

Laboratorio Virtual de Placas Solares Fotovoltaicas



FUNDAMENTO TEÓRICO

Página alojada en
<http://grupoorion.unex.es>

Grupo de Investigación
O R I O N

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1.- Introducción.

Debido a los avances de las nuevas tecnologías y el aumento de la población, se ha incrementado más el consumo de energía en todos los países en los últimos años. Actualmente, esta necesidad de energía continúa aumentando a un ritmo imparable día tras día en todo el mundo consiguiendo que disminuyan las reservas petrolíferas de combustible y demás tipos de energía no renovable. Por este motivo las energías sostenibles como la energía solar están adquiriendo cada vez más relevancia.

Las formas de obtener energía del Sol son las siguientes:

- **Térmica:** Es la forma más simple de aprovechar el Sol; se trata de paneles metálicos recorridos por pequeñas tuberías de agua. Su utilidad es la obtención de agua caliente, principalmente para usos domésticos.
- **Termoeléctrica:** Se pueden considerar una variante de los térmicos. En este caso, el calor del Sol se utiliza para hacer funcionar un generador eléctrico.
- **Fotoquímica:** Se trata de paneles hechos de algún material fotoactivo (normalmente dióxido de titanio), que actúa como catalizador en las reacciones de disociación de las moléculas de agua y CO₂, reacciones que generan el llamado "gas de síntesis" (CO + H₂) que sirve de base para producir hidrocarburos. Los paneles fotoquímicos son una tecnología experimental a la que todavía le quedan muchos años de desarrollo por delante.
- **Fotovoltaica:** Se trata de paneles que mediante el efecto fotoeléctrico, generan energía eléctrica. Estos paneles están hechos generalmente de Silicio dopado

Nos centraremos en este trabajo en la energía solar fotovoltaica. Las instalaciones solares fotovoltaicas se presentan como una alternativa real y positiva de abastecimiento de electricidad, una tecnología que puede contribuir de manera significativa a la reducción de emisiones de contaminantes. Las células solares fotovoltaicas son dispositivos muy simples en comparación con los procesos energéticos convencionales. Esto es debido a que transforman una energía primaria (la energía solar) en electricidad de un modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía.

1.2.- Breve Historia del uso de la Energía Solar Fotovoltaica

El primer hallazgo significativo en el campo de la energía solar fotovoltaica lo descubrió Edmun Bequerel en 1839. Mientras experimentaba con una celda electrolítica construida con electrodos de dos metales diferentes sumergidos en una solución conductora. Observó que la corriente eléctrica aumentaba con la incidencia de la luz. En el 1873, el ingeniero Willoighby Smith descubrió la propiedad de fotoconductividad del selenio. Tres años más tarde, en 1876, William Grylls y Evans Day, descubrieron que el selenio producía electricidad cuando se exponía a la luz. En el 1883, Charles Fritts, hizo la primera celda fotovoltaica usando obleas de selenio (J. Perlin 2005).

El siguiente hecho relevante lo propuso Albert Einstein. En 1905 publicó su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico; Quince años más tarde obtuvo el Premio Nobel de Física por este trabajo. En el 1916, Robert Millikan publicó pruebas experimentales del efecto fotoeléctrico propuesto por Einstein. Más tarde, en el 1932, Audobert and Stora descubrieron el efecto fotovoltaico del sulfato de cadmio. En 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson desarrollaron las primeras celdas fotovoltaicas de silicio en los Laboratorios Bell, éstas fueron las primeras capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica.

1.3.- El efecto fotovoltaico.

El efecto fotoeléctrico es el desprendimiento de electrones de ciertos materiales por la acción de luz u otra radiación electromagnética. Los diferentes efectos fotoeléctricos se pueden clasificar en tres:

- Fotoemisivo o fotoexterno: provoca en el material un arranque de electrones con liberación de los mismos. En una célula fotoeléctrica operada por este principio, los electrones emitidos se recolectan por un electrodo positivo. Bajo la influencia de un voltaje aplicado se crea una corriente eléctrica linealmente proporcional a la intensidad de luz incidida.
- Fotoconductivo o fotointerno: modifica la conductividad eléctrica del material. El incremento en la conductividad eléctrica es proporcional a la intensidad de luz recibida y causa un incremento en la corriente de un circuito externo. El efecto fotoconductivo no genera energía pero se puede emplear en elementos sensores de luz (alumbrado publico, automóvil...).

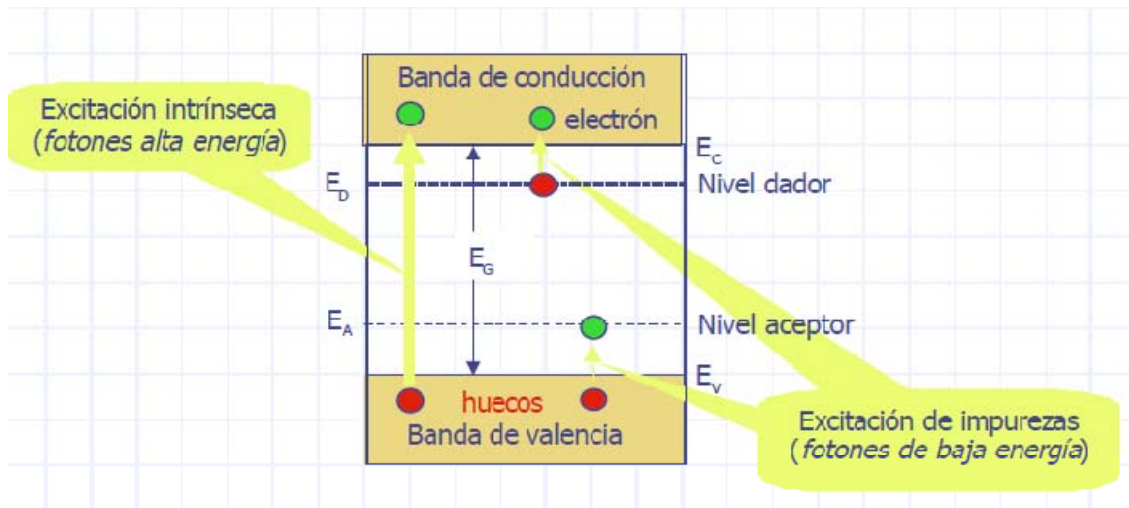


Imagen 1. Diagrama explicativo del Efecto Fotoconductor

- Fotovoltaico: crea una fuerza electromotriz en el material (la presencia de luz hace que se genere una fuerza electromotriz a través del límite de dos sustancias). En las células solares fotovoltaicas, esa fuerza electromotriz que aparece genera un paso de corriente proporcional al flujo luminoso que reciben. Tiene la ventaja sobre los demás procesos de no requerir tensión auxiliar, por eso es utilizado para la conversión directa de energía solar en energía eléctrica. Es decir, el efecto fotovoltaico es el potencial eléctrico que se desarrolla entre dos materiales distintos cuando se ilumina su unión con radiación de fotones. La célula fotovoltaica convierte directamente, de este modo, la luz en electricidad.

1.4.- La célula fotovoltaica.

El objeto físico en el que el fenómeno fotovoltaico tiene lugar es la célula solar. Básicamente la célula solar es un diodo con la característica esencial de tener una superficie muy amplia (unas decenas de cm^2). Para analizar de forma más minuciosa el efecto fotovoltaico es necesario, por tanto, describir, por lo menos conceptualmente, el funcionamiento del diodo (unión p-n). Además, ya que hasta hoy el material más utilizado para la realización de las células solares es el silicio cristalino, se tomará en consideración el diodo de silicio.

El silicio tiene 14 electrones de los que 4 son de valencia, lo que quiere decir que están disponibles para unirse con electrones de valencia de otros átomos. En un cristal de silicio químicamente puro, cada átomo está unido de forma covalente con otros 4 átomos así que dentro del cristal no hay, como consecuencia del enlace químico, electrones libres.

Algunos átomos de silicio en cristal se sustituyen con átomos de fósforo, elemento que tiene 5 electrones de valencia: 4 serán utilizados para enlaces químicos con átomos adyacentes de silicio, mientras que el quinto puede ser separado del átomo de fósforo mediante energía térmica y así tener libertad de movimiento en el retículo del cristal.

De forma análoga, si la sustitución se realiza con átomos de boro, que sólo tiene 3 electrones de valencia, faltará un electrón para completar los enlaces químicos con los átomos adyacentes de silicio. Este electrón que falta actúa como si fuera un electrón 'positivo' y se llama hueco.

En el enlace con fósforo, por tanto, los portadores de carga libres son negativos y el material es llamado de tipo n, mientras en la sustitución de átomos de silicio con átomos de boro, los portadores de carga son positivos y el material es llamado de tipo p.

La unión p-n (diodo) se realiza uniendo una barra de material de tipo n con una barra de material de tipo p.

Los electrones libres en el material 'n' verán a la izquierda una región en la que no existen electrones libres y, por tanto, habrá un flujo de estos portadores hacia la izquierda en el intento de restablecer el equilibrio. De forma análoga, los huecos verán a su derecha una región en la que no hay huecos y habrá, por tanto, un flujo de cargas positivas hacia la derecha. Con el avance de este proceso de difusión, en el lado izquierdo se tendrá un exceso de cargas negativas mientras en el lado derecho habrá un exceso de cargas positivas.

Es decir, en la región de unión de los dos materiales se ha creado un campo eléctrico que se hace cada vez más grande a medida que los huecos y los electrones continúan difundiendo hacia lados opuestos. El proceso continúa hasta que el potencial eléctrico alcanza un tamaño que impide la posterior difusión de electrones y huecos. Cuando se alcanza este equilibrio se habrá creado un campo eléctrico permanente en un material sin la ayuda de campos eléctricos externos.

Con la información anterior, es posible explicar el efecto fotovoltaico. De hecho, hay que suponer que un fotón entra en la región de tipo p del material. Si el fotón tiene una energía mayor que la 'band gap' (energía mínima necesaria para romper un enlace del retículo del silicio) será absorbido y creará una pareja electrón-hueco. El electrón liberado se moverá hacia la derecha a causa del potencial eléctrico.

En cambio, si un fotón entra en la zona n, el hueco creado se moverá hacia la izquierda. Este flujo producirá una acumulación de cargas positivas en la izquierda y de cargas negativas en la derecha, dando origen a un campo eléctrico opuesto al creado por el mecanismo de difusión.

Cuanto más fotones llegan a la unión, tanto más los campos tienden a anularse el uno con el otro, hasta llegar al punto en el que ya no haya un campo interno que separe cada pareja electrón-hueco. Esta es la condición que determina la tensión a circuito abierto de la célula fotovoltaica. Finalmente, poniendo unos electrodos (contactos metálicos) sobre la superficie de la célula se puede utilizar el potencial creado.

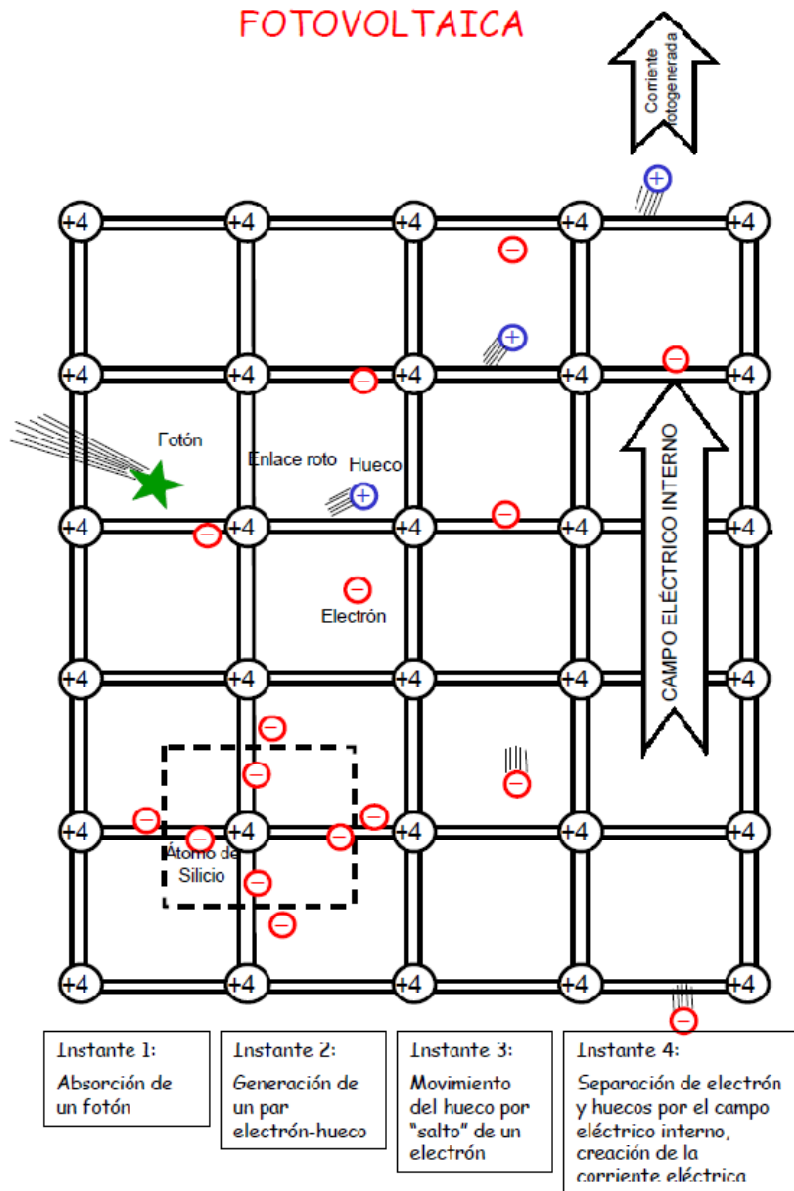


Imagen 2. Diagrama explicativo del efecto fotovoltaico

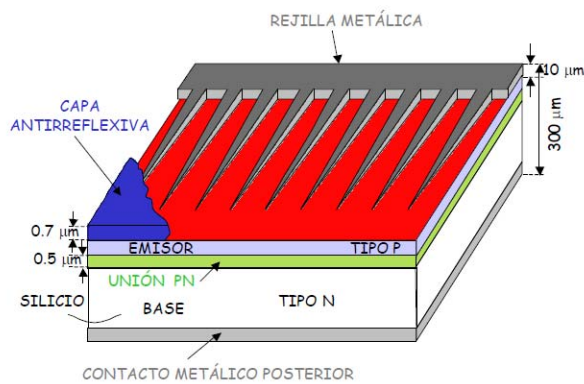


Imagen 3. Esquema de una célula solar

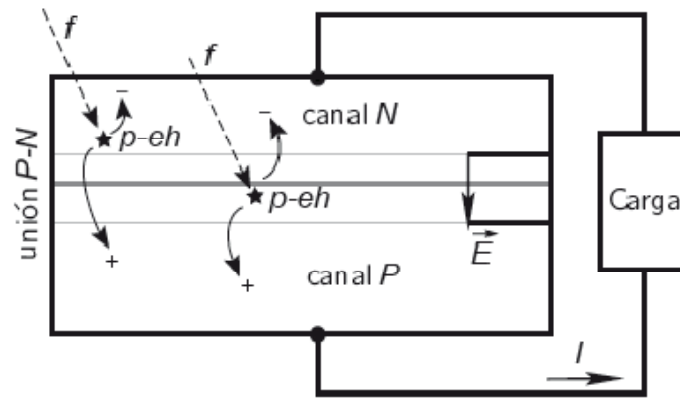


Imagen 4. Diagrama de funcionamiento de la célula solar

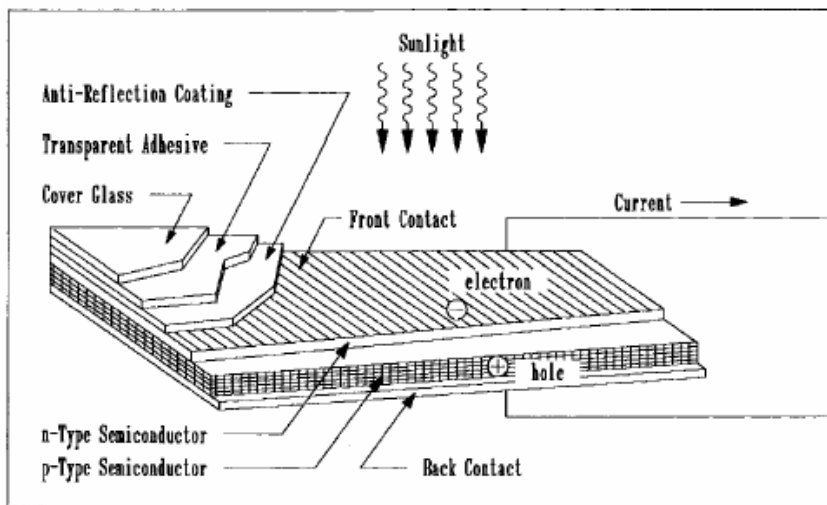


Imagen 5. Estructura básica de la célula solar

Para acumular la corriente fotoeléctrica, los contactos metálicos están provistos de una unión en ambos lados para acumular corriente eléctrica inducida por los fotones introducidos en un lado. La superficie de la parte baja (oscura) y del borde de la parte de arriba (iluminada) tienen chapas conductoras de contacto (soldadura). Una malla conductora fina en la parte superior acumula corriente y deja pasar la luz. El espacio entre las fibras conductoras de la malla es una cuestión de arreglo entre maximizar la conductancia eléctrica y minimizar la obstrucción a la luz. Además de los elementos básicos, también forman parte de la estructura varios elementos de mejora. Por ejemplo, la cara frontal de la célula tiene una capa que reduce el reflejo y de esta forma, absorber tanta luz como sea posible minimizando el reflejo. La protección mecánica consiste en una cubierta de cristal pegada con un adhesivo transparente.

1.5.- Modulo solar y panel solar.

La célula solar descrita anteriormente es el componente básico de un sistema de potencia fotovoltaico. Normalmente tiene el tamaño de unos decímetros cuadrados y produce aproximadamente un Watio de potencia. Para obtener una potencia alta, se conectan muchas células de este tipo en circuitos en serie y en paralelo en un panel (módulo).

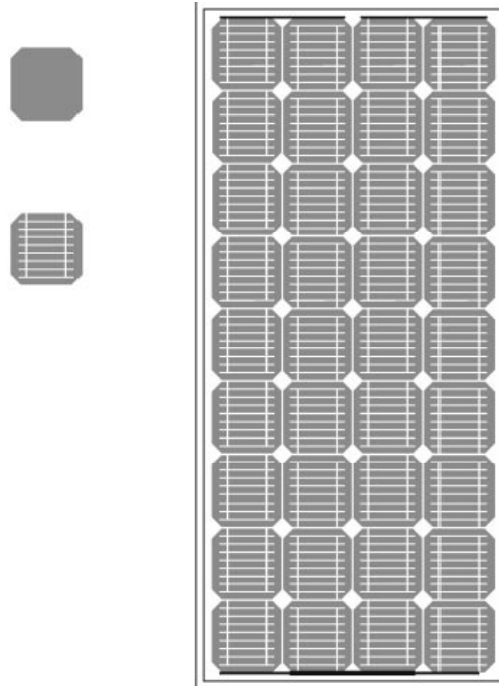


Imagen 6. Combinación de células solares para constituir módulos solares

El conjunto solar o panel se podría definir como un grupo de varios módulos conectados eléctricamente en combinaciones de serie-paralelo con el fin de generar la corriente y el voltaje necesarios. Existen diferentes clases de paneles fotovoltaicos y distintos procesos de fabricación, pero en la actualidad la gran mayoría de módulos del mercado profesional presentan características comunes.

Un módulo fotovoltaico normalmente consta de:

- Células solares fotovoltaicas y sus conexiones eléctricas.
- El encapsulante que cubre las células por arriba y por abajo: El encapsulante da cohesión al conjunto al rellenar el volumen existente entre las cubiertas delantera y trasera y amortigua las vibraciones e impactos que se pueden producir. Su función principal es la de proteger las células solares y los contactos eléctricos de la humedad. Los materiales empleados tienen una alta transmisión de la radiación solar y baja degradabilidad frente a las radiaciones ultravioletas y al paso del tiempo. Se utiliza mucho el EVA, acetato de etilen-vinilo, que es un polímero transparente que además de tener igual índice de refracción que el vidrio, tiene también ventajas en el proceso de laminación del módulo.
- Una cubierta exterior transparente (cara activa del panel): Al estar expuestas a la acción de agentes climatológicos adversos, las células se protegen con una cubierta delantera transparente. Lo que más se utiliza es el vidrio templado con bajo contenido en hierro, que tiene ventajas respecto a otros materiales, ya que ofrece una buena protección contra impactos y a la vez tiene excelente transmisión a la radiación solar. Por el exterior, el vidrio, debe tener una superficie lisa, para no retener nada que dificulte el paso de la radiación solar.

Por el interior es rugosa para aumentar la superficie de contacto y mejorar la adherencia con el encapsulante.

- Un protector posterior especialmente diseñado contra la humedad: Se encarga de proteger contra los agentes atmosféricos. Puede ser cristal, pero normalmente suelen utilizarse materiales acrílicos, siliconas, tedlar. La protección posterior suele tener tres capas, tedlar-poliéster-tedlar. Normalmente, la protección posterior en su cara interna es de color blanco para favorecer el rendimiento del módulo, ya que refleja la radiación que incide entre los huecos que dejan las células, radiación que posteriormente se refracta en las rugosidades del vidrio para incidir finalmente sobre las células.
- El bastidor o marco que permite una estructura manejable: Protege de golpes laterales, proporciona rigidez mecánica al conjunto y lo hace manejable. El marco soporte facilita la instalación del módulo y favorece el montaje en estructuras que agrupan a varios módulos. Son varias piezas atornilladas o ensambladas entre sí y con un cordón de silicona para un perfecto sellado. Normalmente se emplea el aluminio anodizado o el acero inoxidable
- Los contactos de salida (el positivo y el negativo) en su caja de conexiones: Son aquellos que van a permitir evacuar la energía eléctrica producida por el conjunto de células.
- Unos diodos para protección que van en la caja de conexiones: Normalmente, la caja de conexiones del módulo tiene más terminales que el positivo y el negativo. Esto es así porque permite la colocación de unos diodos que están conectados en paralelo con grupos de células conectadas en serie. Se instalan para proteger al panel solar fotovoltaico de efectos negativos producidos por sombras parciales sobre su superficie. Este efecto se denomina efecto sombra.

La imagen muestra la composición de un módulo en un marco que se puede montar en una estructura.

Página alojada en unex.es
<http://grupoorion.unex.es>

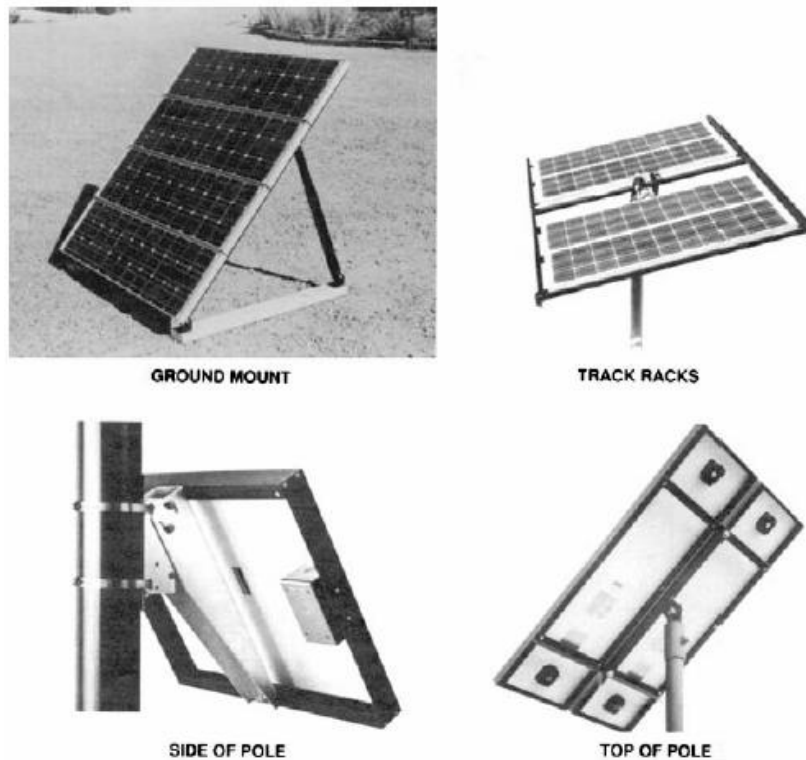


Imagen 7. Módulos solares montados sobre estructuras

Se pueden montar los módulos de varias formas como se muestra en la imagen superior. En caso de tener que hacer el montaje en un tejado, los módulos tienen una forma que se puede ajustar directamente al tejado. Con la tecnología recientemente desarrollada del silicio amorfo, las placas fotovoltaicas se fabrican en forma de tablillas que pueden reemplazar a las tablillas de tejado tradicionales colocadas una a una. Este avance permite ahorrar en coste de material y trabajo.

1.6.- Circuito eléctrico equivalente.

Aunque las células fotovoltaicas presentan una estructura física compleja, sin embargo, se pueden representar con el circuito eléctrico equivalente que se muestra en la siguiente figura.

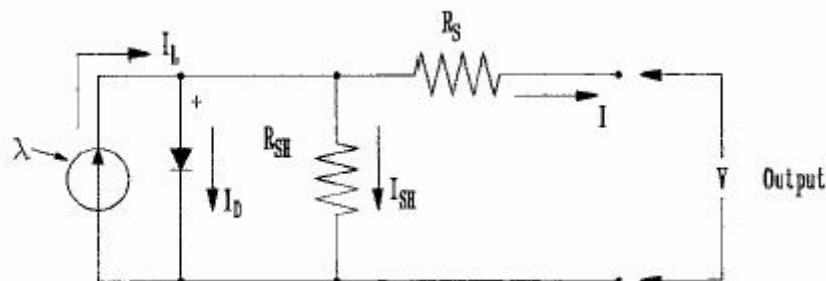


Imagen 8. Circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica

Los parámetros del circuito equivalente mostrado en la imagen 33 son los siguientes:

- La intensidad de salida I es igual a la intensidad generada por la luz solar I_L , menos la intensidad por el diodo I_D y la intensidad de fuga o derivación I_{sh} .
- La resistencia en serie R_s representa la resistencia interna al flujo de corriente y depende de la profundidad de la unión p-n, las impurezas y la resistencia del contacto.
- La resistencia de derivación R_{sh} está inversamente relacionada con la corriente fuga de tierra. En una célula fotovoltaica ideal: $R_s=0$ (sin pérdida de serie), y $R_{sh}=\infty$ (sin fuga de tierra). En una célula de silicio de alta calidad de una pulgada cuadrada: $R_s=0.05$ a 0.10 ohm y $R_{sh}=200$ a 300 ohms. El rendimiento de conversión fotovoltaica es sensible a las pequeñas variaciones en el R_s , pero no a las variaciones del R_{sh} . Un pequeño aumento en el R_s puede disminuir la salida fotovoltaica significativamente.

En el circuito equivalente, la corriente que llega a la carga externa es igual a la corriente I_L generada por la iluminación menos la corriente diodo I_D y la corriente de derivación I_{sh} . La tensión de circuito abierto V_{oc} de la célula se obtiene cuando la corriente de carga es cero, es decir, cuando $I = 0$, y viene dado por: $V_{oc} = V + I R_{sh}$

La corriente diodo viene dada por la expresión clásica de corriente diodo:

Ecuación 1. Corriente de diodo

$$I_d = I_D \left[\frac{QV_{oc}}{AKT} - 1 \right]$$

En la ecuación 1:

I_D es la corriente de saturación del diodo, Q es la carga del electrón, K es la constante de Boltzmann, A es la constante de ajuste de la curva y T es la temperatura en escala absoluta.

La corriente de carga viene dada por la expresión:

Ecuación 2. Corriente de carga

$$I = I_L - I_D \left[e^{\frac{QV_{oc}}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

El último término de la ecuación 2 es la corriente de derivación, en células reales es pequeño en comparación con I_L e I_D , y se pueden despreciar. La corriente diodo-saturación puede, por tanto, determinarse de forma experimental aplicando el voltaje de circuito abierto V_{oc} sin luz, y midiendo la corriente de entrada en la célula. Esta corriente suele llamarse corriente oscura o corriente diodo-saturación inversa.

1.7.- Tensión de circuito abierto e intensidad de cortocircuito.

Los dos parámetros más importantes usados para describir el rendimiento eléctrico de la célula son la tensión de circuito abierto V_{oc} y la corriente de cortocircuito I_{sc} .

- La corriente a corto circuito I_{cc} (I_{sc} en inglés): Es la máxima corriente generada por el módulo solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con

resistencia nula. La unidad de medida es el amperio (A). Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa.

- El voltaje a circuito abierto V_{ca} (V_{oc} en inglés): Es el voltaje máximo que genera un módulo solar. Su unidad de medida es el voltio (V). Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda.

Para medir la corriente cortocircuito se provoca un corto en los terminales de salida y se mide la corriente terminal con iluminación total.

Ignorando el diodo pequeño y las corrientes de derivación según el voltaje cero terminal, la corriente cortocircuito en estas condiciones es la corriente fotoeléctrica I_L . El fotovoltaje máximo se produce con la tensión de circuito-abierto. La ecuación para la corriente de carga teniendo en cuenta $I = 0$, da el voltaje circuito-abierto de la siguiente manera:

Ecuación 3. Tensión de circuito abierto

$$V_{\infty} = \frac{AKT}{Q} \text{Log}_n \left(\frac{I_L}{I_D} + 1 \right)$$

la constante KT/Q es la temperatura absoluta expresada en voltios ($300^\circ\text{K} \approx 0.026$ volt). En fotocélulas reales, la corriente fotoeléctrica es varias órdenes de magnitud mayor que la corriente de saturación inversa. Por tanto, el voltaje de circuito abierto es muchas veces el valor de KT/Q . En condiciones de iluminación constante I_L/I_D es una función bastante fuerte de la temperatura de la célula. La célula solar muestra normalmente un coeficiente de temperatura del voltaje de circuito-abierto negativo.

1.8.- Curvas I-V y P-V.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente frente al voltaje (curva I-V) o potencia frente a voltaje (curva P-V) que los caracteriza.

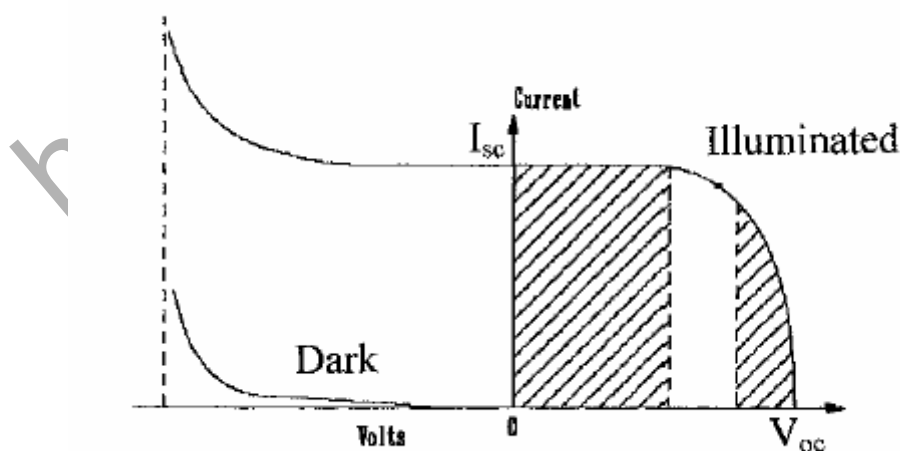


Imagen 9. Curva característica de intensidad- voltaje de un módulo fotovoltaico

La figura 34 muestra la curva característica i-v de un módulo fotovoltaico en dos condiciones distintas: con luz solar y en la oscuridad. En el primer cuadrante, la parte superior izquierda de la curva i-v a un voltaje cero se denomina corriente de cortocircuito. Esta es la corriente que se mediría con los terminales de salida en corto (voltaje cero). La parte inferior derecha de la curva con corriente cero se denomina voltaje circuito-abierto. Este es el voltaje que se mediría con los terminales de salida abiertos (con corriente cero).

En la zona sombreada de la izquierda, las células trabajan como una fuente de corriente constante, generando voltaje para igualarlo a la resistencia de carga.

En la zona sombreada de la derecha, la corriente cae rápidamente y el voltaje presenta una pequeña subida. En esta área, la célula funciona como una fuente de voltaje constante con una resistencia interna.

En algún punto intermedio entre las dos zonas sombreadas, la curva tiene un punto codo. Si se aplica el voltaje internamente en sentido inverso, la corriente se mantiene constante y la potencia es absorbida por la célula. Sin embargo, si se sobrepasa un determinado voltaje negativo, la unión se rompe como en un diodo, y la corriente aumenta hasta un valor alto.

En la oscuridad, la corriente es cero para el voltaje hasta que éste falle, de la misma manera que en condiciones de iluminación.

La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva I-V. La imagen 35 muestra las curvas IV y PV para un módulo fotovoltaico típico bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia de 1kW/m^2 y temperatura de celda de $25\text{ }^\circ\text{C}$). Cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica.

En la curva de potencia frente a voltaje, la potencia máxima (P_{max}) es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (I_p y V_p) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente. Es importante notar que cuando el módulo opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia entregada se reduce significativamente.

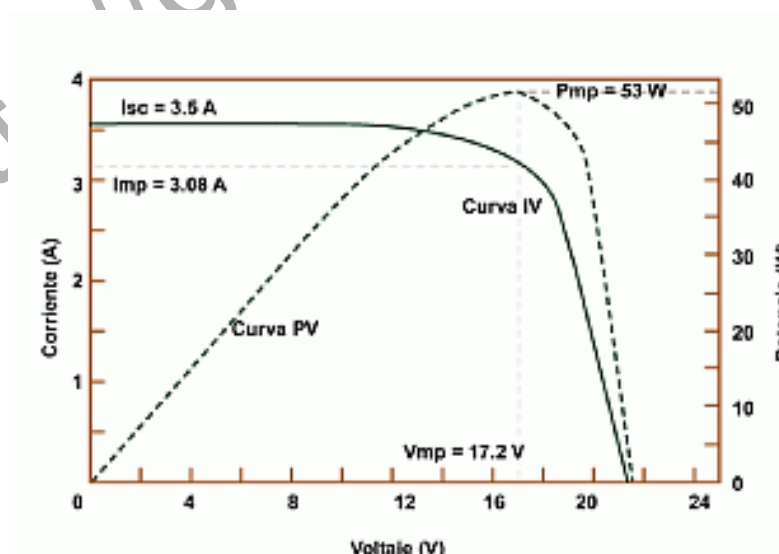


Imagen 10. Curvas características de un panel solar

La salida de potencia del panel es producto de las salidas del voltaje y la corriente.

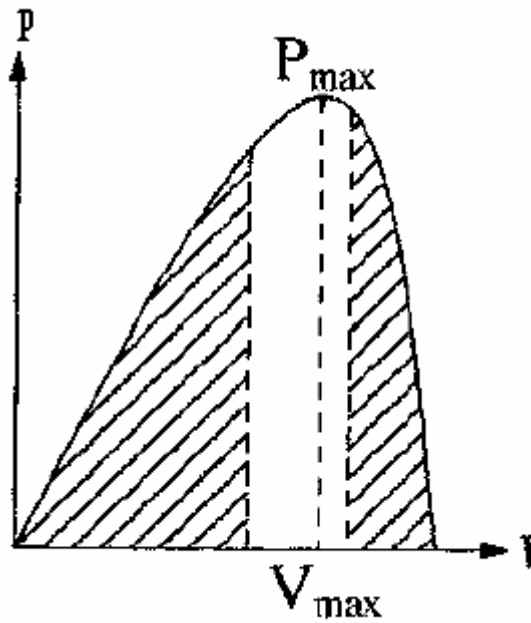


Imagen 11. Curva característica de Potencia-Voltaje para un módulo fotovoltaico

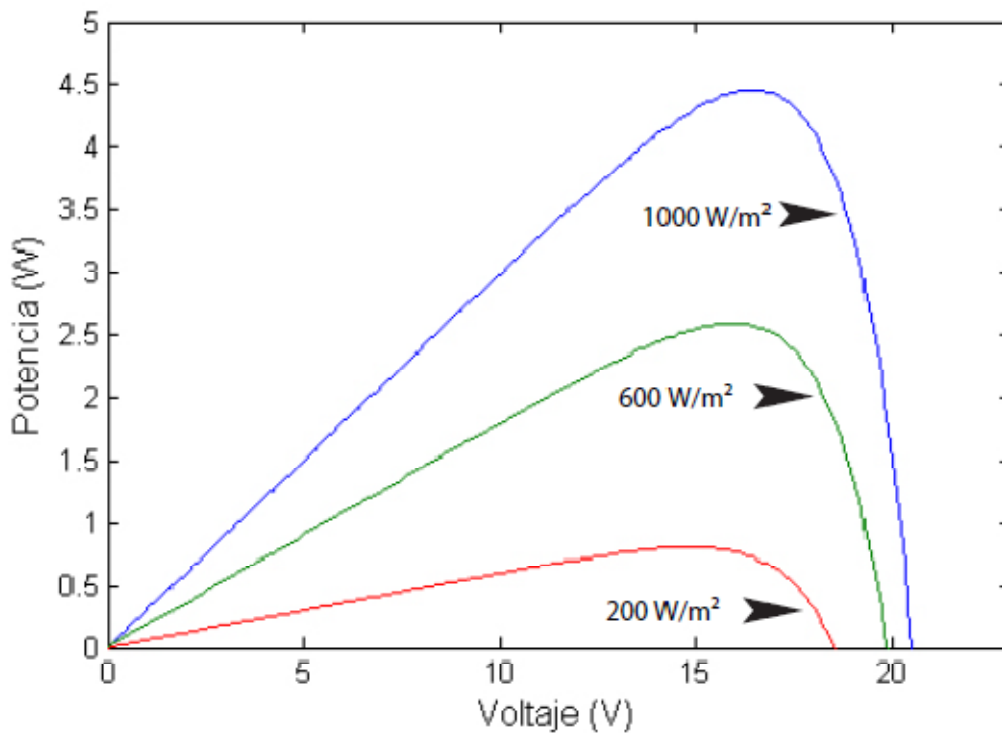


Imagen 12. Curvas potencia-voltaje para diferentes valores de intensidad de radiación

En la gráfica anterior, la potencia se traza frente al voltaje. Se puede observar que la célula no produce potencia con voltaje o corriente cero, y produce la máxima potencia cuando el voltaje se corresponde con el codo de la curva i-v. Por esta razón, los circuitos de potencia fotovoltaica se diseñan de tal manera que los módulos funcionen cerca del codo, ligeramente a

la izquierda de éste. Los módulos fotovoltaicos toman el modelo aproximado de una fuente de corriente constante en el análisis eléctrico del sistema.

La potencia que es capaz de suministrar un panel se da siempre en vatios pico (Wp). El panel fotovoltaico funciona a potencia máxima cuando proporciona una corriente y una tensión tal que su producto es máximo ($I_{MAX} \times V_{MAX} = P_{MAX}$). A ese punto de coordenadas (I_{MAX} , V_{MAX}) se le denomina punto de máxima potencia. Normalmente un panel no trabaja a potencia máxima debido a varios condicionantes, entre otros a que la resistencia exterior está dada por las condiciones particulares del circuito al que esté conectado (la instalación). En el laboratorio y en los ensayos de módulos solares fotovoltaicos suelen hacerse en condiciones de un sol pico de intensidad (1000 W/m²). Así, la P_{MAX} de un panel siempre se supone referida a una intensidad de un sol pico.

En resumen, podemos afirmar que las células fotovoltaicas de un panel proporcionarán más o menos electricidad en función de la mayor o menor cantidad de energía solar que incida sobre su superficie. Pero además, la respuesta de un panel o módulo solar frente a la radiación solar queda determinada por todos los materiales empleados a la hora de su fabricación y, en especial, por las células que lo forman.

Es necesario poder definir varias características del panel solar para poder comparar y determinar calidades, eficacia y estabilidad eléctrica. En la documentación que entrega el fabricante o el instalador, así como en el etiquetado que el módulo solar fotovoltaico lleva adherido, figura una terminología eléctrica con las características de fabricación de los paneles.

Además de información general del producto, el tipo de célula, las características físicas del panel (ancho, largo, espesor y el peso), el tipo de caja de conexión, esquema o descripción con las distancias de los agujeros de fijación del marco, aparece lo que se denomina la curva I-V (curva intensidad-voltaje) del módulo solar.

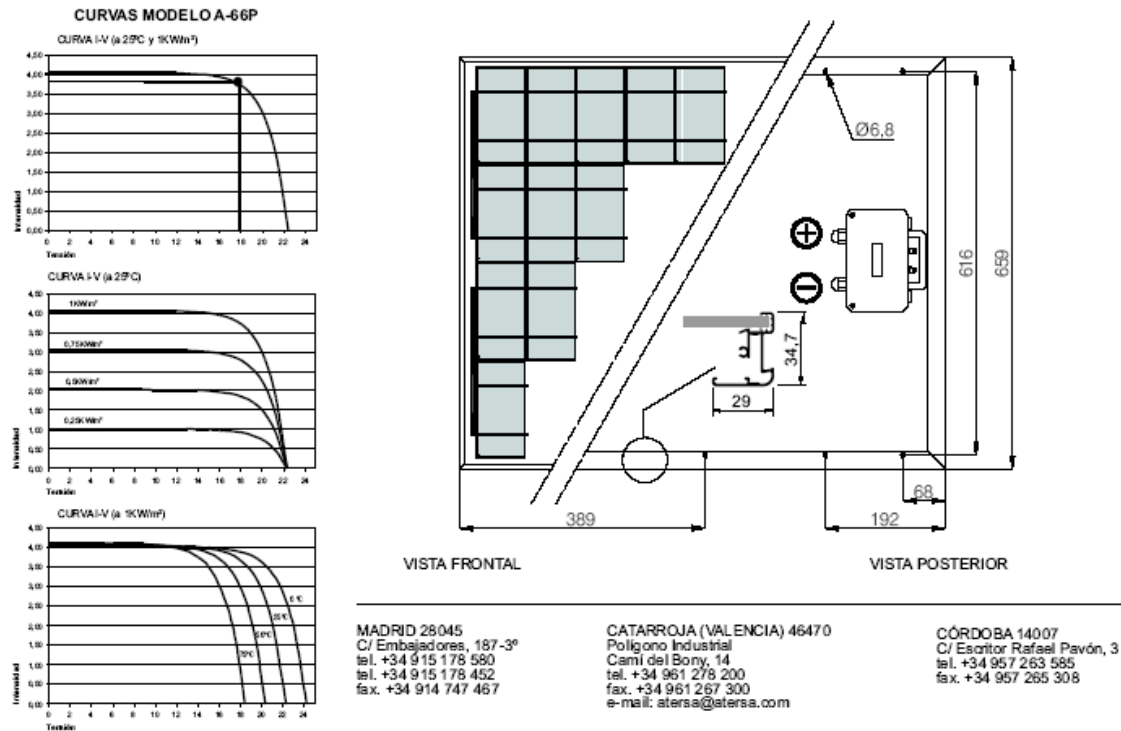


Imagen 13. Características técnicas de los paneles solares utilizados en el equipo experimental

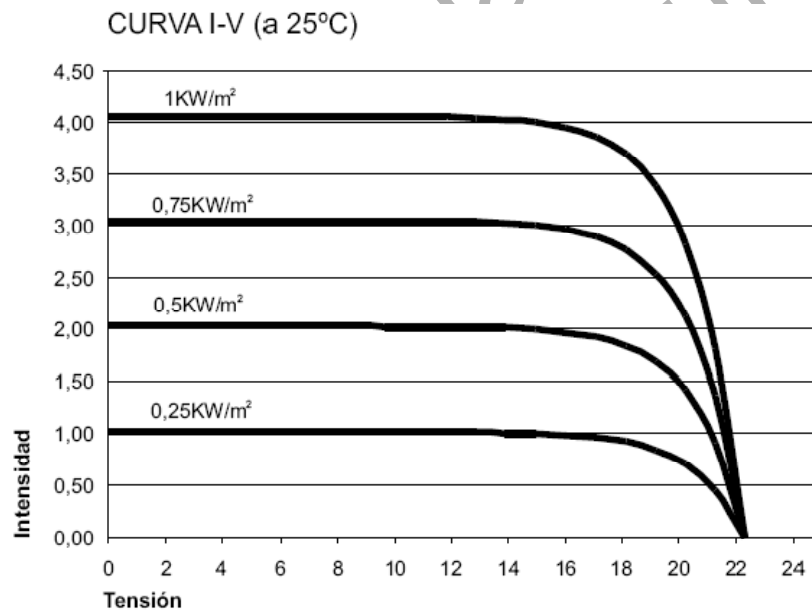


Imagen 14. Curva intensidad-voltaje para diferentes valores de intensidad de radiación

La imagen 39 representa la curva i-v característica de un panel de 66 vatios expuesto a las siguientes intensidades de iluminación solar 1.000 w/m^2 , 750 w/m^2 , 500 w/m^2 y 250 w/m^2 .

Estos valores fueron obtenidos para una masa de aire de 1,5 (AM1.5). La masa de aire 0 (AM0) representa las condiciones del espacio exterior, donde la radiación solar es de 1.350 w/m^2 . AM1 representa las condiciones ideales de aire puro de un mediodía claro y sin lluvia cuando la luz solar experimenta la menor resistencia para alcanzar la tierra. El aire que nos encontramos en un día cualquiera con humedad y contaminación media es de AM1.5, por lo que se toma como valor de referencia. La energía solar incidiendo en una superficie normal en un día

despejado con AM1.5 es de unos 1.000 watts/m². En un día nublado sería más baja. La intensidad solar, de 500w/m² es otra condición de referencia que la industria utiliza para presentar las curvas i-v.

El rendimiento de la foto-conversión de una célula fotovoltaica se define por la siguiente fórmula:

Ecuación 4. Rendimiento de fotoconversión

$$\eta = \frac{\text{electrical power output}}{\text{solar power impinging the cell}}$$

Obviamente, cuanto mayor es el rendimiento, mayor es la potencia de salida que se obtiene con una iluminación dada.

A continuación pasamos a describir los actores que influyen en el diseño de paneles solares.

- Intensidad de radiación solar.
- Ángulo de línea solar o inclinación de paneles.
- Igualación de carga con la máxima potencia.
- Temperatura de trabajo.

1.9.- Intensidad de radiación solar.

La magnitud de la corriente fotoeléctrica es máxima con una iluminación solar completa (En la figura lo representaremos como sol 1.0). En un día parcialmente nublado, la corriente fotoeléctrica disminuye en proporción directa a la intensidad solar. La curva característica i-v varía en sentido descendente dando como resultado una intensidad solar menor como se muestra en la figura.

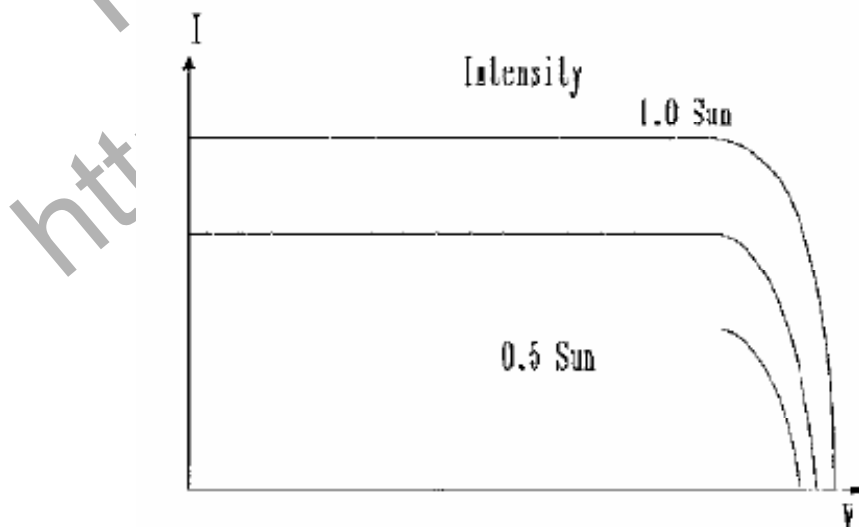


Imagen 15. Variación de la curva i-v en función de la intensidad solar

Por tanto, en un día nublado, la corriente de cortocircuito baja significativamente y la reducción del voltaje de circuito abierto, sin embargo, es baja.

Una característica a resaltar de los módulos solares es que el rendimiento de la fotoconversión de la célula es insensible a la radiación solar en el rango de funcionamiento práctico.

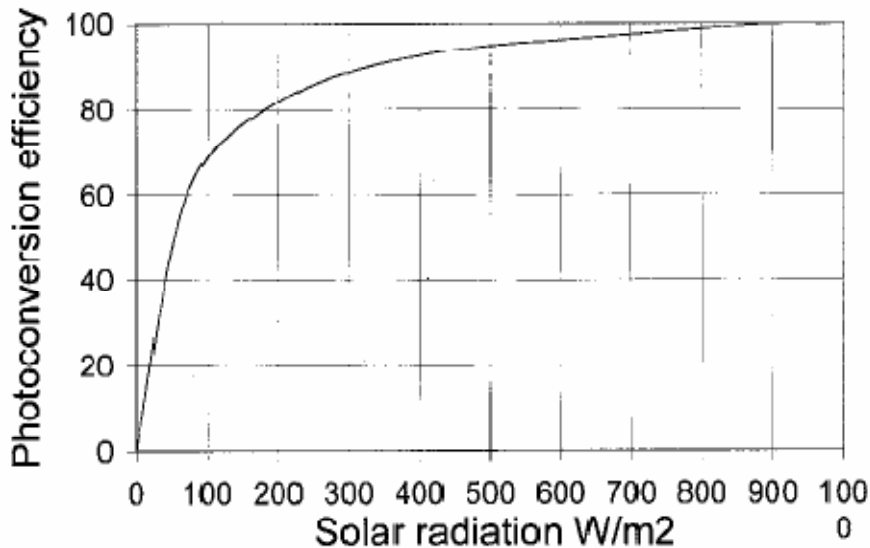


Imagen 16. Eficiencia de foto conversión frente a la radiación solar

La figura muestra que el rendimiento es prácticamente el mismo a 500 w/m² que a 1000 w/m². Esto quiere decir que el rendimiento de conversión es el mismo en un día totalmente despejado que en otro nublado. Luego, se obtiene una salida de potencia menor en un día nublado debido exclusivamente a que la energía solar que incide en la célula es menor.

1.10.- Ángulo de línea solar.

La corriente de la salida de la célula está determinada por la expresión

Ecuación 5. Corriente de salida de una célula solar

$$I = I_0 \cos \theta$$

Donde I_0 es la corriente con una incidencia solar normal (referencia), y θ es el ángulo de línea solar medido teniendo en cuenta el normal. Esta regla del coseno funciona para ángulos solares que vayan de 0 a 50°. Por encima de los 50°, la salida eléctrica difiere significativamente respecto a la regla del coseno y la célula no genera energía por encima de los 85°, aunque la regla del coseno matemático prevé 7,5 por ciento de generación de energía. La curva exacta energía-ángulo de la célula fotovoltaica se llama coseno Kelly, y es la que muestra la siguiente imagen.

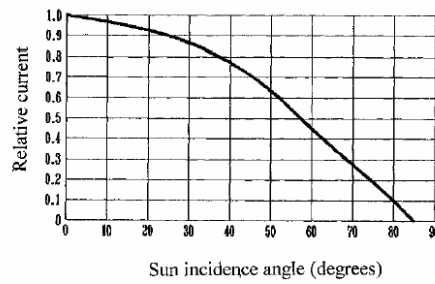


Imagen 17. Corriente relativa frente al ángulo de incidencia

The Kelley Cosine Values of the Photocurrent in Silicon Cells

Sun Angle Degrees	Mathematical Cosine Value	Kelly Cosine Value
30	0.866	0.866
50	0.643	0.635
60	0.500	0.450
80	0.174	0.100
85	0.087	0

Imagen 18. Valores del coseno "Kelly" en células de silicio

1.11.- Estructura de los paneles solares

La matriz de un panel solar puede consistir en filas paralelas de células conectadas en serie. Dos de esas filas se pueden ver en la siguiente figura.

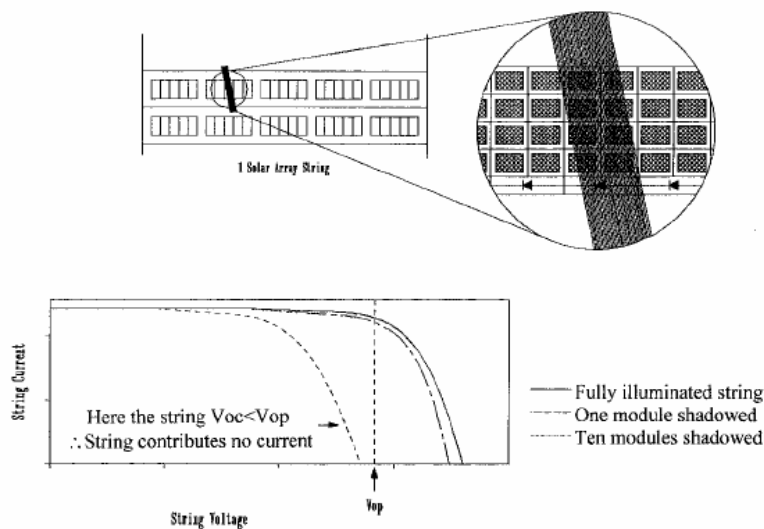


Imagen 19. Células conectadas en serie

Debido a que una estructura interfiere con la línea solar, si una célula de una cadena larga de células no recibe ninguna incidencia solar, perderá el fotovoltaaje, pero continuará teniendo la corriente de la cadena gracias al hecho de que esté conectada en serie con el resto de células completamente operativas. Sin tener voltaje generado internamente, la célula no puede producir energía. En su lugar, actúa como carga, produciendo una pérdida local y calor. El resto de células de la cadena deberán, por tanto, trabajar a un voltaje mayor para compensar la pérdida de voltaje de la célula que no recibe luz. El alto voltaje de las células sanas hace disminuir tanto la corriente de la cadena como la curva i-v de la cadena. Esto se muestra en la

parte inferior izquierda de la figura anterior (imagen 44). La pérdida de corriente no es proporcional a la zona sombreada, y puede pasar desapercibida si es una zona pequeña de sombreado suave. Sin embargo, si hay más células sombreadas más allá del límite crítico, la curva i-v baja el voltaje de funcionamiento de la cadena haciendo que la corriente caiga a cero, perdiéndose así toda la energía de la célula.

El método que se utiliza normalmente para eliminar la pérdida de la cadena por el efecto de la sombra consiste en subdividir el circuito en varios segmentos con diodos de desviación como se muestra en la siguiente figura.

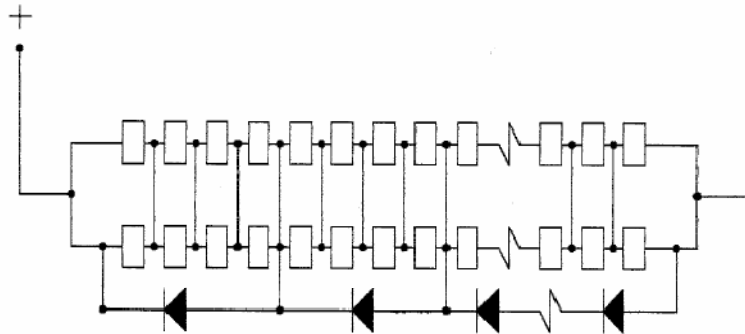


Imagen 20 División en varios segmentos con diodos de desviación

El diodo del segmento sombreado desvía solo ese segmento de la cadena. Esto provoca una pérdida proporcional del voltaje y la corriente de la cadena, sin perderse totalmente la energía de la cadena. Algunos módulos fotovoltaicos vienen con diodos de desviación incorporados internamente.

1.12.- Igualación de carga con la curva de máxima potencia.

El punto operativo de cualquier sistema es la intersección de la línea de potencia generada con la línea de carga. Si la fuente fotovoltaica, teniendo las curvas i-v y p-v como se muestra en la figura (imagen 46 izquierda), alimenta la carga resistiva R_1 , funcionará en el punto A_1 . Si la resistencia de carga aumenta a R_2 o R_3 , el punto operativo cambia a A_2 o A_3 respectivamente.

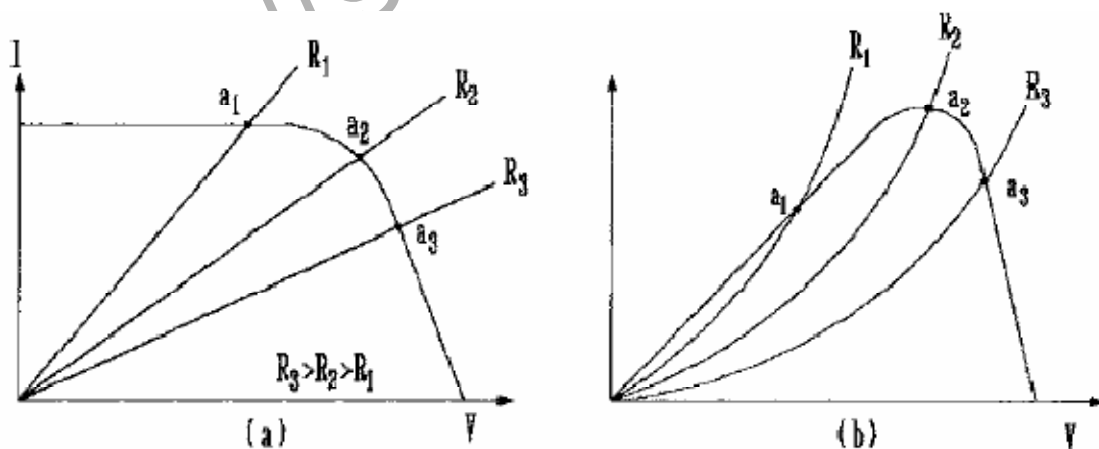


Imagen 21 Igualación de la carga con la curva de potencia máxima

El máximo de energía se obtiene del módulo cuando la resistencia de carga es R_2 . Es necesario que dicha carga coincida con el punto de máxima potencia generada, para obtener el máximo de energía del módulo fotovoltaico.

En la figura siguiente se muestra el funcionamiento con cargas de potencia constante.

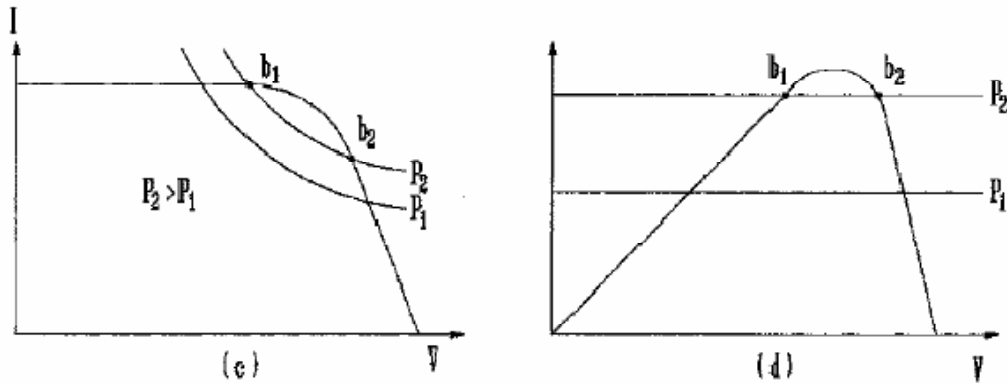


Imagen 22. Funcionamiento con cargas de potencia constante

La línea de carga de potencia constante tiene dos puntos de intersección con la línea de generación, representados por B1 y B2. Solo el punto B2 es estable, ya que cualquier perturbación del punto genera un restablecimiento de energía para devolver el funcionamiento a B2. Por tanto, el sistema funcionará en B2. Las condiciones necesarias para la estabilidad del funcionamiento eléctrico del conjunto solar son las que siguen:

Ecuación 5. Condición de estabilidad del funcionamiento eléctrico

$$\left[\frac{dP}{dV} \right]_{load} > \left[\frac{dP}{dV} \right]_{source}$$

Algunas cargas tales como los calefactores tienen resistencia constante y la potencia varía con el cuadrado de la tensión. Por otro lado, algunas cargas como los motores de inducción se comportan de modo más parecido a las cargas constantes, consumiendo más corriente a una tensión menor de alimentación. En la mayoría de los grandes sistemas con mezcla de cargas, la potencia varía linealmente con la tensión aproximadamente.

1.13.- Temperatura de funcionamiento.

Con el aumento de temperatura también aumenta la corriente de cortocircuito de la célula, mientras que el voltaje de circuito abierto disminuye como se muestra en la figura.

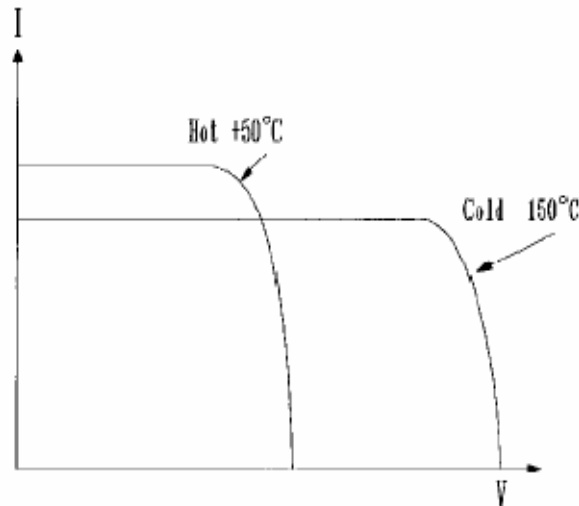


Imagen 23. Efecto de la temperatura en la curva de intensidad-voltaje

El efecto de la temperatura en la potencia generada se puede medir cuantitativamente examinando los efectos en la corriente y el voltaje por separado.

Estimemos a I_0 y V_0 como la corriente cortocircuito y el voltaje de circuito abierto a una referencia de temperatura T , y α y β son sus respectivos coeficientes de temperatura. Si la temperatura de funcionamiento aumenta debido a ΔT , la nueva corriente y voltaje vienen dados por la siguiente fórmula:

Ecuación 6. Efecto de la temperatura en I_{sc} y en V_{oc}

$$I_{sc} = I_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad \text{and} \quad V_{oc} = V_0(1 - \beta \cdot \Delta T)$$

Puesto que la corriente y el voltaje de funcionamiento cambian aproximadamente en la misma proporción que la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto respectivamente, la potencia resultante queda como sigue:

Ecuación 7. Influencia de la temperatura sobre la potencia generada

$$P = V \cdot I = I_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot V_0(1 - \beta \cdot \Delta T)$$

Esto se puede simplificar en la siguiente expresión

Ecuación 8. Potencia en función de la temperatura

$$P = P_0 \cdot [1 + (\alpha - \beta) \cdot \Delta T]$$

Para las células simples de silicio de cristal típicas, α es 500 μ por $^{\circ}\text{C}$ y β es 5 μ por $^{\circ}\text{C}$. Así, la potencia queda expresada de la siguiente manera:

Ecuación 9. Ejemplo de cálculo de la potencia

$$P = P_o \cdot [1 + (500\mu u - 5mu) \cdot \Delta T] \text{ or } P_o \cdot [1 - .0045\Delta T]$$

Esta expresión indica que por cada aumento de °C de la temperatura de funcionamiento por encima de la temperatura de referencia, la salida de energía de la célula de silicio disminuye un 0,45 por ciento. Puesto que el aumento de la corriente es menor que la caída del voltaje, el resultado final es la disminución de energía a temperaturas de funcionamiento altas.

La siguiente figura representa el funcionamiento real de la curva de funcionamiento i-v de un panel de 66 vatios sometido a intensidades de iluminación solar de 1,000 watts/m² y diferentes temperaturas de funcionamiento.

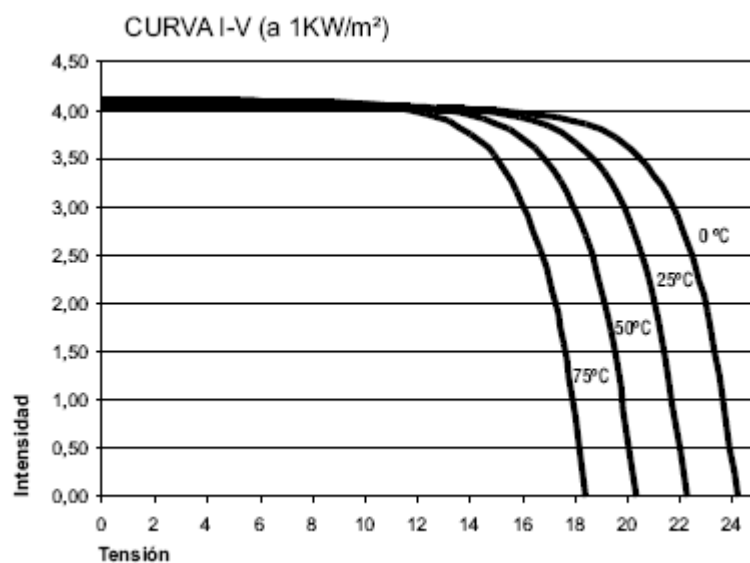


Imagen 24. Efecto de la temperatura en la Isc y en el Voc

El efecto de la temperatura en la potencia de salida, se muestra en la curva del voltaje frente a la potencia, a dos temperaturas de funcionamiento, como se puede ver en la siguiente figura.

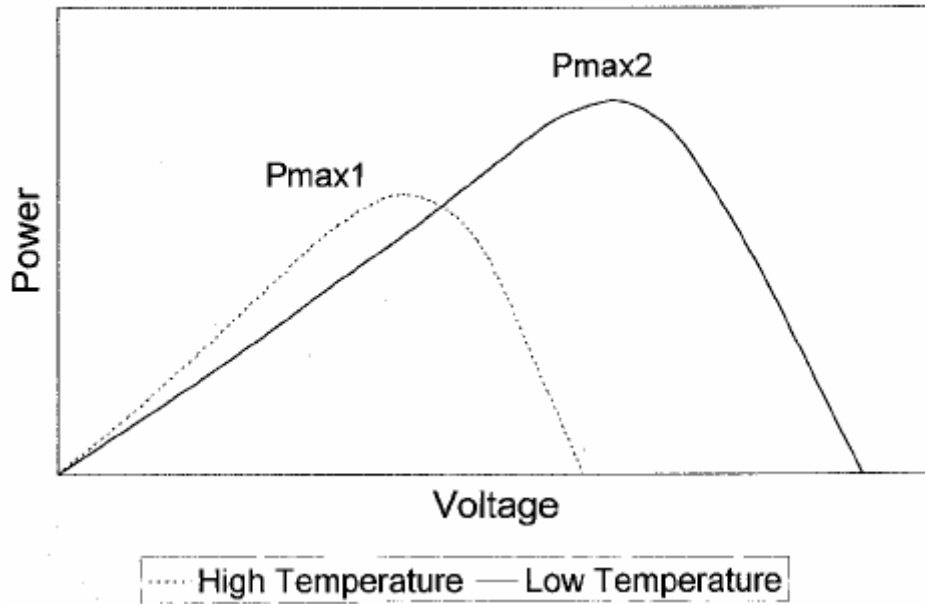


Imagen 25. Efecto de la temperatura en la potencia

La figura muestra que la máxima potencia disponible a temperatura baja es mayor que a una temperatura más alta. Por eso, la temperatura baja es mejor para la célula fotovoltaica, puesto que genera más potencia. Sin embargo, los dos puntos "Pmax" no tienen el mismo voltaje. Para obtener la máxima energía a cualquier temperatura, se debe diseñar el sistema fotovoltaico de tal manera que la salida de voltaje del módulo pueda aumentar a V_2 para obtener Pmax2 a una temperatura más baja y para que pueda disminuir a V_1 para obtener Pmax1 a una temperatura mayor.

1.14.- Factor de forma (FF)

El factor de forma (FF) es la proporción del pico de potencia del producto I_{sc} y V_{oc} . El factor de forma determina la forma de las curvas $i-v$ de la célula solar. Su valor es mayor de 0.7 para células en condiciones normales. Las resistencias en serie y paralelo de las celdas solares, representan una caída del factor de forma. Este parámetro es muy útil para controles de calidad.