

CAPÍTULO 2:

LA ENERGÍA SOLAR

FOTOVOLTAICA

La fotovoltaica es la tecnología que convierte la radiación solar en electricidad. Esta tecnología ha sufrido un crecimiento muy rápido durante los últimos años, convirtiéndola en una de las más rentables hoy día.

En este apartado se darán a conocer los principios básicos de esta tecnología.

2.1. La energía del Sol

La energía que desprende el Sol en forma de luz y calor se llama radiación solar, y de esta, solo una pequeña proporción alcanza la superficie terrestre, pero sería suficiente para satisfacer las necesidades de varios planetas como el nuestro.

La atmosfera terrestre refleja hacia el espacio una parte de la radiación entrante y otra parte la absorbe, con lo cual, la radiación que alcanza la superficie es mucho más pequeña que la entrante. Una vez en la superficie, la tierra y los océanos absorben parte de esta radiación y lo que no absorben se ve reflejado otra vez hacia el espacio.

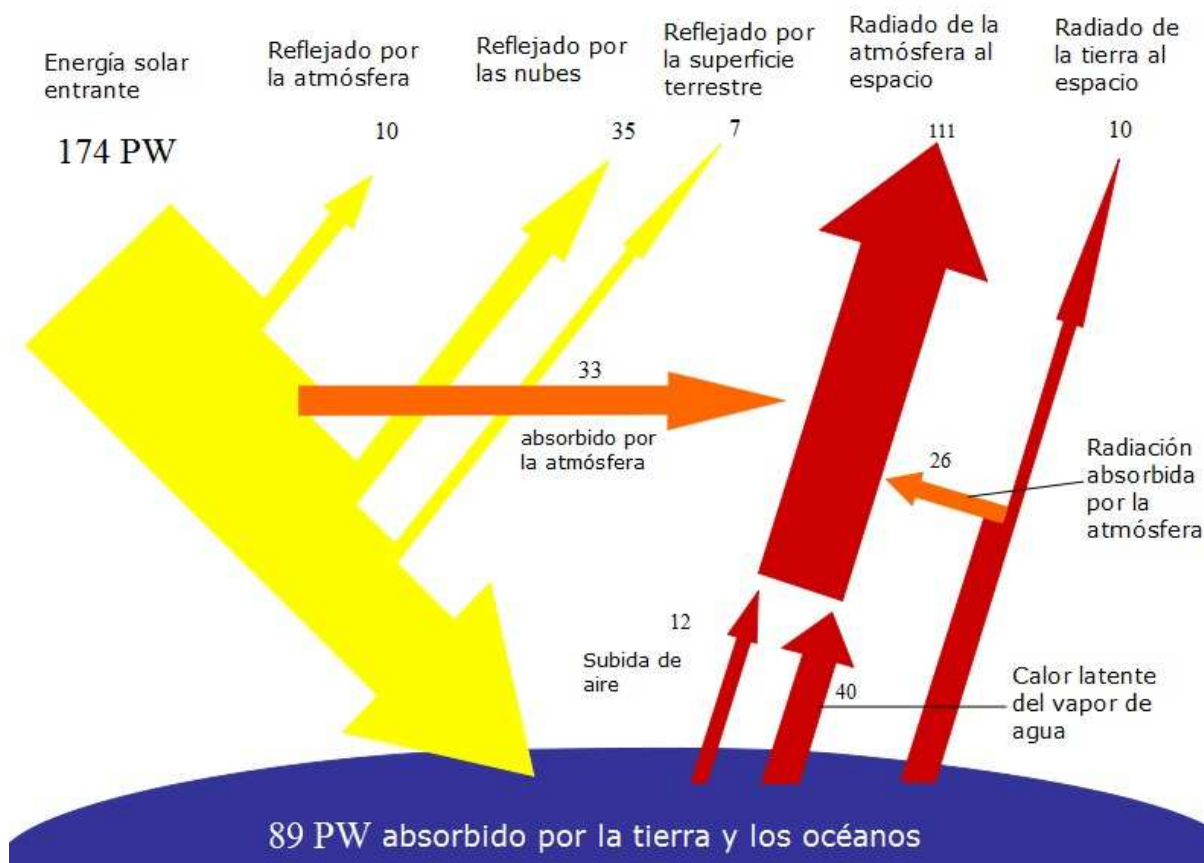


Ilustración 1. Energía solar. [Wikipedia, Nov. 2010]

La intensidad de irradiación solar depende de la distancia entre el Sol y la Tierra. La unidad de medida es el W/m^2 , refiriéndose a la potencia de radiación que se recibe en un metro cuadrado de superficie. Así pues, durante el año, se pueden registrar valores de entre 1325W/m^2 y 1412W/m^2 , obteniendo un valor medio anual de 1367W/m^2 fuera de la atmósfera [DGS, 2008]. Este valor recibe el nombre de constante solar.

La energía que alcanza la superficie terrestre es menor a ese valor. En buenas condiciones atmosféricas, se establece como valor estándar de radiación 1000W/m^2 , independientemente de la localización.

Una vez en la Tierra, se pueden distinguir dos tipos de radiación: directa y difusa. La radiación directa es la que proviene directamente del Sol con una trayectoria recta. La difusa es la radiación que cambia de trayectoria al entrar en contacto con la atmósfera o las nubes, lo que provoca que tenga una intensidad menor. Cuando se habla de radiación global, se está refiriendo al conjunto de las radiaciones.

2.2. Ángulo y posición solar

Para diseñar una instalación fotovoltaica, es importante conocer la trayectoria solar.

Se pueden distinguir dos variables que definen la trayectoria del Sol. La primera es el ángulo de desviación respecto al norte, llamada *azimut solar*. La segunda variable es la altura en la que se encuentra, llamada *altura solar*.

Estas variables dependen principalmente de la latitud geográfica del lugar, el día del año y la hora solar, conociéndose la hora solar como la hora que marcaría un reloj de sol sin aplicarle ningún tipo de corrección.

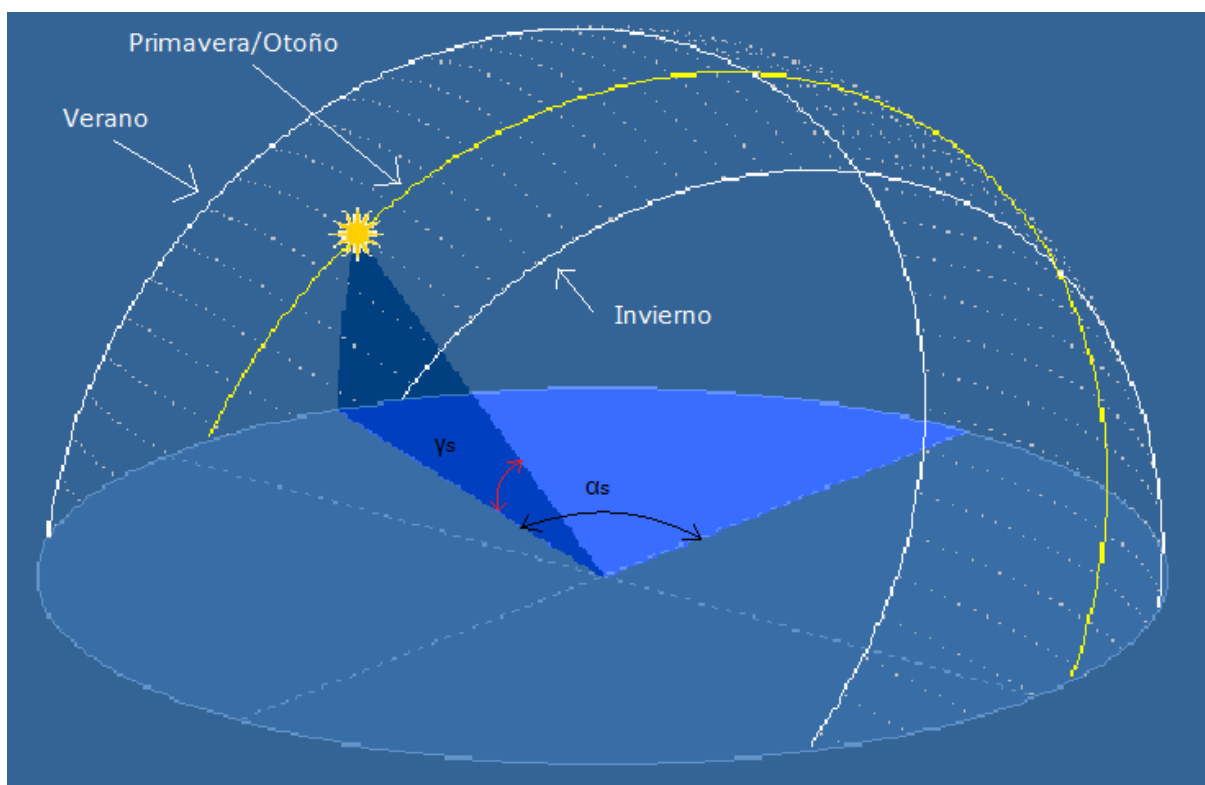


Ilustración 2. Posición solar. [Datos de Censo15]

En la ilustración se puede observar la posición solar para una latitud de $+28^\circ$. El ángulo azimut α_s muestra la desviación del Sol respecto al eje N-S y el ángulo γ_s , altura solar, muestra el ángulo respecto al plano horizontal, siendo 90° a la hora solar 12am. Dependiendo de la estación del año, la trayectoria también varía, cambiando significativamente la altura solar.

Teniendo en cuenta estos datos, los paneles fotovoltaicos deberán colocarse a un azimut y una inclinación óptimas para recibir la máxima radiación media posible al cabo del año.

2.3. Captación de la energía solar

Para poder utilizar la energía solar es necesario un dispositivo que capture esta energía y la transforme en energía eléctrica. Este dispositivo es el panel o módulo fotovoltaico, compuesto por células fotovoltaicas.

Se pueden distinguir dos sistemas de captación basados en paneles: fijo y de seguimiento. Dentro del segundo grupo, se encuentran sistemas con un eje de movilidad o con dos, y con un control pasivo o activo.

Los sistemas de seguimiento consiguen aumentar la producción en hasta un 20 o 30 por ciento respecto a los sistemas estáticos convencionales.

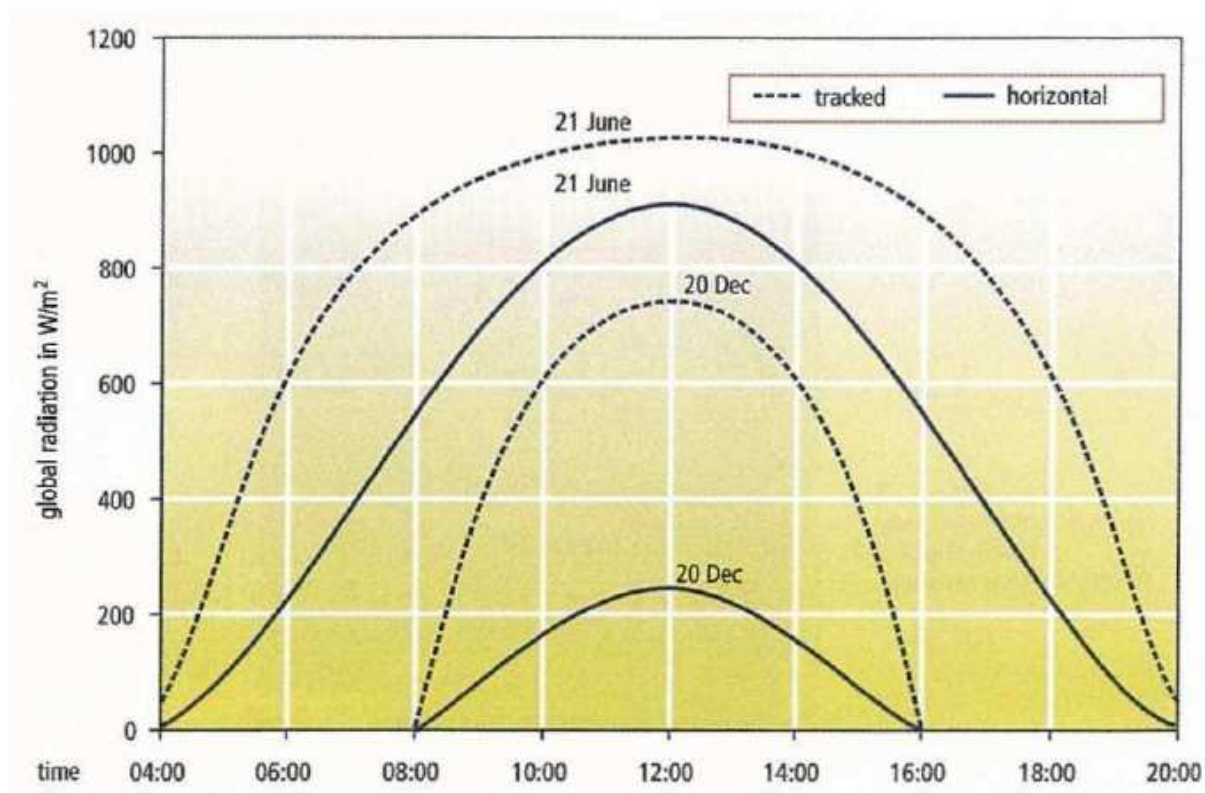


Ilustración 3. Diferencias en radiación obtenida por paneles en superficie horizontal y de seguimiento durante días con cielo despejado. [DGS, 2008, p.15]

El sistema de seguimiento solar de un eje es más sencillo y económico pero solo pueden seguir la inclinación o el azimut solar, no las dos a la vez. Los sistemas de dos ejes, en cambio, son capaces de mantenerse perpendiculares al Sol y captar la mayor radiación posible. A pesar de ser los sistemas de seguimiento de dos ejes los más efectivos, su coste y su complejidad técnica los hacen menos utilizados.

El funcionamiento de estos sistemas consiste en calcular la trayectoria anual del Sol y modificar el ángulo de inclinación cada cierto tiempo. Esto puede hacerse de forma activa, pasiva o incluso manual.

El seguimiento pasivo consiste en colocar a los laterales del panel un sistema termo-hidráulico. Cuando estos tubos empiezan a recibir calor, el fluido interno se evapora y la diferencia de presión entre un lado y otro hace girar el eje.



Ilustración 4. Sistema de seguimiento solar basado en termo-hidráulica. [DGS,2008, p.16]

El seguimiento activo consiste en utilizar un motor controlado electrónicamente. El motor puede ser programado mediante un programa que calcule la posición del sol y de la orden de moverse a unas determinadas coordenadas. También pueden utilizarse sensores para averiguar cuándo la radiación no incide perpendicularmente.

2.4. Efecto fotovoltaico. Los materiales semiconductores

Para explicar el efecto fotovoltaico debe entenderse primero el comportamiento de los materiales semiconductores.

Según la física, los materiales están compuestos por átomos. Cada átomo tiene un núcleo con protones y neutrones y algunas órbitas alrededor en las que se encuentran los electrones. En la última capa del átomo se encuentran los electrones de valencia, que son capaces de desprenderse del núcleo si se le aplica cierta fuerza. Según la fuerza necesaria que haga falta para mover un electrón de valencia a otro átomo se clasifican los materiales en tres clases:

- **Los materiales conductores:** Son materiales en los que los electrones de valencia están débilmente unidos al núcleo y solo necesitan una pequeña cantidad de energía para que puedan moverse. El ejemplo más claro de estos materiales son los metales como el cobre.
- **Los materiales aislantes:** Los electrones están fuertemente unidos al núcleo y muy pocos pueden liberarse con una gran cantidad de energía. El plástico o el vidrio son ejemplos de este tipo.
- **Los materiales semiconductores:** Estos materiales se encuentran entre los conductores y los aislantes. A bajas temperaturas, los semiconductores se comportan como un material aislante. Cuando su temperatura empieza a aumentar, aumenta también su conductividad. El silicio y el germanio son los ejemplos más claros de semiconductores.

2.4.1. Modelo de bandas energéticas

Para definir las propiedades eléctricas de los materiales se establece el modelo de bandas energéticas, basado en la descripción atómica proporcionada por el modelo de Bohr.

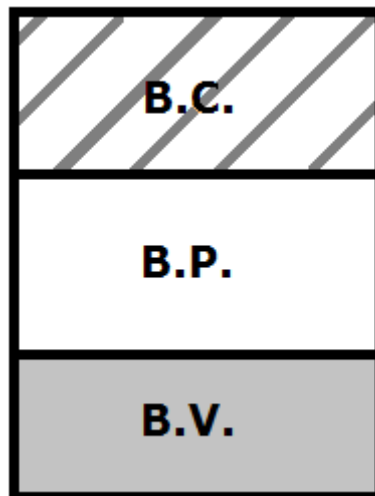


Ilustración 5. Modelo de bandas energéticas.

El modelo se divide en tres tipos de bandas: banda de conducción (B.C.), banda prohibida (B.P.) y banda de valencia (B.V.). La banda de conducción es la responsable de la corriente eléctrica. La banda de valencia es la responsable del enlace atómico. Por último, en la banda prohibida o Bandgap hay ausencia de estados permitidos. Se puede definir entonces como el ancho de la banda prohibida o la energía necesaria para atravesar de un lado a otro como:

$$E_{gap} = E_C - E_V \text{ (eV, electrón-volt)} \quad (1)$$

En los materiales aislantes, el gap es muy amplio y se necesita una energía de entre 5 a 8 eV. En los materiales conductores, en cambio, la banda prohibida es mínima o incluso inexistente, llegándose a solapar las bandas de conducción y valencia (energía requerida muy inferior a 1eV).

Los materiales semiconductores presentan un modelo de bandas intermedio entre el conductor y el semiconductor, requiriendo una energía de entre 0,8 y 3 eV.

2.4.2. Materiales semiconductores

Los semiconductores se pueden clasificar en dos tipos según su grado de pureza: intrínsecos y extrínsecos.

Los semiconductores intrínsecos tienen una estructura interna monocristalina y posee un grado de pureza muy elevado. Se pueden representar de la siguiente manera:

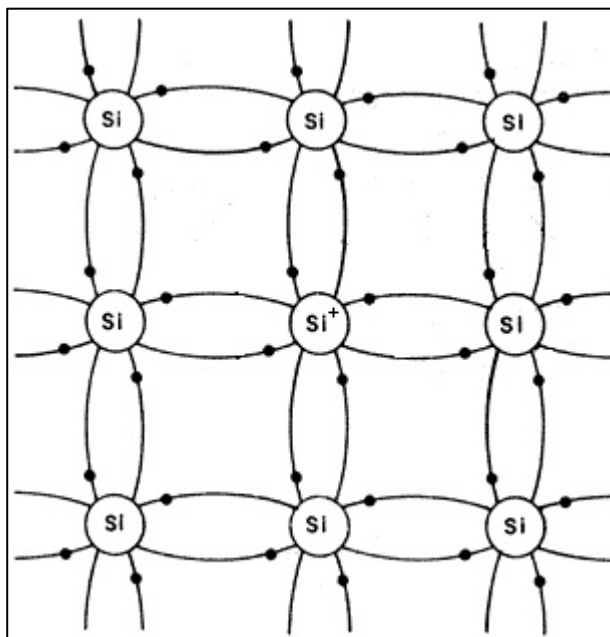


Ilustración 6. Representación de un material semiconductor de silicio a nivel atómico.

A una temperatura de cero grados Kelvin (0°K) los electrones no pueden separarse y no es posible la conducción. En este caso, el material semiconductor se estará comportando como un aislante.

Al aumentar la temperatura mediante energía, los enlaces se rompen y se generan electrones libres y huecos de forma par. Ambos elementos son portadores de carga eléctrica, pero el hueco se define como la ausencia del electrón y tiene polaridad positiva.

Puede ocurrir el caso contrario, que un electrón pierda energía y se junte con un hueco en el enlace. A este proceso se le llama recombinación.

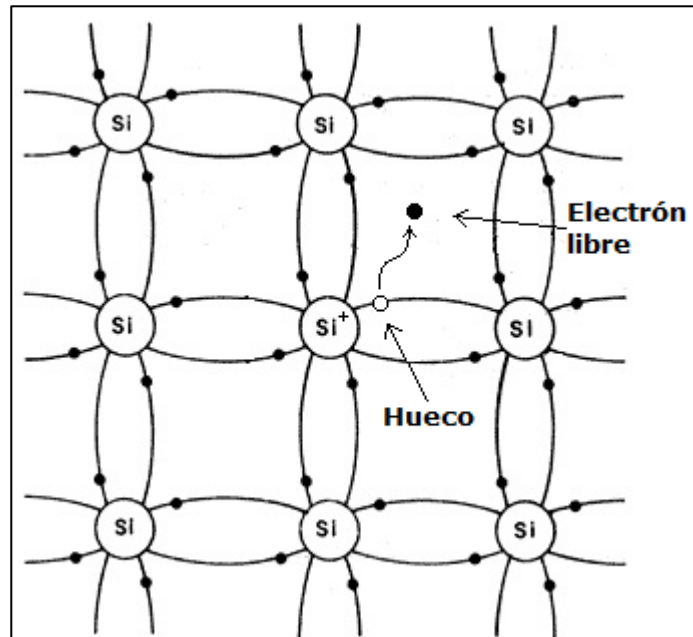


Ilustración 7. Material semiconductor donde se libera un electrón y se forma un hueco.

En los materiales intrínsecos, tanto la concentración de electrones libres (n) como la concentración de huecos (p) son iguales.

$$n = p = n_i \quad (2)$$

Se define como n_i la concentración intrínseca del material. Esta depende de la temperatura y del tipo de material.

El semiconductor extrínseco es un semiconductor intrínseco al que se le han añadido más impurezas sin llegar a romper su malla cristalina. Existen dos tipos de semiconductores extrínsecos según la impureza añadida:

- **Tipo P o aceptor:** Se le añaden impurezas aceptadoras o trivalentes (grupo III de la tabla periódica como el boro o el galio), aumentando el número de huecos y convirtiéndolos en los portadores mayoritarios.
- **Tipo N o donador:** Se añaden impurezas donadoras o pentavalentes (grupo V de la tabla periódica como el arsenio o el fósforo). En este caso, los huecos pasan a ser los portadores minoritarios y los electrones los mayoritarios.

Según la ley de acción de masas, el producto de la concentración de huecos y electrones resulta ser una constante independiente de la cantidad de impurezas añadidas.

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (3)$$

2.4.3. Unión P-N

Los materiales semiconductores tienen tres tipos de transporte de cargas:

- **Por arrastre:** el transporte es debido a la presencia de un campo eléctrico.
- **Por difusión:** el transporte se debe a que existe una diferencia en las concentraciones de cargas y tienden a igualarse.
- **Por Efecto Hall:** actúa de forma conjunta un campo eléctrico y uno magnético.

La unión P-N se puede definir como la unión abrupta de un material tipo P y un material tipo N. Al unirse, los portadores tienden a igualarse de un lado a otro por difusión y se crea una zona de carga entre las dos mitades, llamada zona de carga espacial, con cargas negativas en la parte P y cargas positivas en la parte N.

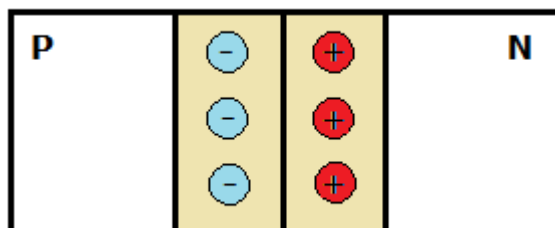


Ilustración 8. Modelo de la unión P-N

En la zona de carga se forma un campo eléctrico en dirección de N a P, lo que provoca una caída de potencial en esa región de signo opuesto, llamado potencial de contacto (V_0). Según el tipo de semiconductor, ese potencial puede variar de 0,3 a 0,7 V.

Se pueden distinguir también dos densidades de corriente distintas:

- La densidad de corriente creada por difusión (J_{dif}) se debe a los portadores mayoritarios. A mayor potencial de contacto, menor es J_{dif} .
- La densidad de corriente creada por arrastre (J_{ar}) es debida a los portadores minoritarios y tiene signo opuesto a la anterior. Depende del potencial de contacto y la temperatura.

A partir de estas dos densidades de corriente se obtiene la corriente de difusión (I_D) y la corriente de saturación inversa (I_S) propias de los dispositivos semiconductores.

Cuando la unión P-N se encuentra en condiciones de equilibrio, es decir, sin polarización externa, sin variación de temperatura y sin radiación externa, se obtiene que:

$$\bar{J}_{dif} = -\bar{J}_{ar} \quad (4)$$

2.4.4. Principio de las células solares

Las células solares están formadas por materiales semiconductores como los que se acaban de tratar. Las células más utilizadas suelen ser las formadas por silicio. La misión principal de estos dispositivos es transformar la energía solar en energía eléctrica.

Cuando incide, sobre un material semiconductor, una radiación luminosa con una energía en los fotones suficiente, los electrones de valencia se desprenden del átomo. A esto se le llama efecto fotovoltaico.

La energía del fotón (E_f) incidente debe ser más grande (aunque no demasiado grande) a la energía del gap del material (E_{gap}):

$$E_f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq E_{gap} \quad (5)$$

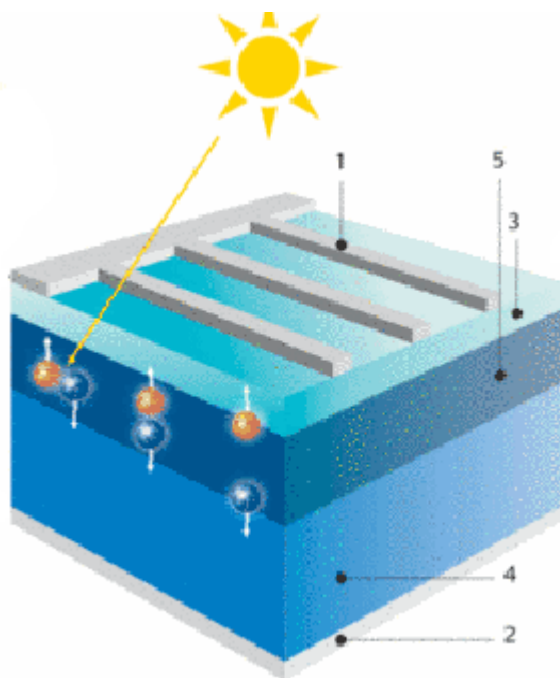
Donde h es la constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s), c es la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s) y λ es la longitud de onda.

Para cada material existe una longitud de onda de la radiación máxima, y por lo tanto, una energía del fotón mínima, que produce la fotoconducción, llamada umbral de fotoconducción.

Una vez producida la ruptura del par electrón-hueco causada por el efecto fotovoltaico, es posible la recombinación por la existencia de un defecto en la estructura cristalina del material. Para evitarlo, debe crearse en el interior un campo eléctrico que separe los dos tipos de portadores. Esto se consigue mediante la unión P-N. De esta forma se crea una corriente eléctrica que atraviesa la célula solar.

Para poder aprovechar todas las cargas libres posibles, debe trabajarse con una estructura cristalina con el menor número de defectos posibles. Por este motivo se utilizan normalmente obleas de silicio puro o cristalino.

Las cargas libres generadas se desplazan mediante difusión por el material. A causa de la radiación, en la zona de carga espacial también se generan cargas libres, que son movidas a su respectivo lugar (zona P o zona N) mediante el campo eléctrico existente.



1. Electrodo negativo
2. Electrodo positivo
3. Zona N
4. Zona P
5. Zona de carga espacial

Ilustración 9. Separación de cargas generadas en la zona de carga espacial de una célula solar. [Refrigeració.cat, Nov. 2010]

Cuando la célula solar se encuentra en circuito abierto, la acumulación de cargas genera una tensión, llamada tensión de circuito abierto (V_{oc}).

Por otro lado, si la célula está cortocircuitada, se genera una corriente en sentido interno N-P llamada corriente de cortocircuito (I_{sc}). Esta corriente tiene el mismo sentido que la corriente de saturación inversa de algunos dispositivos semiconductores, como la del diodo, solo que en este caso se trata de un dispositivo generador.

2.5. Las células solares

Según el material con el que están hechas las células fotovoltaicas, cambia su eficiencia y su diseño notablemente.

1) Células de silicio

Hoy día, el 90% de las células fotovoltaicas comerciales que se fabrican son mediante obleas de silicio cristalino. El silicio, al ser muy abundante en la naturaleza, abarata enormemente su coste.

Existen tres tipos de células de silicio:

- Silicio puro monocristalino: se obtienen a partir de silicio muy puro, creando una sola pieza de cristal. Son difíciles de fabricar, de larga durabilidad y caras. Su rendimiento es relativamente alto, de un 16% los modelos comerciales. [Ente Vaso de la Energía, 2000, p.14]
- Silicio puro policristalino: se construyen dejando solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, obteniendo un sólido formado por muchos pequeños cristales desordenados. Tienen una superficie granulada y un grosor mayor que las monocristalinas. Su fabricación es más fácil, por lo que resultan más económicas, pero tienen un rendimiento alrededor del 14% en los modelos comerciales. También tienen una durabilidad inferior a las anteriores, por lo que habitualmente se utilizan en zonas donde pueden resultar dañadas mediante granizo, arena o nieve. [Ente Vaso de la Energía, 2000, p.14]
- Silicio amorfo: en este caso, el panel no tiene estructura cristalina. Es el tipo de célula con el proceso de fabricación más sencillo y barato, aunque con menos durabilidad y rendimiento (aproximadamente del 7%). Se construyen a base de evaporar sobre un cristal el material semiconductor. Se utilizan principalmente en dispositivos electrónicos como relojes o calculadoras, en paneles portátiles o en plantas fotovoltaicas en condiciones de poca irradiación directa. [Ente Vaso de la Energía, 2000, p.14]

2) Células de lámina delgada (Thin-Film)

Estas células tienen un espesor aproximadamente cien veces menor que las células basadas en silicio cristalino, lo que supone un ahorro de material empleado y un ensamblado más sencillo que repercute favorablemente en los costes de producción. Además, se obtiene una mejor eficiencia a escala de laboratorio.

Las células de lámina delgada más utilizadas son las de telurio de cadmio (CdTe) y las de cobre, indio, galio y selenio comprimidos (CIGS). [Revista "Era Solar", 2009]

La tecnología CdTe posee eficiencias de un 11% en modelos comerciales. Sin embargo, presentan la desventaja de la utilización de cadmio, material muy tóxico para el medio ambiente. Últimamente esta tecnología ha sufrido un gran crecimiento.

La tecnología CIGS comienza a dejarse ver en los mercados. Tiene la dificultad en la fabricación de poder controlar sus parámetros de procesamiento, ya que la lámina cuenta con cuatro o cinco elementos diferentes. La eficiencia media de los módulos comerciales ronda el 12%. Las láminas obtenidas mediante CIGS son flexibles y suelen utilizarse en pequeños dispositivos como teléfonos móviles, PDAs u ordenadores portátiles.

3) Células tándem

Este tipo de células se crean con dos o tres bandas de diferentes niveles de energía. Con esto se consigue aprovechar mejor el espectro incidente de energía.

El rendimiento de las células tándem es mejor en comparación con las células comunes. La desventaja es su elevado coste debido a la creación mediante la superposición de dos o tres células. Son muy utilizadas en aplicaciones espaciales, como por ejemplo en satélites.

2.5.1. Características eléctricas

El circuito eléctrico equivalente de una célula solar es la de una fuente de corriente en paralelo con un diodo. La salida de la fuente de corriente es directamente proporcional a la recepción de luz (fotocorriente o corriente fotogenerada I_L). Si hay oscuridad, la célula solar no trabaja como dispositivo activo, sino como un diodo, por ejemplo de unión PN. El diodo no produce ni corriente ni tensión. No obstante, si se conecta a una fuente externa de tensión, genera una corriente I_D , llamada corriente del diodo o corriente en oscuridad. El diodo, entonces, determina la curva V-I característica de la célula solar.

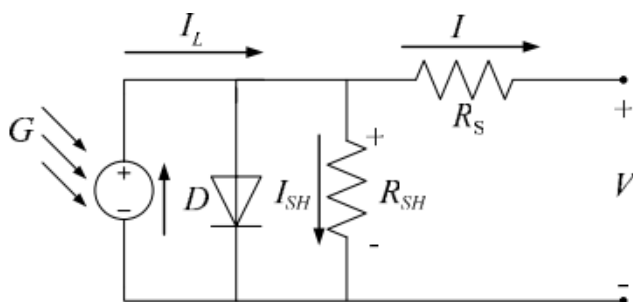


Ilustración 10. Modelo de una célula solar simplificado. [González-Longatt, 2005, p.1]

Incrementando la sofisticación, precisión y complejidad, se pueden añadir más elementos y factores al modelo:

- Dependencia de la corriente de saturación de diodo I_0 con la temperatura.
- Dependencia de la corriente fotogenerada I_L con la temperatura.
- Resistencia en serie R_S , que ofrece más precisión en la curva entre el máximo punto de potencia y la tensión de circuito abierto. Representa las pérdidas internas debidas al flujo de corriente.
- La resistencia shunt R_{sh} paralela al diodo, corresponde a la corriente de fuga a tierra y es normalmente despreciada.

Idealmente, la resistencia serie R_S es igual a cero, que es relativamente común tomarlo en los modelados de las células. La corriente generada por la célula solar puede explicarse como la diferencia entre la corriente fotogenerada I_L y la corriente del diodo I_D .

$$I = I_L - I_o \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_S)}{n \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (6)$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada; I_o es la corriente de saturación del diodo; R_S es la resistencia serie; n es el factor de calidad del diodo; V_t es el voltaje térmico ($V_t = kT_c/e$; k la constante de Boltzman, T_c la temperatura de la célula en grados Kelvin y e la carga del electrón). [González-Longatt, 2005, p.2]

Con esta ecuación puede describirse adecuadamente la característica V-I de la mayoría de las células solares fotovoltaicas.

En la siguiente figura, puede verse la típica característica V-I de una célula fotovoltaica para una cierta irradiación G y una cierta temperatura de la célula fija T .

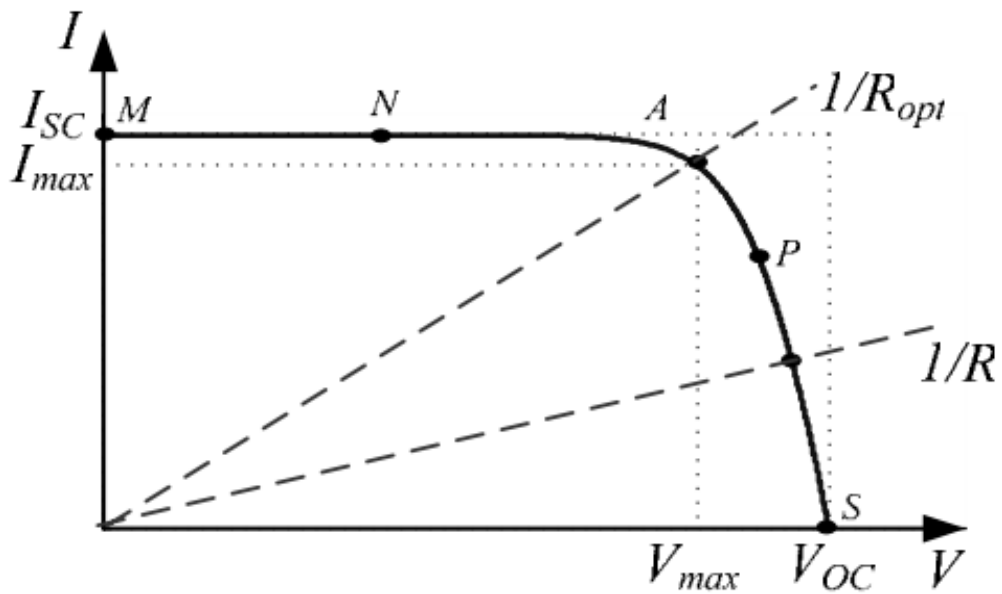


Ilustración 11. Típica curva V-I de una célula fotovoltaica. [González-Longatt, 2005, p.2]

Para una carga resistiva, la característica de carga correspondería a una línea recta con pendiente $1/R$. Para una carga resistiva R pequeña, la célula trabajaría en la región M-N de la curva, donde la célula trabajaría como una fuente de corriente constante, equivalente a la corriente de cortocircuito. Por otro lado, si la carga resistiva es muy grande, la célula trabajaría en la región P-S como fuente de tensión constante, equivalente a la tensión de circuito abierto.

Teniendo en cuenta todos estos factores, una célula fotovoltaica, y por lo tanto, un módulo fotovoltaico, se caracteriza por unos parámetros fundamentales, que definen el panel a la hora de elegir uno u otro [González-Longatt, 2005, p.2]:

- Corriente de cortocircuito: Es el valor más grande que puede alcanzar la corriente generada por la célula. Se produce cuando la tensión de salida es nula.
- Tensión de circuito abierto: Corresponde a la caída de tensión en el diodo cuando la corriente fotogenerada es igual a cero. Refleja la tensión de la célula durante un momento de oscuridad, por la noche o por una sombra, y puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$V_{oc} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_o}\right) \quad (7)$$

- Máximo punto de potencia: es el punto de trabajo $A(V_{max}, I_{max})$ de la figura 6, cuando la potencia disipada en la carga resistiva es máxima.
- Eficiencia máxima: es la relación entre la máxima potencia y la potencia lumínica incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{A \cdot G_a} \quad (8)$$

Donde G_a es la irradiación ambiente y A es el área de la célula.

- Fill Factor (FF): es la relación entre la máxima potencia que puede ser disipada por la carga y el producto de I_{sc} y V_{oc} :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (9)$$

El Fill Factor es una medida de la característica V-I real. Este valor es mayor de 0,7 en las mejores células. El FF disminuye con el incremento de la temperatura de la célula.

- Coeficientes de temperatura: indican la variación de los valores de tensión, corriente y potencia dados por los fabricantes del panel en función de la temperatura. La unidad con la que se expresa es el $[\%/^{\circ}\text{C}]$, aunque también puede encontrarse como $[mV/^{\circ}\text{C}]$ o $[mA/^{\circ}\text{C}]$. Por ejemplo, un coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto de $-0,32 \%/^{\circ}\text{C}$ representa una disminución del 0,32% de la tensión dada por cada grado

por encima de los 25°C (valor de temperatura de prueba estándar). Si la temperatura fuera un grado inferior, sería un aumento del 0,32%.

La tensión de circuito abierto aumenta logarítmicamente con la irradiación ambiente, mientras que la corriente de cortocircuito es función lineal de esta. Con el incremento de la temperatura, la tensión de circuito abierto decrece linealmente, lo que supone una pérdida de eficiencia. La corriente de cortocircuito aumenta ligeramente con la temperatura. Más adelante se verá un modelado con software Matlab del panel fotovoltaico elegido teniendo en cuenta también las variables externas.

2.5.2. Puntos calientes

El problema del punto caliente es muy común en cualquier instalación fotovoltaica con problemas de sombras.

Si dentro del módulo, una célula se encuentra sombreada y las otras no, se ve obligada a comportarse como una carga. En vez de producir energía, la consume, y comienza a disipar la energía generada por las demás. La célula sombreada eleva su temperatura, lo que puede llegar a dañar irreversiblemente el panel.

Para resolver este inconveniente, se colocan diodos bypass en paralelo con las células conectadas en serie, agrupando varias o una sola, según la protección que se quiera conseguir. Si el módulo no recibe sombras, trabajará correctamente, pero si alguna de estas células es tapada por una sombra, se polarizará inversamente y el diodo proporcionará un camino de paso a la corriente limitando la potencia disipada. En la práctica suelen colocarse unos tres diodos por panel para limitar costes.

También existen diodos de bloqueo que se instalan en grandes generadores fotovoltaicos. Estos diodos también protegen el panel, pero están conectados en serie con las asociaciones en paralelo para evitar el paso de una corriente no deseada.

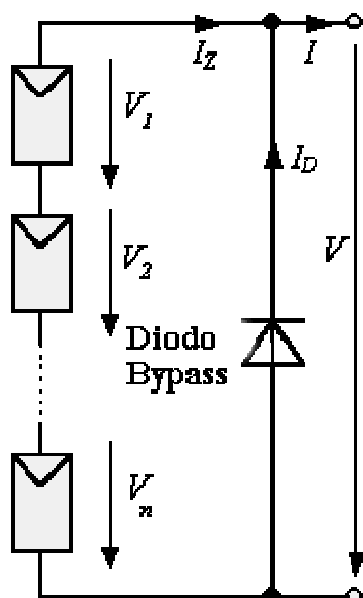


Ilustración 12a. Posible colocación de un diodo bypass.

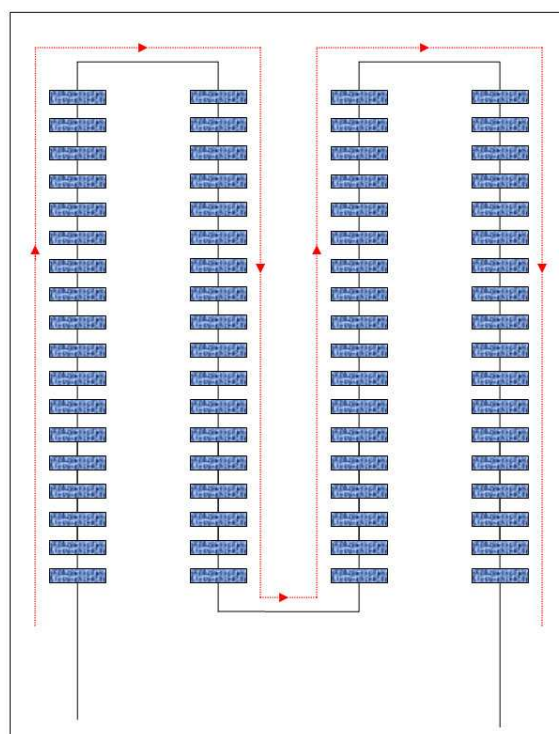


Ilustración 12b. Disposición estándar de las células en un panel.

2.6. El módulo fotovoltaico

La célula solar proporciona muy poca energía, y a muy baja tensión, además de ser muy frágil. Los fabricantes agrupan las células procurando que trabajen como una sola de gran tamaño, buscando los niveles de tensión y potencia adecuados para cada tipo de aplicación. También se les añade una protección a los agentes climatológicos adversos. Es lo que se le denomina panel o módulo fotovoltaico.

En el panel, se asocian eléctricamente un determinado número de células solares y se protege todo el compacto sellándolo al vacío.

Los módulos comerciales más usuales hoy día están compuestos de 40 a 60 células, y con tensiones que pueden variar de muy pocos volts a más de 50V. También se pueden encontrar módulos más pequeños para integrarlos en electrónica de consumo o para aplicaciones portátiles.

En el mercado actual, la mayoría de los módulos poseen un diseño similar al siguiente:

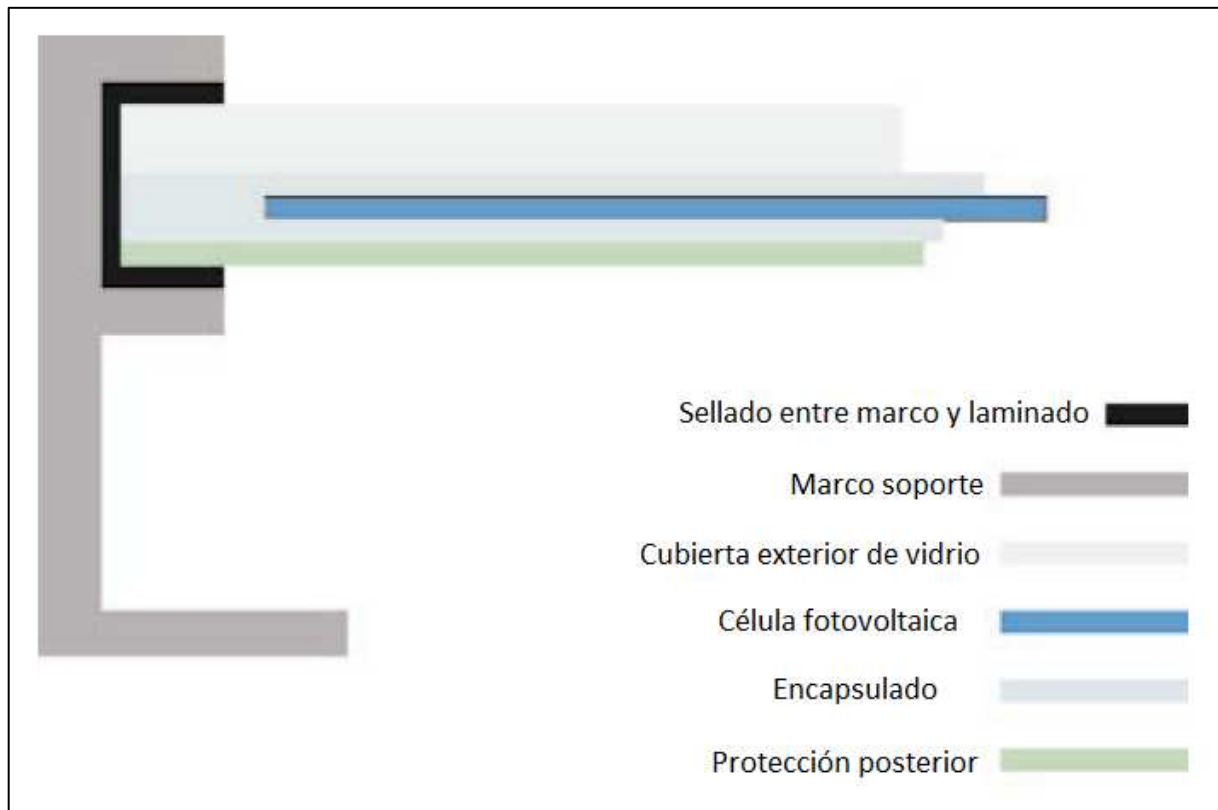


Ilustración 13. Sección de un panel fotovoltaico. [Ente Vasco de la Energía, 2000, p.17]

A parte de las capas de protección, el panel lleva dos bornes de salida (positivo y negativo) y diodos de protección bypass, como ya se ha comentado.