

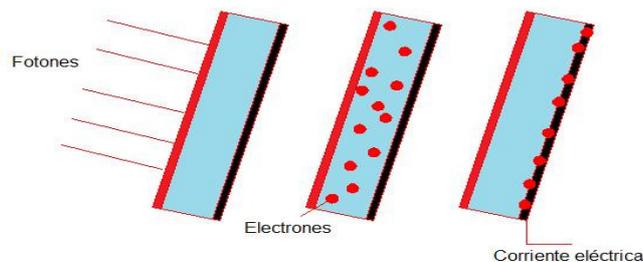
Capítulo 2: Paneles o módulos fotovoltaicos: características constructivas

Paneles o módulos fotovoltaicos: características constructivas, funcionamiento y clasificación:

Definición: los paneles o módulos fotovoltaicos, son aquellos elementos capaces de **transformar la radiación emitida por el Sol en energía eléctrica.**

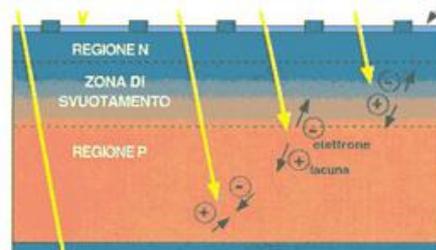
Principio de funcionamiento:

Los módulos fotovoltaicos funcionan por efecto fotoeléctrico. Cada célula fotovoltaica está formada por dos delgadas láminas de silicio, positivo y negativo, separadas por otra capa de material semiconductor, **los fotones chocan** contra la superficie de la capa positiva, y al chocar liberan electrones de los átomos positivos, los cuales, al estar en movimiento pasan por el semiconductor, pero no pueden volver para atrás, la capa negativa **adquiere una diferencia de potencial (tensión)** respecto la positiva, que se introduce en la instalación en concepto de intensidad.



Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una delgada lámina de un material semi-conductor, frecuentemente de silicio. Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 cm².



Para la realización de las células, el material actualmente más utilizado es el mismo silicio utilizado por la industria electrónica, cuyo proceso de fabricación presenta costes muy altos, no justificados por el grado de pureza requerido para la fotovoltaica, que son inferiores a los necesarios en electrónica.

- *Silicio Mono-cristalino:* de rendimiento energético hasta 15 -17 %;
- *Silicio Poli-cristalino:* de rendimiento energético hasta 12 -14 %;
- *Silicio Amorfo:* con rendimiento energético menor del 10 %;
- Otros materiales: Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio;

Actualmente, el material más utilizado es el silicio mono-cristalino que presenta prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin.

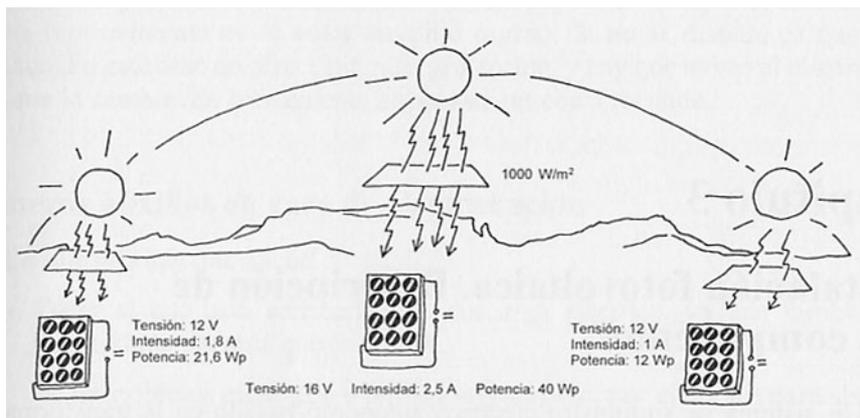
Módulos fotovoltaicos

Las células solares constituyen un producto intermedio de la industria fotovoltaica: proporcionan valores de tensión y corriente limitados, en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos convencionales, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin un soporte mecánico. Después, son ensambladas de la manera adecuada para constituir una única estructura: los módulos fotovoltaicos.

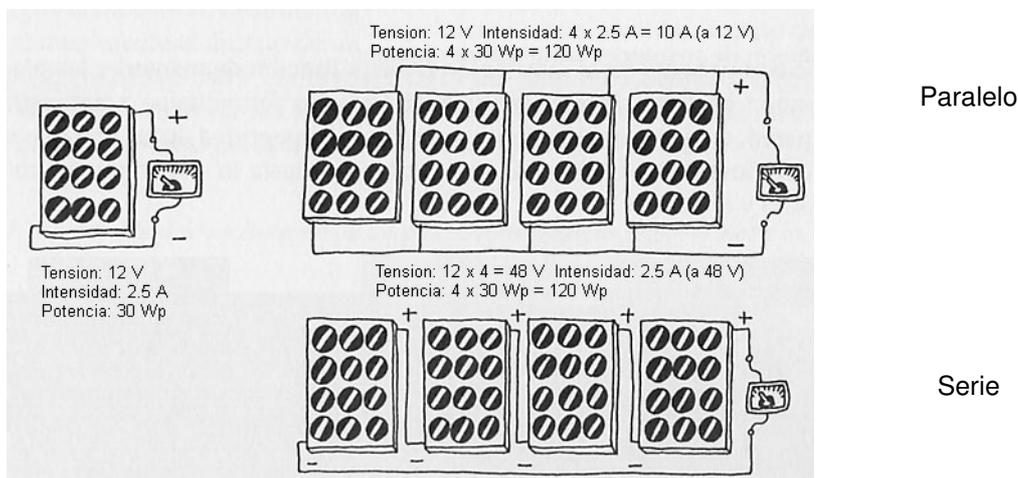
El módulo fotovoltaico es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las células fotovoltaicas. Los módulos pueden tener diferentes tamaños (los más utilizados tienen superficies que van de los 0,5 m² a los 1,3 m²) y constan normalmente de 36 células conectadas eléctricamente en serie.

Los módulos formados tienen una potencia que varía entre los 50Wp y los 150Wp, según el tipo y la eficiencia de las células que lo componen. Las características eléctricas principales de un módulo fotovoltaico se pueden resumir en las siguientes:

- Potencia de Pico (Wp): potencia suministrada por el módulo en condiciones estándar STC (Radiación solar = 1000 W/m²; Temperatura = 25 °C; A.M. = 1,5).
- Corriente nominal (A): corriente suministrada por el módulo en el punto de trabajo.
- Tensión nominal (V): tensión de trabajo del módulo.



Instalación de módulos fotovoltaicos en Serie o en Paralelo:



Generador Fotovoltaico

Está formado por el conjunto de los módulos fotovoltaicos, adecuadamente conectados en serie y en paralelo, con la combinación adecuada para obtener la corriente y el voltaje necesarios para una determinada aplicación. El elemento base es el módulo fotovoltaico.

Varios módulos ensamblados mecánicamente entre ellos forman el **panel**, mientras que módulos o paneles conectados eléctricamente en serie, para obtener la tensión nominal de generación, forman la **rama**. Finalmente, la conexión eléctrica en paralelo de muchas ramas constituye el **campo**.

Los módulos fotovoltaicos que forman el **generador**, están montados sobre una estructura mecánica capaz de sujetarlos y que está orientada para optimizar la radiación solar.

La cantidad de energía producida por un generador fotovoltaico varía durante el año en función de la insolación de la localidad y de la latitud de la misma.

Para cada aplicación, el generador tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- carga eléctrica,
- potencia de pico,
- posibilidad de conexión a la red eléctrica,
- latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo,
- características arquitectónicas específicas del edificio,
- características eléctricas específicas de la carga.

Anexo: Principio de funcionamiento detallado

Para hacernos una idea, aunque sólo sea cualitativa, del mecanismo de la conducción de electricidad, a través de un semiconductor, podemos acudir al modelo del cristal de silicio. El átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia, dos electrones s y dos electrones p , los cuales se distribuyen en cuatro orbitales híbridos sp^3 , dirigidos hacia los cuatro vértices de un tetraedro regular, estando el núcleo del átomo en el centro. Esto hace que el silicio cristalice en una malla tetraédrica, con un átomo en cada nudo de la malla.

Esta estructura hace que los electrones de valencia estén poco ligados y uno de ellos pueda liberarse, si sobre el átomo incide un fotón que tenga la energía suficiente, superior a un valor mínimo llamado energía umbral. Como el átomo es neutro, cuando se libera un electrón se crea automáticamente una carga positiva, con lo cual, en el seno del semiconductor habrá un determinado número de cargas negativas (electrones liberados) y cargas positivas («huecos» de electrones) y su concentración dependerá de la temperatura absoluta del cuerpo. Un electrón liberado se mueve por el interior del semiconductor hasta que encuentra un hueco, y uno y otro se neutralizan entre sí; los electrones y los huecos se crean y neutralizan continuamente, estando en equilibrio dinámico entre sí.

En principio, la distribución de electrones libres y de huecos es uniforme en toda la masa del semiconductor; pero si se aplica una diferencia de potencial eléctrico, los electrones migrarán hacia un lado y se crearán dos zonas: una con mayor densidad de carga negativa y otra con mayor densidad de carga positiva. La concentración de cargas depende de la temperatura absoluta del semiconductor: cuanto mayor es la temperatura, mayor es la energía interna y mayor la probabilidad de que un electrón orbital alcance un nivel energético que le permita pasar a electrón libre.

Si un semiconductor en estado puro (intrínseco) se impurifica (dopa) con pequeñas cantidades de ciertos elementos, se obtiene un semiconductor extrínseco; la uniformidad de la malla cristalina se verá alterada en aquellos puntos en que los átomos del semiconductor han sido sustituidos por átomos de la impureza agregada. Existen dos tipos de semiconductores extrínsecos:

- *Tipo n* . Son semiconductores en los que la impureza añadida tiene cinco electrones de valencia; un cristal de silicio dopado con antimonio o fósforo es un ejemplo típico de semiconductor extrínseco tipo n . El hecho de incluir un átomo de cinco electrones en la malla tetraédrica hace que este quinto electrón quede libre muy fácilmente, pequeñas aportaciones de energía ya lo liberan, y se crean los correspondientes huecos positivos.
- *Tipo p* . Son los que se dopan con elementos que sólo tienen tres electrones de valencia, como por ejemplo silicio impurificado con boro, indio o galio. Este semiconductor se caracteriza por tener gran número de huecos positivos, que participan en la conducción eléctrica. Estos huecos pueden asimilarse a cargas positivas, que se desplazan por el interior del semiconductor.

Si se junta un semiconductor tipo p con un semiconductor tipo n , se tiene una unión $p-n$ y, en esta nueva estructura, los electrones migran hacia el lado p y los huecos migran en sentido contrario. El conjunto es neutro, pero aparece una diferencia de potencial entre ambas zonas, la zona n tiene un

potencial negativo y la zona p tiene un potencial positivo. Las uniones $p-n$ se consiguen fabricando una lámina delgada de un semiconductor impurificado con un elemento de un signo determinado, por ejemplo silicio con boro, y luego vuelve a doparse, únicamente por una de las caras, con un elemento de signo contrario, por ejemplo fósforo.

Por un lado, se sabe que los fotones poseen una energía que depende de su frecuencia y, por otro lado, también se sabe que se necesita una energía mínima (1,1 eV para el silicio) para que un electrón situado en la banda de valencia pase a la banda de conducción. En consecuencia, el fotón incidente deberá tener una frecuencia asociada igual o superior mínima necesaria, para que la radiación sea capaz de provocar el salto de una banda a la otra. La longitud de onda correspondiente a esta frecuencia se conoce como «longitud de onda de corte» ($1,23 \mu\text{m}$ para el silicio) y cualquier radiación electromagnética de longitud de onda superior no producirá efecto alguno. Como la frontera del infrarrojo se sitúa alrededor de los $0,7 \mu\text{m}$, las células solares serán capaces de captar cualquier radiación electromagnética, a partir del infrarrojo próximo.

Una célula fotoeléctrica está formada por una unión $p-n$, a la que se le han soldado dos mallas metálicas, una a la cara n y otra a la cara p , que permiten conectar este elemento a un circuito exterior. Un sistema de encapsulado, vidrio o plástico, comunica rigidez al conjunto y permite ensamblar varias células elementales entre sí, para construir los paneles solares (véase fig. 5.1).

Gracias a la unión $p-n$ se establece una diferencia de potencial y gracias a la luz incidente se liberan electrones, y cuando se cierra el circuito exterior, se genera una corriente que viene dada por la expresión [13]

$$I = I_s - I_0 \left[e^{\frac{qe(V - R_s I)}{kT}} - 1 \right]$$

donde I_s es la corriente de cortocircuito,
 I_0 es la corriente inversa máxima,

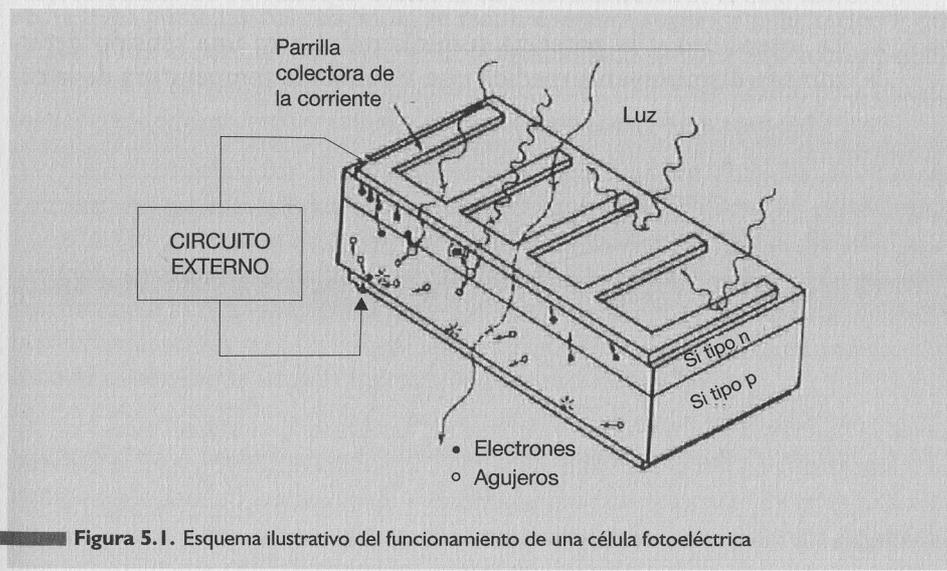


Figura 5.1. Esquema ilustrativo del funcionamiento de una célula fotoeléctrica

$q_e = 1,60 \times 10^{-19}$ C es la carga del electrón,
 V es la tensión en bornes de la célula,
 R_s es la resistencia interna de la célula,
 $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzman y
 T es la temperatura absoluta de la célula.

La curva intensidad-tensión, característica de la célula solar, tiene la forma indicada en la figura 5.2, en la que el corte con el eje vertical ($V=0$) representa la intensidad de la corriente de cortocircuito y el corte con el eje horizontal ($I=0$) representa la tensión de vacío con el circuito abierto. La cual viene dada por

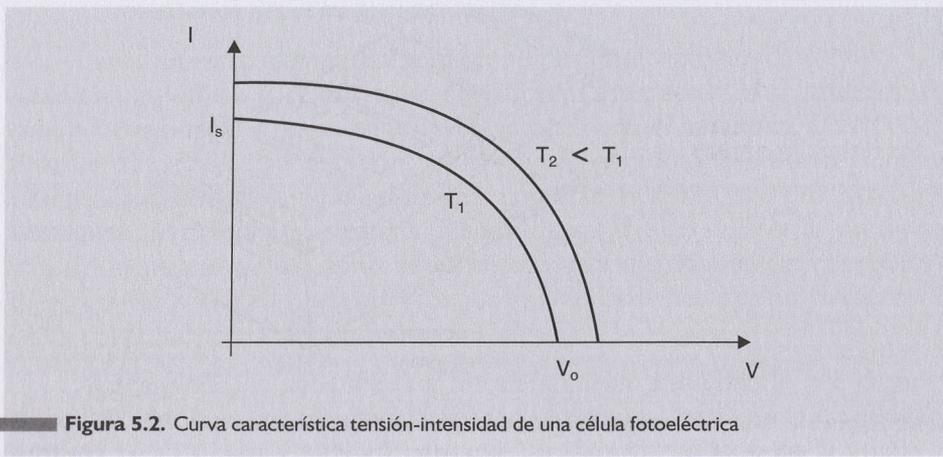
$$V_0 = \frac{kT}{q_e} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right)$$

Puesto que la potencia eléctrica suministrada es igual al producto de la tensión por la intensidad, tendremos que

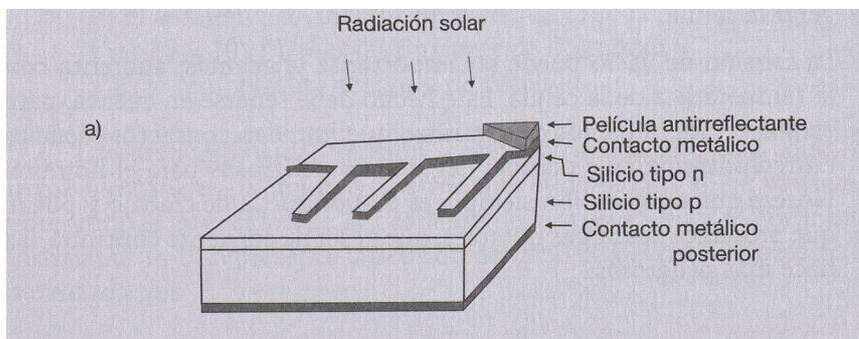
$$W = V \left\{ I_s - I_0 \left[e^{\frac{q_e(V - R_s I)}{kT}} - 1 \right] \right\}$$

Habrá un valor para el cual, para una radiación incidente determinada, la potencia será máxima.

Nótese que el funcionamiento de la célula depende de su temperatura:



Esquema ilustrativo de la constitución de un panel de células fotoeléctricas:



b)



c)

