

4. Paneles fotovoltaicos

El generador fotovoltaico se compone por un campo de módulos fotovoltaicos, éstos a su vez están formados por asociaciones de células solares conectadas entre sí, en este sentido todas las indicaciones realizadas en el apartado anterior son extensibles a los módulos y al propio generador.

La asociación de células para dar lugar a un modulo, puede ser en serie o en paralelo:

- Conexión en serie: se suman las tensiones de cada célula y se mantiene la corriente.
- Conexión en paralelo: se suman las corrientes de cada una de ellas y se mantiene la tensión.

Por tanto, el comportamiento eléctrico del módulo va a depender del comportamiento que tengan cada una de las células que lo forman y de cómo estén asociadas eléctricamente.

4.1 Parámetros característicos

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos suelen indicar las siguientes características eléctricas, térmicas y físicas:

- En condiciones estándar (STC)
 - I_{CC}
 - U_{ca}
 - P_{PMP}
 - U_{PMP}
 - I_{PMP}
- Curva característica para distintos niveles de irradiancia y temperatura
- TONC
- Coeficiente de variación de la tensión del módulo con la temperatura
- Coeficiente de variación de la corriente del módulo con la temperatura

- Coeficiente de variación de la potencia del módulo con la temperatura
- Número y tipo de células
- Dimensiones
- Peso
- Aislamiento
- Homologación

4.2 Funcionamiento de los módulos

Las instalaciones fotovoltaicas no trabajan casi nunca en condiciones estándar debido a que en muy pocas circunstancias existe una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura del generador fotovoltaico igual o inferior a 25 °C. La curva característica del módulo depende de su temperatura y del nivel de irradiancia incidente.

El nivel de irradiancia varía constantemente a lo largo del día, afectando proporcionalmente a la curva características del módulo. De esta forma al disminuir el nivel de irradiancia, suponiendo que la temperatura del módulo se mantiene constante, disminuye la tensión en el punto de máxima potencia y disminuye la corriente.

De igual forma, la temperatura del módulo varía a lo largo del día ya que está influenciada principalmente por la irradiancia incidente, la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, las propiedades térmicas del módulo y las condiciones del entorno donde se sitúe.

Al aumentar la temperatura del módulo se reduce la tensión de circuito abierto y la tensión de máxima potencia, mientras que la corriente permanece prácticamente constante.

En el dimensionado de instalaciones fotovoltaicas se tienen que tener muy en cuenta las tensiones máximas y mínimas que se producen a la salida del generador fotovoltaico cuando su temperatura es la mínima y la máxima alcanzable respectivamente para que los equipos que estén conectados al generador funcionen correctamente.

En la realidad, lo que suele suceder es que cuando existen elevados niveles de irradiancia (días despejados a mediodía solar), es más frecuente que la temperatura ambiente sea mayor que cuando existen bajos niveles de irradiancia (días nublados y por la mañana y por la tarde en días despejados), de esta forma al tener mayor irradiación,

también tenemos una mayor temperatura en los módulos y la inversa. Por ello, la forma de la curva característica de un generador fotovoltaico o módulo es la siguiente para diferentes ratios de temperatura e irradiación.

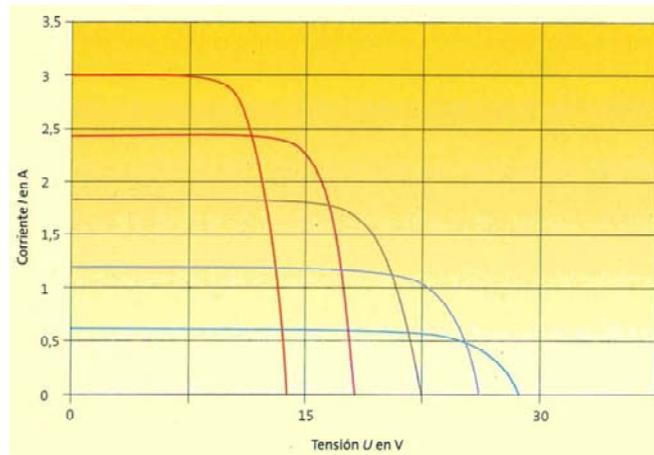


Figura 4.1: Curva Característica T-I de un módulo en condiciones reales

Es esta figura, se puede observar como para una irradiación baja (200 W/m^2) y temperatura baja ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), línea azul, la tensión prácticamente permanece constante y la corriente disminuye y el efecto contrario, que para una para una irradiación alta (1.000 W/m^2) y temperatura alta ($75 \text{ }^\circ\text{C}$), línea roja, la corriente prácticamente permanece constante y la tensión disminuye.

Estas circunstancias provoca en la instalación unas pérdidas de potencia que alcanzan el 20% del valor nominal de potencia pico instalada.

Se debe procurar que sobre el módulo incida la mayor irradiancia posible y que su temperatura, en cada instante, sea mínima. Esto se consigue con una buena selección de la inclinación, orientación y tipo de montaje, para que se encuentre lo mas ventilado posible.

4.2.1 Sombreamiento de módulos

Uno de los problemas que presentan los módulos, es su funcionamiento frente a un sombreado parcial sobre una célula del módulo debido a que cae una hoja, a suciedad excesiva en ese punto o sombreado por elementos colindantes o cercanos.

La célula sombreada no producirá corriente alguna sino que consumirá la corriente que producen el resto de células (sentido inverso de circulación de la corriente). Dicho flujo de corriente se transforma en calor. Cuando dicha corriente es lo

suficientemente alta deteriora la célula y se origina el efecto de **punto caliente**, dañando la célula y el módulo. La máxima corriente que puede circular es la corriente de cortocircuito.

Por otro lado la asociación en serie de entre 18 y 20 células, pueden producir una tensión a circuito abierto de unos 12 V. La tensión de corte de una célula se sitúa en 20V. Si se alcanza la tensión de corte puede fluir una corriente en sentido inverso a través de la célula solar. Para evitar la formación de un punto caliente, se hace pasar la corriente a través de un diodo by-pass colocado en paralelo a la célula solar. Este diodo evita, que alcance la tensión de corte en la célula en la dirección de bloqueo.

La mayor protección frente al sombreado se consigue si se conectan diodos by-pass a cada una de las células solares. En la práctica debido a la caída de tensión que puede producirse se conecta un diodo bypass por cada ramal de 18-20 células solares en serie. En un módulo estándar con 36 a 40 células existe en su caja de conexiones dos diodos by-pass.

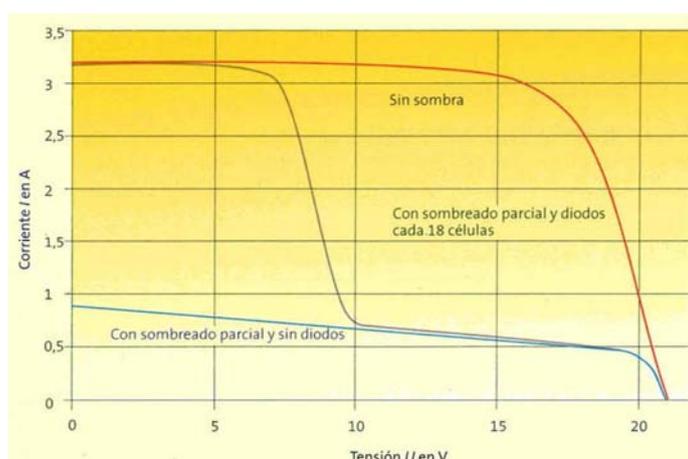


Figura 4.2: Curva Característica T-I para módulos sombreados y con diodos.

4.2.2 Comparación entre módulos de película delgada y silicio cristalino

En la práctica, todos los módulos que existen en el mercado tienen un funcionamiento similar. Las diferencias entre los módulos cristalinos y los de película delgada radican en el rendimiento y en cómo influyen en ellos el nivel de irradiancia, la temperatura, la sensibilidad espectral y la tolerancia a las sombras, además del efecto del envejecimiento en las de silicio amorfo.

Hay que resaltar que en los módulos de película delgada la curva corriente-tensión es muy plana sobre todo en los módulos CdTe, por lo que el punto de máxima potencia no está tan claramente definido siendo necesario una regulación más precisa para hacer que funcionen en ese punto.

| Tipo de Módulo | Factor de Forma |
|---------------------------|------------------------|
| Silicio Cristalino | 0,78 a 0,85 |
| Silicio amorfo | 0,56 a 0,61 |
| CIS | 0,64 a 0,66 |
| CdTe | 0,47 a 0,64 |

Tabla 4.1: Factor de Forma de diferentes tipologías.

Los módulos de película delgada presentan como ventaja que tienen más posibilidades en cuanto a sus dimensiones y formas geométricas. En los módulos cristalinos las dimensiones de los módulos vienen fijadas por la geometría de las obleas de silicio. La tensión nominal depende del número de células en serie. Como se ha descrito anteriormente las células de película delgada constan la mayoría de bandas de células de 0.5 a 2 cm de ancho. Los fabricantes de células, y de módulos, con las técnicas de película delgada pueden determinar libremente el diseño de los módulos modificando el número y longitud de las bandas de células conectadas. A partir del diseño del módulo, se determina la potencia, y con ella la corriente y la tensión del módulo. Mediante el aumento de la superficie del módulo se puede aumentar, casi de forma continua, la potencia.

Además los módulos de película delgada son menos sensibles a los sombreados parciales que los de silicio cristalino. El sombreado total de una célula ocasiona en los módulos estándar de silicio una disminución del orden de la mitad de su potencia. Por el contrario, las células en banda de los módulos de película delgada dificultan el sombreado total de una célula. La potencia disminuye por ello proporcionalmente a la superficie cubierta. Las pérdidas por sombras son por lo general menores a las de los módulos de silicio cristalino.

Los módulos CIS presentan un comportamiento con la temperatura análogo a los módulos de silicio cristalino.

El coeficiente de variación de la potencia con la temperatura en un módulo de película delgada es mucho menor que el mismo coeficiente en un módulo cristalino. El

punto de máxima potencia para diferentes temperaturas están muy próximos unos a otros. Esto hace que esta tecnología de película delgada presente un buen comportamiento en las aplicaciones de integración en edificios, donde en general, no es posible una buena ventilación de los módulos, ni evitar el sombreado de los mismos.

No obstante, hay que recordar al lector que aunque presenta estas ventajas el ratio Wp/coste suele ser menor que en los módulos de silicio cristalino.

En los módulos amorfos, cuando reciben bajos niveles de irradiancia, el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura puede alcanzar valores positivos, y sin embargo en los módulos cristalinos estos coeficientes son siempre negativos cualquier valor de irradiancia.

Los módulos de Cd-Te alcanzan en general una elevada tensión nominal del módulo, que suele estar entre 30 V y 60 V. Por ello, estos módulos en instalaciones aisladas se conectan a baterías de 24 V.

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de temperatura típicos para los módulos de película delgada en condiciones estándar.

| Coeficiente de variación: | Amorfo | CdTe | CIS- CIGS |
|--|---------------|---------------|------------------|
| De la tensión U_{ca} con la temperatura (%/°C) | -0,28 a -0,5 | -0,26 a -0,5 | -0,22 a -0,43 |
| De la corriente I_{CC} con la temperatura (%/°C) | -0,06 a -0,1 | -0,045 a -0,1 | -0,02 a -0,04 |
| De la Potencia P_{PMP} con la temperatura (%/°C) | 0,1 a -0,3 | -0,39 a -0,45 | -0,2 a 0,36 |

Tabla 4.2: Comparativa de características térmicas de módulos fotovoltaicos.

4.3 Conexión de módulos

Como se comentó anteriormente, los módulos fotovoltaicos se asocian en serie o en paralelo formando un generador fotovoltaico. Para conocer las características eléctricas debidas a la asociación de módulos se deben tener en cuenta los mismos criterios que se han indicado cuando se asocian las células.

La asociación en serie de los módulos se simboliza por un ramal. Hay que recordar que la tensión de circuito abierto de los módulos es superior a las tensiones de

funcionamiento correspondiente al punto de máxima potencia. De esta forma obtenemos la tensión requerida.

Conexión en Serie: se conectan diferentes placas uniendo el polo de la primera con el contrario de la segunda. La tensión total del sistema es la tensión del sistema multiplicada por el número de placas colocadas en serie. La intensidad total por el contrario es la intensidad de una única placa

Los distintos ramales de módulos en serie se suelen conectar en paralelo para configurar un generador fotovoltaico. De esta forma obtenemos la corriente requerida.

Conexión en paralelo: se conectan diferentes placas uniendo todos los polos positivos por un lado y los negativos por el otro. La tensión total del sistema es la tensión de una sola placa. La intensidad total es la intensidad de una multiplicada por el número de placas solares en paralelo.

Para reducir las pérdidas debidas a la dispersión de los parámetros eléctricos de los diferentes módulos se deben utilizar módulos de curvas características iguales, es decir, de la misma marca y modelo.

4.4 Fabricación de módulos

4.4.1 Conexión de células

4.4.1.1 Módulos Cristalinos

Un módulo fotovoltaico está formado por la conexión en serie, o serie-paralelo de varias células solares. Para ello se suelda la cara del contacto delantero de una célula con el contacto trasero de la célula siguiente, de esta forma quedan las células conectadas en serie al quedar el polo negativo (la cara delantera) conectados al polo positivo (cara posterior) de la célula siguiente. Los extremos iniciales y finales de la cadena serán utilizados como las conexiones eléctricas del módulo.

En la fabricación industrial de módulos comerciales, el conexionado de las células se realiza de forma automática.

4.4.1.2 Módulos de película delgada

En el caso de módulos de película delgada la interconexión de las células se realiza en el propio proceso de elaboración de las células y se consigue mediante

separación de las diferentes capas de la célula. Para ello se cortan los materiales en tiras de células de cerca de 1 cm de anchura con un láser o mediante surcos mecanizados.

4.4.2 Encapsulado de las Células

Las células, una vez conectadas en serie o serie-paralelo, se encapsulan para protegerlas de las condiciones climáticas como lluvia, humedad, polvo, etc.

Por la parte frontal de las células, donde debe incidir la radiación solar, se emplea normalmente vidrio aunque en ocasiones muy particulares es posible emplear vidrios acrílicos (metacrilato), lacas o láminas de plástico, con algún material intermedio, normalmente EVA (Etilen-Vinil-Acetato), teflón o resina. Estos materiales deben ser muy transparentes para que permitan el paso de la mayor cantidad de la radiación solar incidente.

Por estas razones los materiales empleados en las caras frontales son vidrios con bajo contenido en óxido de hierro, los cuales dejan pasar del orden del 91% de la radiación solar.

Para soportar las altas tensiones térmicas que se producen por las grandes diferencias de temperaturas a las que se exponen, los vidrios se templan.

Existen vidrios de reciente desarrollo, los cuales alcanzan, tras un tratamiento adicional antirreflectante mediante técnicas de cauterización o mediante una capa de inmersión, una transparencia del orden del 96%. Con vidrios estándares la energía producida por un módulo disminuiría en más de un **4%** que con los vidrios específicos, llamados vidrios solares, que se suelen utilizar en los módulos fotovoltaicos.

En la parte posterior, se suele utilizar un polímero opaco denominado tedlar, aunque en ocasiones se utilizan vidrios templados, láminas de plástico ó metálicas, etc.

Existen tres encapsulados diferentes:

- Encapsulado EVA,
- Encapsulado con teflón
- Encapsulado con resina

4.4.3 Salida de cables

Para la salida de las conexiones eléctricas de la cadena de células se suele realizar mediante un conector eléctrico que sale por la parte posterior del módulo.

Estas conexiones de los módulos deben tener un grado de aislamiento mínimo de IP 64 y tener una protección de clase II.

Durante el montaje hay que tener en cuenta de no romper el aislamiento.

Otra posibilidad de sacar los cables es a través de la cara frontal o lateral del marco del cristal.

En función de la salida de cables elegida se tiene una forma de montaje u otra.

4.5 Diseño de módulos

Los módulos se emplean en instalaciones aisladas, en instalaciones conectadas a red y en instalaciones conectadas a red integradas en edificios. Por este motivo no siempre se debe contemplar los módulos solares como elementos que sólo producen electricidad sino que se deben concebir como un conjunto de materiales que deben estar en consonancia con el edificio y que debe integrarse en su exterior.

Esto hace necesario módulos con diferentes propiedades ópticas y diferentes características de funcionamiento para cada edificio y cada aplicación en particular.

El mercado fotovoltaico ofrece un amplio repertorio de posibilidades, para poder utilizarlo como elemento de construcción.

Los módulos estándar y especiales cubren en general las necesidades del mercado. En el caso de los módulos estándar el proyectista tiene la posibilidad de elección en un gran abanico de posibilidades con distintos tipos de células, dimensiones y marcos.

Los módulos especiales tienen una oferta en función de la finalidad a la que se van a destinar para lo cual se ofertan una menor variedad de posibilidades.

Ambos tipos de módulos tienen en común que se ofertan al mercado como productos finales y que el proyectista elige pero no puede influir en el aspecto de los mismos.

Si al proyectista no le satisface ni los módulos estándar ni los especiales puede encargar uno específico. Junto con la elección de las células y de su disposición se pueden combinar entre sí cristales con diferentes características de manera que se tengan módulos multifuncionales, los cuales posibiliten la adaptación a la arquitectura de los edificios.

Las posibilidades de diseño para los módulos específicos abarcan:

- Tipo de célula
- Recubrimiento de las células
- Forma de las células
- Contactos de las células
- Fondo de la célula
- Medidas del cristal
- Formato del cristal
- Tipo de cristal

Con la combinación de estos parámetros se obtiene la imagen final del módulo. De esta forma el proyectista puede con la aprobación del fabricante de módulos diseñar módulos individuales con diferentes:

- Colores
- Transparencia
- Flexibilidad: los módulos de células cristalinas se pueden fabricar curvos con hasta un radio mínimo de hasta 0.9 m, en los que las células se colocan sobre carcasas curvas o se curvan los módulos una vez montados. Los módulos de película delgada tienen una flexibilidad estable y son enrollables, cuando se separan en un material portador flexible.
- Reticulado