro la edificación donde se encuentra instalado a causa de los rayos. Por esa razón, no es necesaria ninguna protección extra contra sus efectos. De todos modos, es recomendable tener en cuenta los siguientes puntos sobre la protección al momento de diseñar un sistema FV:
 - En general los sistemas FV no aumentan el riesgo de descargas eléctricas sobre la edificación en que se encuentran montados.
 - Si en el edificio ya se encuentra instalado un sistema de protección contra rayos, el generador FV se debe acoplar a éste.
 - Para las instalaciones FV en lugares aislados o expuestos es necesaria la instalación de un sistema de protección contra rayos.
 - Si la edificación no cuenta con un sistema pararrayos, el generador FV debe ser puesto a tierra y conectarse al punto neutro (igualación de potencial).
 - Es recomendable el uso de sistemas de aislamiento de sobretensiones en el lado DC de la caja de conexiones del generador.

— Se recomienda principalmente proteger contra sobre tensiones el lado AC del sistema.

Estimación de costos

Basándose en la oferta inicial, y después de realizar la visita técnica y haber dimensionado el sistema y los costos de sus componentes, se puede realizar la cotización final.

- *Costos del proyecto:* la idea principal para determinar los costos de un proyecto es realizar una recopilación y presentación organizada de datos, cantidades, tamaños, entre otros, que se requieren para el montaje y puesta en marcha del sistema FV. Se requiere mayor atención para seleccionar los módulos FV y los inversores, ya que son los componentes más importantes del sistema; en estos dos se tendrá entre el 75% y el 85% del costo total del sistema.
- *Estimación de tiempos:* se debe tener en cuenta que, junto con los tiempos requeridos para el montaje del sistema, existen otros que se deben medir, tales como los de desplazamiento, de descanso, de espera de materiales, de reuniones y aclaración de detalles en el lugar del montaje, y tiempos de control e inspección de los componentes y del sistema.
- *Estimación del rendimiento económico del sistema:* determinar la ganancia económica de un sistema FV, en relación con los costos requeridos para su realización, es uno de los criterios más importantes para decidir si vale la pena invertir dinero en su realización o no.

Montaje e instalación del sistema

La instalación de un sistema FV exige un amplio conocimiento profesional y un intenso trabajo en equipo entre especialistas de varios campos (ingenieros, electricistas, arquitectos, instaladores, techadores, albañiles, entre otros).

Actualmente existe en el mercado una gran oferta para montar sistemas FV, los cuales se adaptan a todas las necesidades, dependiendo del tamaño del sistema, de su configuración técnica y de las condiciones del lugar.

Algunos de los componentes de un sistema FV, como módulos, cables, conectores, cajas de conexiones y en algunos casos el inversor, deben ser montados en el exterior de la edificación, soportando diferentes condiciones climáticas. Por esta razón, para un óptimo funcionamiento se deben seguir cuidadosamente las recomendaciones establecidas por los fabricantes, y vigilar la resistencia contra rayos UV y el nivel de protección contra cambios climáticos.

Conclusiones

La normatividad internacional relacionada con el uso de energía solar térmica ha sido desarrollada desde hace dos décadas, pero es reciente su implementación debido a las tendencias actuales en conservación del medio ambiente y utilización de recursos energéticos renovables.

En Colombia, la normatividad que respecta al uso de energía solar térmica es aún mínima, aunque teniendo en cuenta que las normas técnicas colombianas se basan en internacionales, la mejor gestión posible es la elaboración de protocolos de prueba.

Con la realización de este trabajo se podrá ahondar en la bibliografía concerniente a la energía solar, ya que ahora los estándares relacionados son identificables y para posteriores proyectos el alcance académico puede ser mayor, puesto que no será necesario invertir demasiado tiempo en la detección de la normatividad.

Referencias

- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (1977), *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Flat-Plate Solar Collectors Containing a Boiling Liquid*, Atlanta, ASHRAE.
- Colombia, Congreso Nacional de la República (2001, 3 de octubre), "Ley 697 del 3 de octubre de 2001, por medio de la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de las energías alternativas y se dictan otras disposiciones", en *Diario Oficial*, núm. 44.573, 3 de octubre de 2001, Bogotá.
- "El portal de la energía solar" [en línea], disponible en: <http://www.solarweb.net/>, recuperado: 15 de marzo del 2010.
- Florida Solar Energy Center (2009), *Florida Standards for Design and Installation of Solar Thermal Systems*, Florida, Florida Solar Energy Center.
- Florida Solar Energy Center (2009), *Operation of the Solar Thermal Systems Certification Program*, Florida, Florida Solar Energy Center.
- Florida Solar Energy Center (2009), *Solar Thermal System and Components Test Protocols*, Florida, Florida Solar Energy Center.
- Florida Solar Energy Center (2009) [en línea], disponible en: <http://www.fsec.ucf.edu>, recuperado: 20 de febrero del 2010.
- Frers, C. "El avance de las energías alternativas" [en línea], disponible en: <http://waste.ideal.es/energias-avance.html>, recuperado: noviembre del 2009.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [en línea], disponible en: <http://www.ideam.gov.co/radiación.html>, recuperado: 10 de marzo del 2010.
- Instituto de Normas Técnicas y Certificación (2004), *Energía solar. Especificaciones para sistemas de calentamiento de agua con energía solar, destinada al uso domestico*, Bogotá, ICONTEC.
- Instituto de Normas Técnicas y Certificación (2005), *Energía solar. Definiciones y nomenclatura*, Bogotá, ICONTEC.
- International Standards Organization (1989), ISO 10217. *Solar energy. Water heating systems: Guide to material selection with regard to internal corrosion*, Ginebra, ISO.
- International Standards Organization, (1990), ISO 9059, *Solar energy. Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer*, Ginebra, ISO.
- International Standards Organization (1990), ISO 9060. *Solar energy. Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*, Ginebra, ISO.
- International Standards Organization (1993), ISO 9846. *Solar energy. Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer*, Ginebra, ISO.
- Kusuda, T. (1976), "The Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings", en *Building Science Series 69*, Washington D.C., National Bureau of Standards.
- Newsletter personalizada para Pablo Elías Velásquez Perilla, *Photon, La Revista de Fotovoltaica*.
- Reiche, K. (2009), "Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit" [en línea], disponible en: <http://www.bmu.de/allgemein/aktuell/160.php>, recuperado: noviembre del 2009.
- Sánchez Triana, E., Kulsum, A. y Yewande, A. (2008), *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia*, Bogotá, Casa Editorial El Tiempo.
- Sierra, F. (2008), *Tecnologías para el aprovechamiento de la Energía Solar*, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, pp. 16-29

Unidad de Planeación Minero Energética & Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales de Colombia. (2002), *Atlas de radiación solar de Colombia*, Bogotá, UPME & IDEAM.

Unidad de Planeación Minero Energética (2003), *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Anteproyecto de norma. Sistemas de calentamiento solar doméstico de agua (transferencia de calor de un líquido a otro)*, Bogotá, UPME.

Universia (2001), “Universidad Nacional construye celdas solares a menor costo” [en línea], disponible en: <http://pre.www.universia.net.co/noticias/mas-noticias/universidad-nacional-construye-celdas-solares-a-menor-costo.html>, recuperado: 10 de marzo del 2010.

Zambrano, C. (2008), *Manual para el dimensionamiento y montaje de sistemas fotovoltaicos en una compañía de energía solar alemana según ISO 9001*, España, Universidad De Zaragoza.