

## CAPÍTULO 2

### Funcionamiento de las celdas solares.

#### 2.1 Introducción.

En este capítulo se describe el efecto fotovoltaico desde su descubrimiento, se muestra los tipos de celdas solares, su estructura, eficiencia. Además se muestra el mapa de la radiación que llega a nuestro planeta, cómo se orientan dichas celdas, los tipos de sistemas en base a energía solar y por último los sistemas de almacenamiento de la energía proveniente de las celdas solares, como son las baterías y el mantenimiento necesario para asegurar un buen funcionamiento del sistema de conversión de energía de CD-CA.

#### 2.2 Celdas solares (Celdas Fotovoltaicas).

Fotovoltaica es la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

El primero en notar el efecto fotoeléctrico fue el físico francés Edmund Becquerel, en 1839. Él encontró que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando eran expuestos a la luz. En 1905, Albert Einstein describió la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico, en el cual está basada la tecnología fotovoltaica. Por este trabajo, se le otorgó más tarde el premio Nobel de física. El primer módulo fotovoltaico fue construido en los Laboratorios Bell en 1954. Fue descrito como una batería solar y era más que nada una curiosidad, ya que resultaba demasiado costoso como para justificar su utilización a gran escala. En la década de los 60's, la industria espacial comenzó por primera vez a hacer uso de esta tecnología para proveer la energía eléctrica a bordo de las naves espaciales. A través de los programas espaciales, la tecnología avanzó, alcanzó un alto grado de confiabilidad y se redujo su costo. Durante la crisis de energía en la década de los 70's, la tecnología fotovoltaica empezó a ganar

reconocimiento como una fuente de energía para aplicaciones no relacionadas con el espacio [2].

La Fig.2.1 ilustra la operación de una celda fotovoltaica, llamada también celda solar.

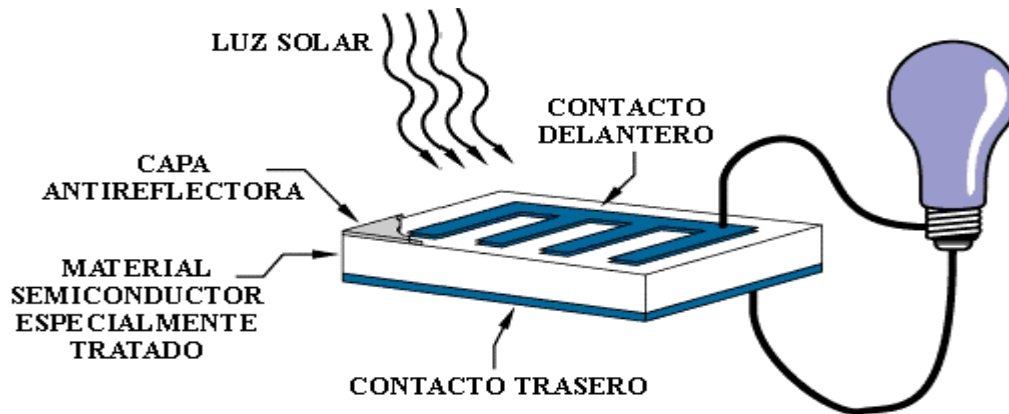


Fig. 2.1 Funcionamiento y elementos de una celda solar.[2]

Las celdas solares están hechas de la misma clase de materiales semiconductores, tales como el silicio, que se usan en la industria microelectrónica. Para las celdas solares, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando la energía luminosa llega hasta la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si ponemos conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica, es decir, en electricidad. La electricidad puede entonces ser usada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo para encender una luz o energizar un equipo eléctrico.[6]

Varios módulos pueden ser conectados unos con otros para formar un arreglo Fig.2.2. En general, cuánto más grande es el área de un módulo o arreglo, más electricidad será producida. Los módulos y arreglos fotovoltaicos producen corriente directa (CD). Estos arreglos pueden ser conectados tanto en serie como en paralelo para producir cualquier cantidad de voltaje o corriente que se requiera.

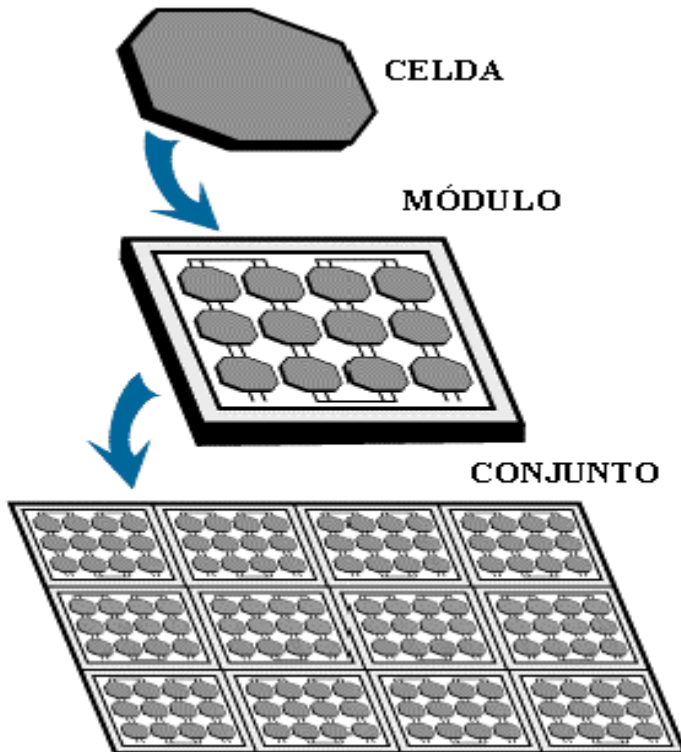


Fig.2.2 Arreglo de celdas.[2]

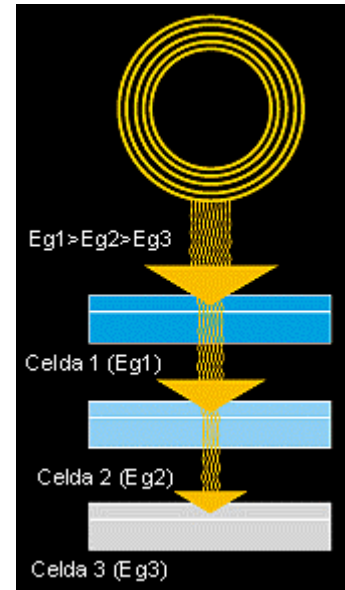


Fig. 2.3 Tandem.[2]

Hoy en día, los dispositivos fotovoltaicos (FV) más comunes usan una sola juntura o interfase para crear un campo eléctrico dentro de un semiconductor, como por ejemplo una celda FV. En una celda FV de una sola juntura, solamente aquellos fotones cuya energía sea igual o mayor a la del espacio interbanda del material de la celda, pueden liberar un electrón para ser usado en un circuito eléctrico. En otras palabras, la reacción fotovoltaica de las celdas de una sola juntura está limitada a la porción del espectro solar cuya energía esté por encima del espacio interbanda del material absorbente, y por tanto aquellos fotones con energías más bajas no son utilizados.

Una manera de sortear esta limitación es usando dos (o más) celdas diferentes, con más de un espacio de banda y más de una juntura, para generar un voltaje. Este tipo de celdas es conocida como celdas "multijuntura" (también llamadas celdas "de cascada" o "tandem") Fig.2.3 [2]. Los dispositivos multijuntura pueden lograr una mayor eficiencia de conversión

total porque pueden convertir una fracción más grande del espectro luminoso en electricidad.

Como se muestra en la Fig. 2.4, un dispositivo multijuntura es un conjunto de celdas individuales de una sola juntura, colocadas en orden descendente de acuerdo a su espacio de banda ( $E_g$ ). La celda más alta captura los fotones de alta energía y deja pasar el resto de los fotones hacia abajo para ser absorbidos por las celdas con espacios de bandas más bajos.

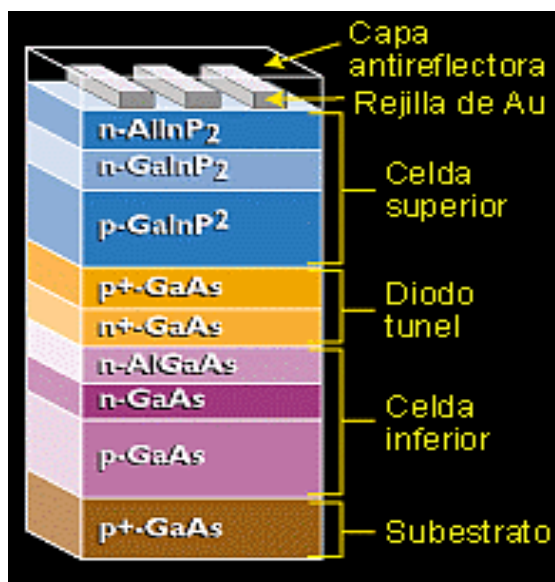


Fig. 2.4 Dispositivo multijuntura.[2]

Muchas de las investigaciones que se realizan en la actualidad sobre celdas multijuntura están enfocadas al uso del arseniuro de galio en uno (o en todos) de los componentes de las celdas. Tales celdas han alcanzado eficiencias de alrededor del 35% bajo luz solar concentrada. Otros materiales estudiados para su uso en dispositivos multijuntura son por ejemplo, el silicio amorfo y el diselenuro de indio con cobre.

Como ejemplo de esto, el dispositivo multijuntura que se muestra en la Fig.2.4, utiliza una celda superior de fosfato de indio con galio, una juntura "de túnel" para facilitar el flujo de electrones entre las celdas, y una celda inferior de arseniuro de galio [2,3,4].

### 2.3 Estructura de una celda solar.

Las celdas solares de silicio pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. La diferencia entre ellas radica en la forma como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina.

Existe, además, una diferencia en la eficiencia. Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino tabla 2.1 tienen casi el mismo y más alto nivel de eficiencia con respecto a las de silicio amorfo.

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior y, luego, dos capas de silicio. En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antireflexión, que da a la celda solar su típico color azul.

Durante la última década, se han estado desarrollando nuevos tipos de celdas solares de materiales diversos, entre las que encontramos, por ejemplo, a las celdas de película delgada y a las celdas de CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (telururo de cadmio). Éstas están comenzando a ser comercializadas.

<b>Eficiencias de celda:</b>	
Monocristalina:	12-15 %
Policristalina:	11-14 %
Amorfa:	6-7 %
telururo de cadmio:	7-8 %

Tabla 2.1. Eficiencia de celdas solares comerciales.[2]

### 2.4 Radiación solar.

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/m<sup>2</sup> por día o, también, en kWh/m<sup>2</sup> 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  $1,000 \text{ W/m}^2$ ; por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a  $1 \text{ kWh/m}^2$  de energía. Ésta es, aproximadamente, la cantidad de energía solar registrada durante un día soleado de verano, con cielo despejado, en una superficie de un metro cuadrado de celda solar, colocada perpendicular al sol.

Puede apreciarse en la fig.2.5 que la radiación solar media recibida en superficie terrestre oscila entre un máximo de unos  $275 \text{ W/m}^2$  en las regiones despejadas de nubosidad del Sahara y Arabia, hasta un mínimo de  $75 \text{ W/m}^2$  en las islas brumosas del Ártico. La media global es de  $170 \text{ W/m}^2$ . [28]

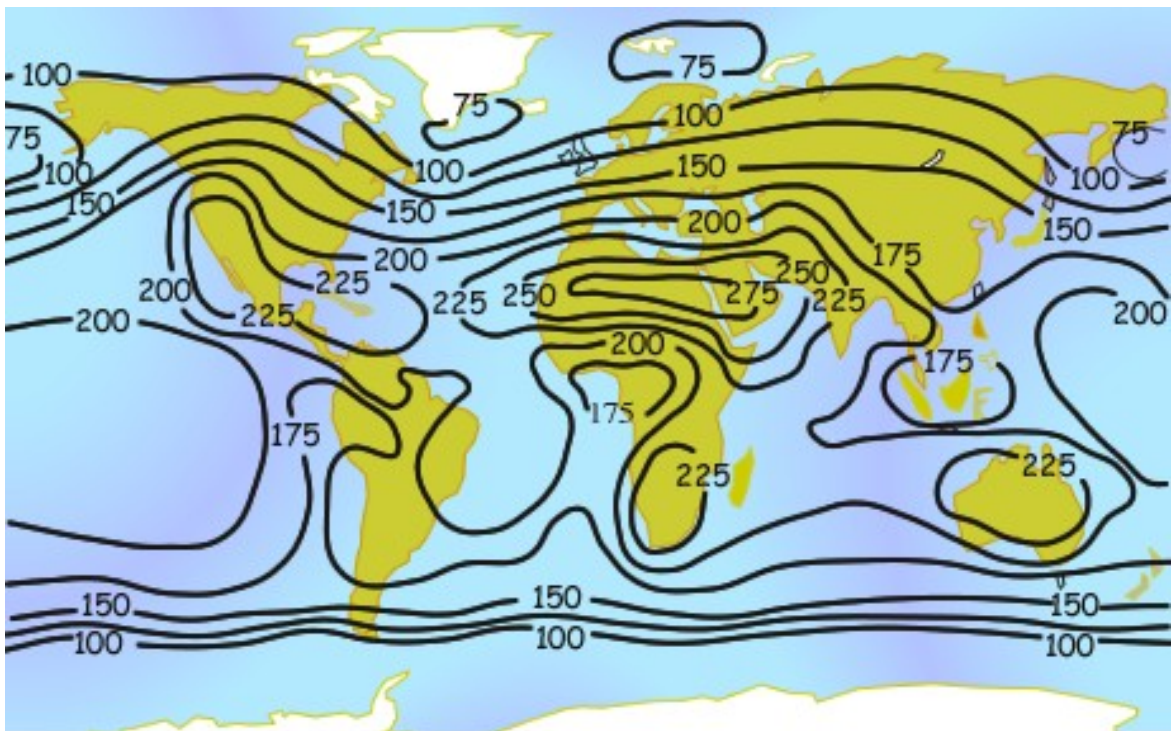


Fig.2.5. Radiación solar media recibida en superficie, expresada en  $\text{W/m}^2$ . [5]

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  $1,000 \text{ kWh/m}^2$  al año, en los países del norte de Europa (tales como Alemania), y  $2,000$  a  $2,500 \text{ kWh/m}^2$

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.

Por ejemplo la luz solar plena registra una potencia de unos  $1,000 \text{ W/m}^2$ . Esta luz, cayendo en perpendicular sobre una superficie de  $1 \text{ m}^2$  durante una hora, equivale a una energía de  $1000 \text{ Wh}$  ó  $1 \text{ kWh}$  (Energía = Potencia multiplicada por tiempo ( $E = P \times t$ )). Del mismo modo, una radiación diaria promedio de  $5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  corresponderá a 5 horas de luz solar plena al día.

### 2.5 Orientación.

La luz solar viaja en línea recta desde el sol hasta la tierra. Al penetrar 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. Como todos habrán constatado gracias a los baños de sol y al trabajo al aire libre, la radiación directa es la más intensa.

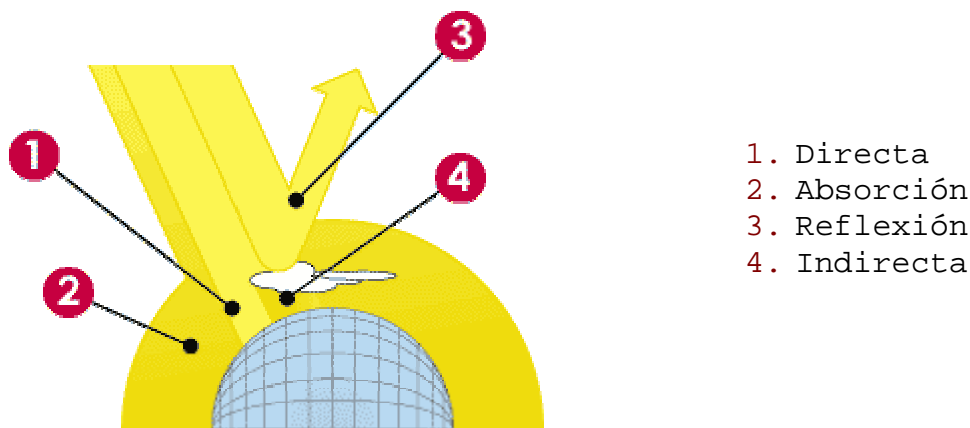


Fig.2.6 Incidencia de rayos solares.[7]

Únicamente una pequeña fracción del total de luz solar alcanza, en efecto, la superficie de la tierra.

Un panel solar genera electricidad incluso en ausencia de luz solar directa. Por ende, un sistema solar generará energía aun cuando el día este nublado. 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.

Por lo tanto, en la práctica, los paneles solares deberán ser colocados en ángulo con el plano horizontal (inclinados). Cerca del ecuador, el panel solar deberá colocarse ligeramente inclinado (casi horizontal) para permitir que la lluvia limpie el polvo.

Una pequeña desviación en la orientación no influye significativamente en la generación de electricidad, ya que durante el día el sol sé traslada de este a oeste.

Por ejemplo los porcentajes de rendimiento anual de un sistema FV con una inclinación de panel de 45 grados, para diversas orientaciones en Holanda tabla.2.2.

O	SO	S	SE	E
78%	94%	97%	94%	78%

Tabla.2.2 Porcentaje de rendimiento anual de un sistema fotovoltaico en Holanda.[7]

El rendimiento es máximo (100%) cuando los paneles tienen una inclinación de 36 grados y están orientados hacia el sur. Tal como puede observarse, las diferencias entre suroeste, sur y sureste es pequeñas tabla 2.2.

## 2.6 Ángulo de inclinación.

El sol se desplaza de este a oeste. Los paneles solares alcanzan su máxima efectividad cuando están orientados hacia el sol, en un ángulo perpendicular con éste a mediodía. Por lo general, los paneles solares son colocados sobre un techo o una estructura y tienen una posición fija; no pueden seguir la trayectoria del sol. Por lo tanto, no estarán orientados hacia el astro con un ángulo óptimo (90 grados) durante toda la jornada. El ángulo entre el plano horizontal y el panel solar se denomina ángulo de inclinación.



Debido al movimiento terrestre alrededor del sol, existen también variaciones estacionales fig.2.7. En invierno, el sol no alcanzará el mismo ángulo que en verano. Idealmente, en verano los paneles solares deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal para aprovechar al máximo la luz solar. Sin embargo, los mismos paneles no estarán, entonces, en posición óptima para el sol del invierno. Con el propósito de alcanzar un mejor rendimiento anual promedio, los paneles solares deberán ser instalados en un ángulo fijo, determinado en algún punto entre los ángulos óptimos para el verano y para el invierno. Cada latitud presenta un ángulo de inclinación óptimo. Los paneles deben colocarse en posición horizontal únicamente en zonas cercanas al ecuador.

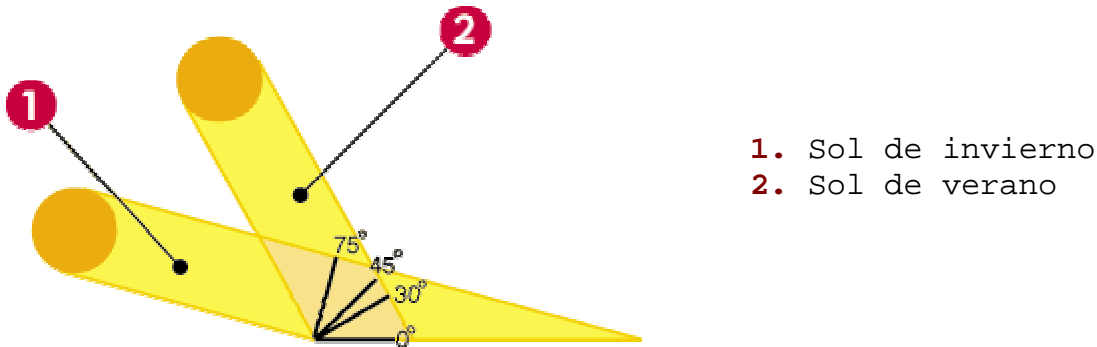


Fig. 2.7.Ángulo de inclinación óptimo en verano e invierno.[7]

Ligeras desviaciones de unos 5 grados con respecto del ángulo de inclinación óptimo tienen sólo un efecto menor en la producción de energía. Las diferencias a causa de las condiciones climáticas son más importantes en la producción de energía. En el caso de los sistemas autónomos, el ángulo de inclinación óptimo depende del patrón de demanda mensual.

Por ejemplo en Holanda (52 grados latitud norte), el ángulo de inclinación óptimo para un sistema conectado a la red es de 36 grados. Sin embargo, en este mismo país, para un sistema autónomo con igual demanda de energía anual promedio, el ángulo de inclinación óptimo es de aproximadamente 65-70 grados.[7]

### 2.7 Potencia pico.

Al ser expuesta a la luz, una celda solar produce electricidad. Dependiendo de la intensidad de la luz (la radiación en  $W/m^2$ ), una celda solar produce mayor o menor

cantidad de electricidad, la luz solar plena es preferible a la sombra y, a su vez, la sombra es mejor que la luz eléctrica. Para hacer una comparación entre diferentes celdas y paneles solares es necesario conocer la llamada 'potencia nominal' de los mismos. La potencia nominal, expresada en Watts pico o Wp, es una medida que indica cuánta energía puede producir dicho panel solar bajo condiciones óptimas de operación, la Fig.2.8, muestra un panel solar recibiendo energía solar, las partes que la componen, y una lámpara incandescente que es energizada con corriente eléctrica obtenida por efecto fotovoltaico.

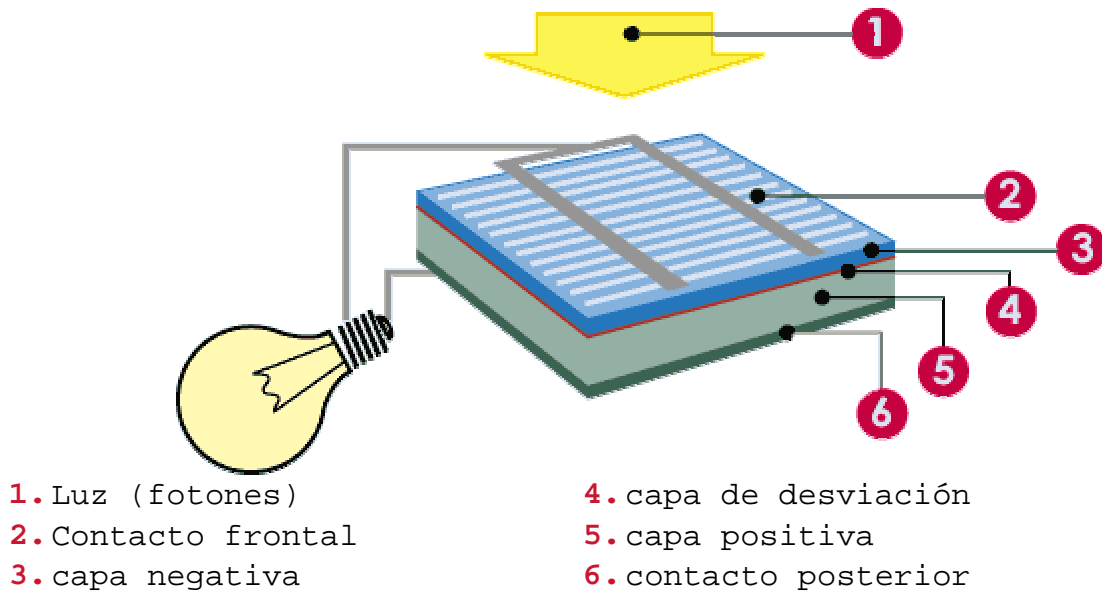


Fig.2.8 Partes de una celda solar.[7]

Para determinar y comparar la potencia nominal de los paneles solares, se mide su salida bajo condiciones estándar de prueba (SCT).

Estas son:

- Una radiación de  $1,000 \text{ W/m}^2$ .
- Un espectro solar de referencia de AM 1.5 (que define el tipo y color de la luz).
- Una temperatura de celda de  $25^\circ\text{C}$  (la eficiencia de un panel solar disminuye significativamente cuando la temperatura de la celda aumenta).

Por ejemplo, una celda solar de silicio cristalino, con dimensiones típicas de  $10 \times 10 \text{ cm}$ , registra una potencia pico

de 1.5-Watt pico aproximadamente. La mayoría de paneles de 1 metro cuadrado registran una potencia nominal de unos 100  $W_p$  (si están compuestos por celdas solares de silicio cristalino, para ser precisos).

### **2.8 Sistemas de energía.**

Para utilizar paneles solares como fuente de energía segura y confiable, es necesario contar con los siguientes componentes adicionales: cables, una estructura de soporte y, dependiendo del tipo de sistema (conectado a la red, autónomo o de emergencia) , un convertidor (CD-CA) o un controlador de carga y baterías. El sistema completo se denomina sistema de generación de electricidad solar.

Existen tres tipos de sistemas de generación solar.

- Sistemas solares autónomos o fotovoltaicos domiciliarios (SFD).
- Sistemas solares conectados a la red pública.
- Sistemas solares de emergencia. Sistemas de generación de electricidad solar utilizados para generar electricidad cuando no hay (temporalmente) una red de distribución pública.

### **2.9 Baterías.**

En los llamados sistemas solares autónomos o sistemas fotovoltaicos domiciliarios (SFD), las baterías almacenan energía que será utilizada durante la noche para iluminación o para ver televisión. Asimismo, suministran electricidad durante periodos de escasez o ausencia de luz solar, necesaria para que el panel solar produzca energía. La duración del periodo que puede ser cubierto está determinada por la demanda de electricidad y la capacidad de almacenamiento de la batería Fig.2.9.

En los sistemas solares de emergencia, las baterías son utilizadas para cubrir periodos de corte fluido eléctrico de la red. Los sistemas conectados a la red más común (en los lugares donde la red de distribución pública es confiable) no usan baterías.



Fig.2.9. Baterías para almacenar energía CD.[7]

Las baterías están disponibles en diversas formas y tamaños Fig.2.9. Las de 12V son las más utilizadas. Si las baterías son nuevas y son del mismo tipo y tamaño, pueden ser conectadas para incrementar la capacidad del almacenamiento de batería.

Algunos sistemas solares están provistos de baterías solares especiales. Otros utilizan baterías para auto comunes. Sin embargo, debe preferirse las primeras, ya que están adaptadas para su uso en sistemas solares y su tiempo de vida será considerablemente más largo.

Por lo general, las baterías son la parte más delicada de un sistema solar y la primera en ser reemplazada. Algunas recomendaciones para ayudar a extender el tiempo de vida de las baterías son las siguientes:[7]

1.-El uso de un controlador de carga es altamente recomendable. Éste desconecta las cargas cuando la batería se encuentra casi completamente descargada. Todos los sistemas solares domiciliarios estándar cuentan con un controlador de carga.

2.-Asegurarse de que haya relación entre el número de paneles solares, el tamaño de las baterías y el número de cargas eléctricas (luces, artefactos eléctricos) y sus respectivos consumos.

3.-Observar el controlador de carga para verificar el estado de carga de la batería (cuán cargada se encuentra). Por lo general, el controlador está provisto de un indicador luminoso rojo, que se enciende cuando la batería está descargada, y uno verde, que se enciende cuando está completamente cargada. Procurar que el indicador verde permanezca encendido el mayor tiempo posible. Esto extenderá el tiempo de vida de la batería.

4.-Dar mantenimiento a la batería (llenándola con agua destilada) 3 veces al año como mínimo (si no se trata de una batería sin necesidad de mantenimiento).

5.-Cargar al máximo la batería utilizando un cargador/generador, una vez al mes, pues esto ayuda a extender el tiempo de vida de la batería.

6.- No ignorar las indicaciones del controlador de carga con el fin de extraer hasta la última gota de energía de la batería.

7.- ADVERTENCIA: Las baterías deberán permanecer en un lugar fresco ;pero no extremadamente frío!, bien ventilado y fuera del alcance de los niños. Recuerde que las baterías son peligrosas, puesto que contienen ácidos dañinos y energía. Las baterías usadas deberán ser devueltas al proveedor o tratadas como desecho químico.

La demanda de electricidad y el tamaño de la batería de almacenamiento determinan la duración del periodo de escasez de luz solar que podrá ser cubierto, al que se denomina "periodo de autonomía": tiempo máximo durante el cual las necesidades básicas de electricidad pueden ser cubiertas, cuando no se cuenta con suministro de corriente producida por el panel solar. El periodo de autonomía es un parámetro utilizado para el dimensionamiento del sistema[7].

Una vez conocido los elementos que forman un sistema de generación de energía eléctrica a base de energía solar, la siguiente etapa es seleccionar el tipo de convertidor CD-CA a implementar, por lo que en el siguiente capítulo se tratarán las diferentes topologías existentes con sus ventajas y desventajas.