



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Unidad 2

CURSO “ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA – UNA APUESTA DE
FUTURO SOSTENIBLE”.

Universidad Politécnica de Valencia

Trina Solar

Fco. J. Gimeno Sales

Salvador Orts Grau

Salvador Seguí Chilet

© Fco. J. Gimeno Sales, Salvador Orts Grau, Salvador Seguí Chilet

© Universitat Politècnica de València, Centro de Formación Permanente, 2014

© Trina Solar

FORMACIÓN INTRODUCTORIA PATROCINADA

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin la autorización por escrito de los propietarios del copyright por cualquier tipo de medio o procedimiento, incluida la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler, venta o préstamo público.



2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

2.	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.	3
2.1	Objetivos competenciales.....	5
2.2	Caso	5
2.3	Esquema	7
2.4	Introducción.....	8
2.5	Célula solar fotovoltaica.	9
2.6	Módulo solar fotovoltaico: construcción.....	17
2.7	Tecnologías de módulos fotovoltaicos.....	24
2.8	Características de los módulos fotovoltaicos.....	26
2.9	Efecto de la temperatura en los módulos fotovoltaicos.	31
2.10	Campo fotovoltaico.....	36
2.11	Seguimiento del punto de máxima potencia.....	41
2.12	Recuerda qué:	49
2.13	Autotest.	50
2.14	Anexos.	51
2.15	Glosario.	52
2.16	Continuación de los estudios.....	¡Error! Marcador no definido.



Trina Solar (NYSE: TSL) es un líder mundial en módulos fotovoltaicos, soluciones y servicios. Fundada en 1997 como una compañía de integración de sistemas, actualmente Trina Solar impulsa energía inteligente junto a instaladores, distribuidores, empresas eléctricas y desarrolladores de proyectos en todo el mundo. Su influyente posición en la industria se basa en la excelencia en la innovación, la calidad superior del producto, y la competencia en integración vertical y gestión ambiental. Para más información, visite la página web de Trina Solar en <http://www.trinasolar.com/>.



2.1 Objetivos competenciales

- Describir las principales características de las células fotovoltaicas.
- Distinguir las diversas tecnologías de células fotovoltaicas, diferenciando sus ventajas e inconvenientes principales.
- Explicar cómo se construye un módulo fotovoltaico a partir del conexionado de células fotovoltaicas.
- Explicar el efecto de la temperatura y la irradiancia en el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos.
- Predecir las principales magnitudes eléctricas de operación de un campo fotovoltaico.
- Explicar la necesidad de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del campo fotovoltaico.

2.2 Caso

Desde finales del siglo XX ha crecido la implantación de la tecnología fotovoltaica en aplicaciones terrestres, pasando de algunas pequeñas instalaciones para la investigación y el desarrollo a las plantas de demostración y finalmente a una fuerte implantación gracias a mecanismos de apoyo gubernamentales que han permitido alcanzar la madurez tecnológica en unos pocos años. Países como Alemania, Italia, o España han permitido desarrollar una economía de escala que en zonas con buenos niveles de radiación solar está permitiendo llegar a la denominada paridad con la red (grid parity), ese punto de inflexión donde el coste de la energía de origen fotovoltaico es igual al coste de la energía eléctrica convencional.

En el caso particular de España se ha pasado de desarrollar en 2006 medidas de apoyo a los kWh fotovoltaicos (mediante primas o esquemas denominados feed-in-tariff), a estar impidiendo la implantación de la tecnología desde inicios de 2012, eliminando las primas para nuevas instalaciones y retrasando sine die la elaboración de un nuevo modelo económico para que la tecnología siga implantándose. Mientras se está a la espera de dicha nueva regulación, el sector fotovoltaico mira con preocupación la posible aplicación de peajes por el uso de la red de suministro convencional como elemento de respaldo, es decir, nuevos impuestos sobre la energía autoconsumida o inyectada a la red como excedentes de producción que no se usan en la propia instalación.

La espera puede ser larga mientras los países desarrollados superan la fuerte crisis económica, pero la tecnología fotovoltaica ha venido para quedarse y formar parte del mix energético del futuro. Con los actuales precios de la tecnología, son muchos los países que están empezando a utilizar esta tecnología dentro de su matriz energética. En el futuro, la tecnología fotovoltaica estará presente en la mayoría de nuestros países y formará parte de nuestro entorno.



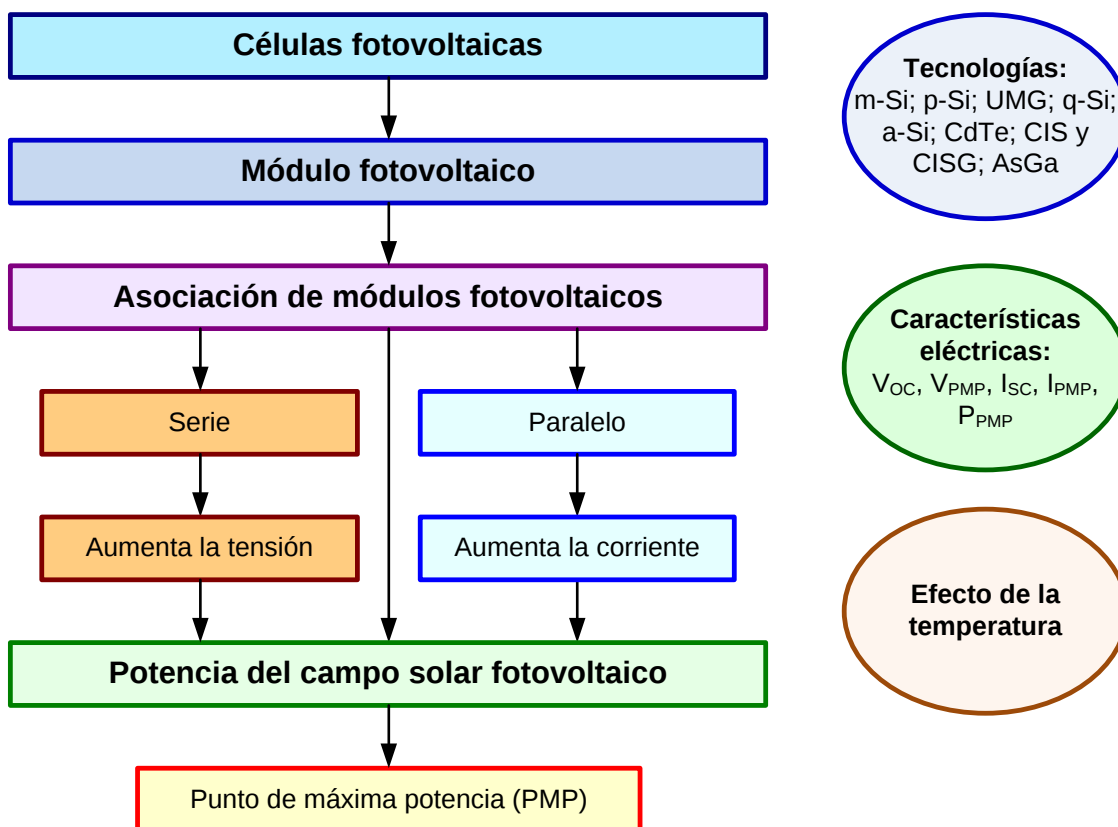
Preguntas:

¿Cuáles son las principales características eléctricas de una célula solar fotovoltaica?

¿Qué ventajas e inconvenientes presentan las diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos existentes en el mercado?

¿Cómo se construye un campo fotovoltaico? ¿Qué características tendrá una vez montado?

2.3 Esquema



2.4 Introducción

La **célula solar fotovoltaica** es el dispositivo capaz de capturar la energía del sol y convertir parte de esa energía en electricidad. Existen diversas tecnologías de células fotovoltaicas con sus particulares características y en distintas fases de desarrollo. Hay tecnologías muy maduras, como las células mono- y poli-cristalinas utilizadas ampliamente desde hace tiempo en aplicaciones terrestres, mientras que otras son de reciente desarrollo y se dispone de menor experiencia con ellas.

Exceptuando algunas aplicaciones de muy baja potencia (calculadoras, relojes, etc.), las células solares fotovoltaicas se asocian y encapsulan en **módulos fotovoltaicos** que será el elemento constructivo utilizado para la implementación de los sistemas solares fotovoltaicos. La potencia, tensión y corriente de un módulo fotovoltaico dependerá del número de células solares asociadas y de las condiciones de trabajo (radiación, viento, inclinación, etc.). La radiación incidente y la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas determinan mayoritariamente los parámetros eléctricos de operación de un módulo fotovoltaico.

Para incrementar la energía generada es habitual la utilización de más de un módulo fotovoltaico formando lo que habitualmente se denomina “el **campo solar fotovoltaico**”. Mediante la conexión eléctrica adecuada de los módulos fotovoltaicos se pueden alcanzar los niveles de potencia necesarios para cualquier aplicación, existiendo sistemas desde los pocos de vatios (como en algunas señales de tráfico) hasta del orden de los megavatios (grandes parques fotovoltaicos o huertas fotovoltaicas). Las características eléctricas de un campo solar fotovoltaico se determinan a partir de las características del módulo solar fotovoltaico utilizado en su construcción y teniendo en cuenta cómo se han efectuado las conexiones eléctricas entre los módulos

Las **características eléctricas de un campo solar fotovoltaico** deben ajustarse a las características eléctricas de la entrada de corriente continua (entrada DC) del convertidor electrónico que controla el punto de trabajo del campo solar fotovoltaico. En el caso más habitual de un sistema de conexión a la red de suministro eléctrico de alterna (AC o alternate current), el convertidor electrónico utilizado se denomina **inversor** o convertidor DC/AC.

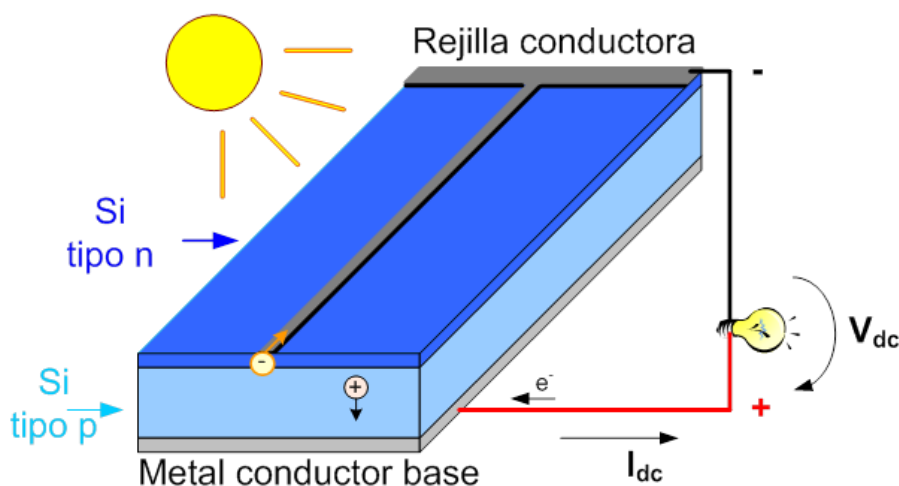
De todos los posibles puntos de trabajo del campo solar fotovoltaico, el **punto de máxima potencia** o PMP es un punto singular dado que en ese punto de trabajo el campo solar fotovoltaico genera la máxima energía para unas condiciones de operación determinadas (radiación solar, temperatura, viento, etc.). Es por ello que para optimizar la generación de energía del sistema fotovoltaico resulta necesaria la inclusión de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT o maximum power point tracking) en los convertidores electrónicos que controlan el punto de trabajo eléctrico del campo solar.

En las siguientes secciones te ampliaremos la información proporcionada en esta introducción. Las explicaciones efectuadas se reforzarán mediante preguntas y ejemplos que permitan al alumno afianzar y clarificar los conceptos expuestos en este tema. Recuerda que dispones de unos videos donde se

explican los diversos contenidos expuestos y que dispones de algunas preguntas de refuerzo para verificar si has entendido correctamente los contenidos descritos.

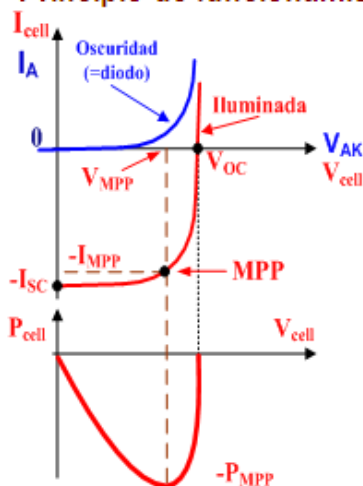
2.5 Célula solar fotovoltaica.

En 1839 el físico francés Edmond Becquerel descubre el Efecto Fotovoltaico, por el que algunos materiales, los semiconductores, son capaces de producir corriente eléctrica continua (energía eléctrica) al exponerlos a la luz solar (energía luminosa). La aplicación del efecto voltaico fuera de un laboratorio tuvo lugar en 1954, cuando Chapin, Fueller y Perarson desarrollan en Bell Telephone la primera célula solar. El primer uso de células fotovoltaicas se efectúa en el satélite Vanguard en 1958 debido a la alta capacidad de generar energía por unidad de peso, lo que se conoce como densidad de energía. Con la tecnología avanzada desarrollada para las aplicaciones espaciales, la tecnología fotovoltaica empezó a ser utilizada en aplicaciones terrestres aisladas de la red de suministro eléctrico y posteriormente ha sido utilizada como fuente de generación distribuida en sistemas conectados a la red de suministro eléctrico.

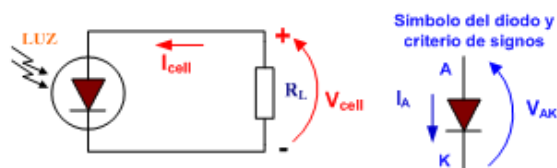


Las curvas características de una célula fotovoltaica en la oscuridad e iluminada, así como la curva de su potencia respecto a la tensión entre sus terminales, son mostradas a continuación.

Principio de funcionamiento de la célula fotovoltaica (II).



Las células fotovoltaicas generan una fuerza electromotriz que puede generar una corriente proporcional a la irradiancia que incide sobre ellas. Las células fotovoltaicas se crean mediante la unión de materiales de tipo P y N a partir de silicio semiconductor.



3

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

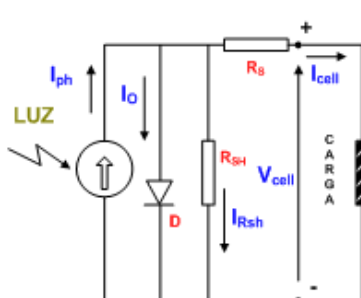
Los fotones (paquetes de energía procedentes del sol) inciden sobre los electrones existentes en la unión semiconductora de la célula fotovoltaica y según la energía del fotón pueden plantearse tres situaciones:

- La energía del fotón es inferior a la energía necesaria para pasar un electrón a la banda de conducción: el fotón interacciona débilmente con la célula fotovoltaica, atravesándola como si fuera transparente.
- La energía del fotón es igual a la energía necesaria para pasar un electrón a la banda de conducción y el fotón interacciona con un electrón: se absorberá toda la energía del fotón y se producirá un electrón libre, porque hay posibilidad de establecer una corriente eléctrica.
- La energía del fotón es superior a la energía necesaria para pasar un electrón a la banda de conducción y el fotón interacciona con un electrón: se absorberá parte de la energía del fotón para producir un electrón libre y el resto se transforma en calor, por lo que el sistema es menos eficiente. Al igual que en el caso anterior, hay posibilidad de establecer una corriente eléctrica.

Alrededor del 84% (y hasta el 90% en el caso de Silicio no cristalino o amorfo) de la energía solar incidente sobre un módulo fotovoltaico se pierde en forma de calor: Aproximadamente un 16% de la energía solar es transformada en energía eléctrica en el módulo solar. Es por ello que se precisan grandes superficies de módulos fotovoltaicos para conseguir potencias elevadas.

A partir de las obleas de Silicio se construye, mediante un proceso industrial de dopado, las células fotovoltaicas con su unión p-n. Un circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica y su ecuación característica se muestran a continuación:

Modelo de una célula solar fotovoltaica (I).



I_{ph} es una fuente de corriente DC de valor igual a la máxima corriente que puede generar la célula.

El diodo D representa al diodo que aparece al realizar la unión de semiconductores de tipo P y N. Su efecto está cuantificado por el segundo término de la ecuación de la corriente a la salida de la célula.

R_{SH} es debida a la no idealidad de la unión p-n y a las impurezas cerca de la unión (valores típicos entre 200 y 800Ω).

R_s es debida a la resistencia del volumen del material y de contactos (valores típicos entre 0.05 y 0.3Ω).

4

Módulos fotovoltaicos – Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Modelo de una célula solar fotovoltaica (II).

La ecuación de la corriente generada por una célula fotovoltaica se puede aproximar por la siguiente ecuación:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\left[\frac{q(V_{cell} + I_{cell}R_s)}{mkT} \right]} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{SH}}$$

- I_{cell} → Corriente generada por la célula (o el módulo).
- I_{ph} → Corriente máxima generada por la célula.
- I_0 → Corriente de oscuridad.
- m → factor de idealidad del diodo
- V_{cell} → Tensión de salida de la célula.

- R_s → Resistencia serie.
- R_{SH} → Resistencia paralelo (shunt).
- q → carga del electrón ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)
- K → cont. De Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
- T → temperatura absoluta.

5

Módulos fotovoltaicos – Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

La tecnología del **Silicio monocristalino** (m-Si) ha ocupado durante años el primer lugar en porcentaje de implantación en el mercado. Su principal ventaja es la eficiencia (15 al 21%), muy superior al resto en las aplicaciones terrestres más comunes. Su proceso de fabricación, igual al seguido para obtener las obleas de Si de otros dispositivos semiconductores (fabricación por zona flotante o por el método de Czochralski) resulta costoso debido a la alta pureza y la gran cantidad de material activo empleado, con un elevado gasto energético en su fabricación. Estos inconvenientes se han ido reduciendo en los últimos años, en los que se mejorado la eficiencia de las células fotovoltaicas, se han abaratado los precios de

fabricación del Silicio para aplicaciones fotovoltaicas y se han mejorado los procesos productivos, reduciendo el gasto energético necesario para la fabricación de los módulos fotovoltaicos.

La tecnología del **Silicio policristalino** (p-Si) ha permitido en los últimos años el despegue del sector económico de la energía solar fotovoltaica de conexión a red de suministro como elementos de generación de energía eléctrica distribuida. El coste de fabricación es algo inferior al del monocristalino y la eficiencia obtenida es similar (del orden del 16%).

El silicio metalúrgico o el cuasi-cristalino están en fases iniciales de desarrollo y su viabilidad técnica de futuro es aún incierta, ocupando una pequeña parte del mercado.

El **Silicio amorfo** (a-Si) resulta económico de fabricar pero la alta degradación que sufre este material respecto a la potencia eléctrica generada han impedido su comercialización masiva hasta el momento actual. Recientes tecnologías de "lámina delgada" que están en distintas fases de desarrollo presentan eficiencias entre el 6% y el 10%. Su coste por vatio-pico de módulo es inferior al del Silicio policristalino pero su coste de instalación es superior puesto que hay que montar más módulos y precisan de más superficie para una misma potencia instalada. Pueden ser útiles en grandes zonas donde el coste del terreno sea reducido (huertas solares) y puede ayudar a presionar a la baja el precio del Silicio policristalino. Con unos costes similares a los del silicio amorfo encontramos otras tecnologías como las que usan otros materiales semiconductores (Cd, Te, C, I, Se.), con eficiencias que pueden llegar a valores cercanos al 15% en algunos casos.

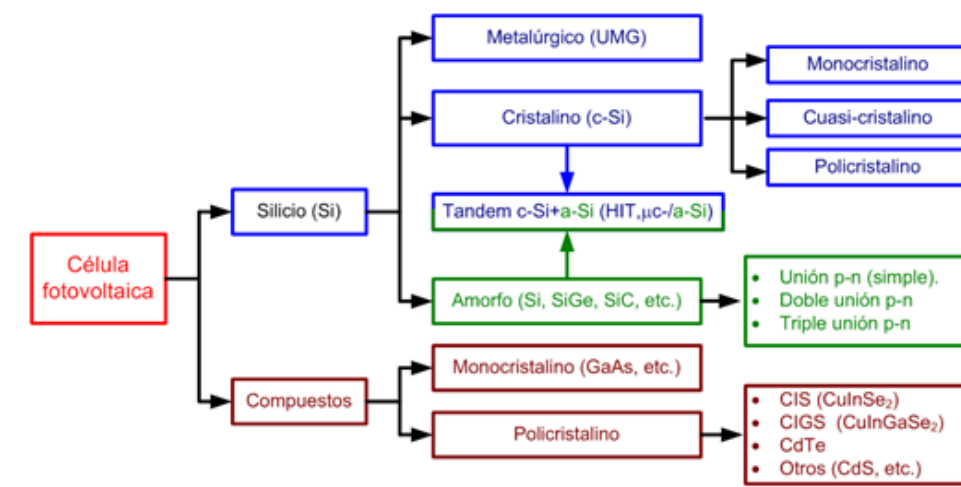
Las tecnologías de alta y muy alta eficiencia (pueden superar el 25%) son complejas de fabricar y muy costosas debido a la utilización de otros materiales semiconductores (Ga, As.), reservándose para aquellas aplicaciones especiales donde el coste no es un factor importante.



TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS



Tipos de células fotovoltaicas.



En el artículo “¿Cuál es el inversor adecuado?” encontrarás información sobre las diversas tecnologías de células fotovoltaicas. Como puedes ver en la tabla de la página 5, todos los módulos fabricados por Trina Solar (mono- y poli-cristalinos) pueden combinarse con cualquiera de los inversores fabricados por SMA.

Errores comunes:

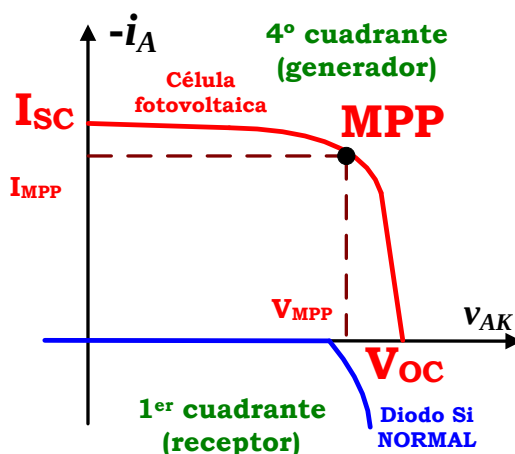
Las eficiencias obtenidas por los materiales fotovoltaicos son muy bajas y por lo tanto no resultan interesantes como fuente de generación de energía eléctrica.

Respuesta:

Si bien es cierto que algunas tecnologías presentan valores bajos (del orden del 5% en el caso del a-Si) hay otras que presentan valores del 19 % en el caso de la célula de 125x125 de silicio mono-cristalino (m-Si) utilizada en la construcción del TSM-215 DC80.08.

Los sistemas de generación de electricidad actuales alcanzan en los mejores casos valores alrededor del 50% de eficiencia (35% en promedio), respecto al combustible primario utilizado (habitualmente de tipo fósil) y no consideran todo el proceso de obtención de ese combustible. En el informe “ASIF_Mitos_prejuicios_E2.pdf” puedes ver que la eficiencia total sería de 0.175% ($0.005\% \times 35\%$), que es muy inferior a la obtenido por cualquier tecnología fotovoltaica.

La curva I-V de una célula solar fotovoltaica y su comparación con la curva típica de un diodo de Silicio se indican a continuación.



Los siguientes valores corresponden a los valores STC (**Standard Test Conditions**) de una célula de 125x125 de silicio mono-cristalino (m-Si) utilizada en la construcción del TSM-215 DC80.08:

- Corriente en el punto de máxima potencia: $I_{MPP}=5.6$ A.

- Corriente de cortocircuito: $I_{SC}=5.96$ A.
- Tensión en el punto de máxima potencia: $V_{MPP}=0.533$ V.
- Tensión en circuito abierto: $V_{OC}=0.648$ V
- Potencia: 2,98 W
- Eficiencia: 19 %

Algunas definiciones básicas de electricidad:

La **tensión eléctrica o diferencia de potencial** (V, d.d.p. o U en algunos países) es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Su unidad de medida es el voltio.

La **corriente eléctrica o intensidad eléctrica** (I) es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en C/s (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio.

Se denomina **resistencia eléctrica** (R) de una sustancia o materia a la oposición que encuentra la corriente eléctrica para circular a través de dicha sustancia. De acuerdo con la ley de Ohm la resistencia de un material (en ohmios) puede definirse como la razón entre la diferencia de potencial eléctrico (V, tensión aplicada en voltios) y la corriente (I, en amperios) que atraviesa dicha resistencia:

$$R = \frac{V}{I}$$

La **potencia** se puede definir como la cantidad de energía entregada o consumida por un elemento en un tiempo determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio (watt). Suele representarse por la letra P (potencia activa). Existen otros términos de potencia eléctrica en sistemas de alterna: Q (potencia reactiva), D (potencia de distorsión), A (potencia de asimetría) y S (Potencia aparente). La potencia eléctrica se calcula como:

$$P = V \cdot I$$

La **energía** es la capacidad que tiene un mecanismo o dispositivo eléctrico cualquiera para realizar un trabajo. Suele representarse por la letra E y en sistemas eléctricos es habitual el uso de los kWh como unidad de medida de la energía.

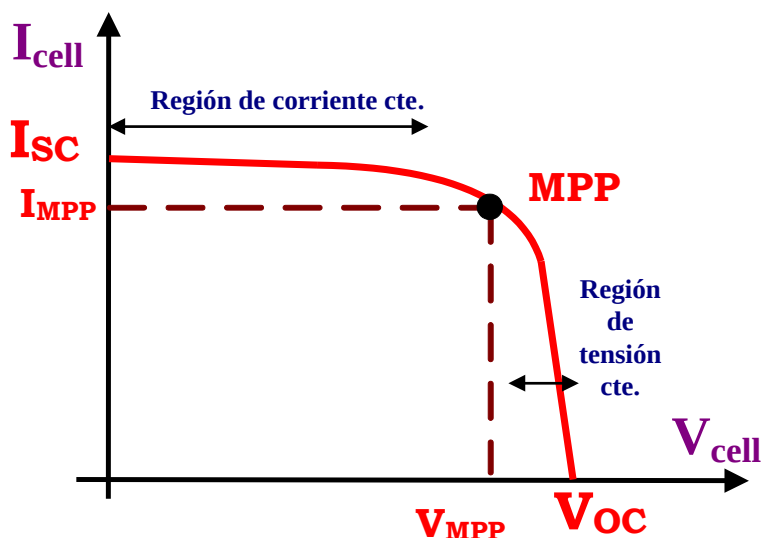
$$E = P \cdot t$$

Utilizaremos los anteriores términos en las siguientes secciones de esta unidad. Más información sobre estos términos en páginas web como <http://es.wikipedia.org/> o en libros de circuitos eléctricos.

La tensión, corriente y potencia generada por una célula fotovoltaica dependen de las condiciones ambientales donde está funcionando, que cambian a lo largo del día. Es por ello que la anterior información técnica se proporciona para unas condiciones establecidas por las regulaciones internacionales (EN61215) que se denominan Standard Test Conditions o condiciones STC (CEM o Condiciones Estándar de Medida en algunos textos en castellano).

- Irradiancia de 1000 W/m².
- Temperatura de la célula: 25° C
- Masa de aire de 1.5 (AM1.5).

Como una célula fotovoltaica se usa solo como generador de energía, es habitual presentar tan solo las curvas I-V en el cuadrante de generación. En la curva I_V típica de una célula fotovoltaica podemos distinguir las regiones de trabajo mostradas a continuación. En la misma figura se han representado los puntos significativos de la curva:



El modelo utilizado para una célula es utilizable para un módulo, ajustando los valores del modelo.

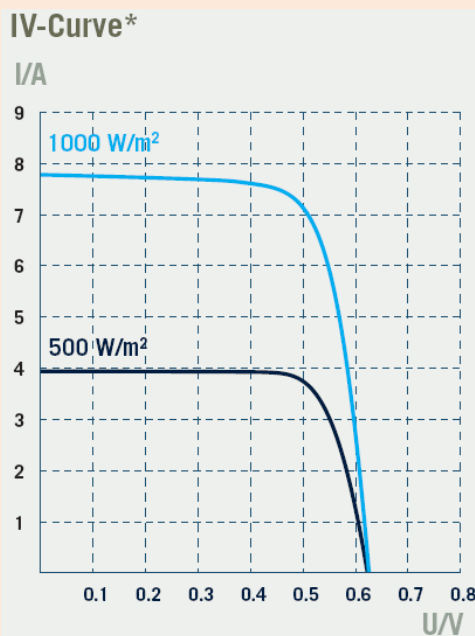
Problema – eficiencia conversión célula fotovoltaica.

Determina la eficiencia en la conversión luz a electricidad de una célula solar fotovoltaica de 156 mm x 156mm de la que se conocen los siguientes datos técnicos cuando se somete a condiciones STC:

- Corriente a 0.5 V: $I \geq 7.23$ A.
- $I_{sc} = 7.74$ A.
- $V_{oc} = 621$ mV
- $P_{max} = 3.65$ W

La curva I-V proporcionada por el fabricante de la célula es la mostrada a continuación (disponible en el

catálogo del módulo QCL_Q6L_GB_Jan06-004.pdf).



Encontrarás la solución a este problema en el video correspondiente.



Son numerosas las líneas de investigación y desarrollo relacionadas con las células fotovoltaicas:

- Mejoras en el proceso productivo de las obleas.
- Geometría de células.
- Mejoras en los grid-lines.
- Mejoras en los bus-bars.
- Texturizados de las células.
- Capas anti-reflexivas.

En el video grabado al personal técnico de Trina Solar podrás ver el I+D que desarrolla la empresa en la mejora de las células fotovoltaicas.



Como auto-test de células fotovoltaicas puedes resolver las siguientes preguntas:

A partir de las características incluidas en el fichero "QCL_Q6L_GB_Jan06-004.pdf", se determina que la célula Q6L-1500 tiene:

- Una corriente de cortocircuito de:
- Un coeficiente de la corriente de cortocircuito con la temperatura de:
- Una tensión de circuito abierto de:
- Un coeficiente de la tensión de circuito abierto con la temperatura de:
- Una potencia máxima de:
- Un coeficiente de la potencia con la temperatura de: (en %/K)
- Una eficiencia en la conversión luz a electricidad de:
- Una respuesta espectral que presenta un pico en longitudes de onda cercanas a:
- Un grosor de:
- Una tecnología....

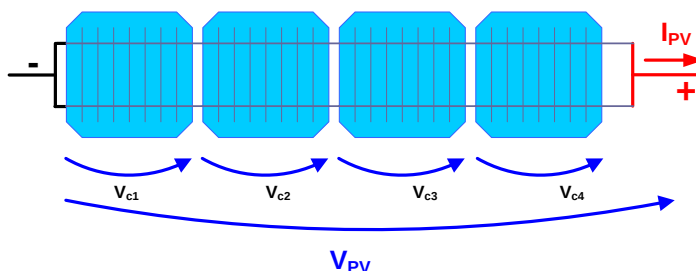
2.6 Módulo solar fotovoltaico: construcción.

Debido a que una célula solar genera poca potencia eléctrica con una baja tensión de trabajo, para crear un módulo de mayor potencia y mayor tensión de trabajo, es necesaria la asociación en serie/paralelo de varias células.

La **conexión en serie de las células fotovoltaicas aumenta la tensión (y la potencia)** de salida del módulo mientras que la corriente es la misma que la de una célula. La forma de conectar las células en serie es mediante un cable plano (una tira) de cobre estañado que une el terminal positivo (parte no vista de la célula) con el negativo (parte de la célula que se expone a la radiación solar). Las células que forman los módulos son elegidas con características muy similares para optimizar la producción de energía (reducir las pérdidas ocasionadas por dispersión de características o mismatching).

$$I_{PV} = I_{C^*}$$

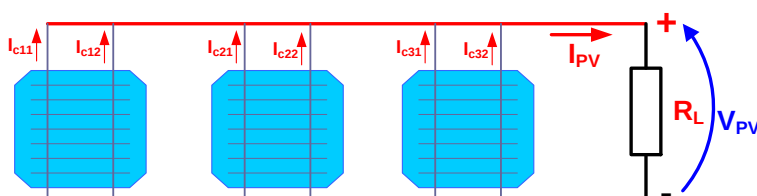
$$V_{PV} = \sum V_{C^*}$$



La **conexión en paralelo de las células fotovoltaicas aumenta la corriente (y la potencia)** de salida del módulo mientras que la tensión es la misma para todas las células. Con este tipo de conexionado la tensión sigue siendo baja y no permite el correcto funcionamiento de los convertidores electrónicos, por lo que NO es la forma habitual de interconectar las células fotovoltaicas en los módulos:

$$I_{PV} = \sum I_{C^*}$$

$$V_{PV} = V_{C^*}$$



Habitualmente se construyen módulos fotovoltaicos **con todas sus células en serie**. El número de células en serie conectadas dependen de las características técnicas de las células y de las características técnicas deseadas para el módulo. Según el tamaño de la célula fotovoltaica utilizada se obtendrán diferentes valores de la corriente de cortocircuito (I_{sc}):

- Células de 125x125 mm² (5") $\approx$ 5,9 A (m-Si - TSM-215 DC80.08).
- Células de 156x156 mm² (6") $\approx$ 8.6 A (p-Si - TSM-300 PD14)

Problema – características de las células fotovoltaicas del módulo TSM-300 PD14.

Determina las características de la célula solar fotovoltaica poli-cristalina utilizada en el módulo TSM-300 PD14.

DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES STC	TSM-290 PD14	TSM-295 PD14	TSM-300 PD14
Potencia nominal- $P_{m\acute{a}x}$ (Wp)	290	295	300
Tolerancia de potencia nominal (%)	0/+3	0/+3	0/+3
Tensión en el punto $P_{m\acute{a}x}$ - V_{MPP} (V)	36,1	36,6	36,9
Corriente en el punto $P_{m\acute{a}x}$ - I_{MPP} (A)	8,04	8,07	8,13
Tensión en circuito abierto- V_{oc} (V)	44,9	45,2	45,3
Corriente de cortocircuito- I_{sc} (A)	8,53	8,55	8,60
Eficiencia del módulo η_m (%)	14,9	15,2	15,5

DATOS MECÁNICOS

Células solares	Policristalinas 156 x 156 mm
Distribución de las células	72 células (6 x 12)

Solución:

En el video correspondiente a esta unidad encontrarás la solución a este problema.

Problema – modelo de célula fotovoltaica para el módulo TSM-300 PD14.

Una vez determinas las características de la célula solar fotovoltaica poli-cristalina utilizada en el módulo TSM-300 PD14, ¿Serías capaz de elegir un modelo de célula de entre los disponibles en el fichero Motech_solar_cell_XS156B3-200R.pdf?.

Solución:

Observando los valores de la siguiente tabla.

Efficiency Code		183	182	181	180	178	176	174	172
Efficiency	Eff (%)	18.30	18.20	18.10	18.00	17.80	17.60	17.40	17.20
Power	$P_{pm}(W)$	4.37	4.35	4.32	4.30	4.25	4.21	4.16	4.11
Max. Power Current	$I_{pm}(A)$	8.31	8.30	8.29	8.28	8.25	8.22	8.20	8.17
Short Circuit Current	$I_{sc}(A)$	8.86	8.86	8.85	8.84	8.83	8.81	8.78	8.76
Max. Power Voltage	$V_{pm}(V)$	0.526	0.524	0.521	0.519	0.515	0.512	0.507	0.503
Open Circuit Voltage	$V_{oc}(V)$	0.627	0.625	0.624	0.623	0.621	0.617	0.615	0.615

La célula que mejor ajusta sería la de código 174, que presenta una potencia de 4.16 W en el PMP. Los módulos se venden por su potencia, por lo que ese sería el principal parámetro a tener en cuenta en la elección. El nuevo módulo presentaría las siguientes características

- Corriente en el punto de máxima potencia: $I_{MPP}=8.2$ A.

- Corriente de cortocircuito: $I_{SC}=8.78 \text{ A}$.
- Tensión en el punto de máxima potencia: $V_{MPP}=0.507 \cdot 72= 36.5 \text{ V}$.
- Tensión en circuito abierto: $V_{OC}=0.615 \cdot 72= 44.28 \text{ V}$
- Potencia: $P_{MPP}=4.16 \cdot 72= 299.5 \text{ W}$

Como puedes observar, los valores obtenidos son similares a los del módulo del problema.

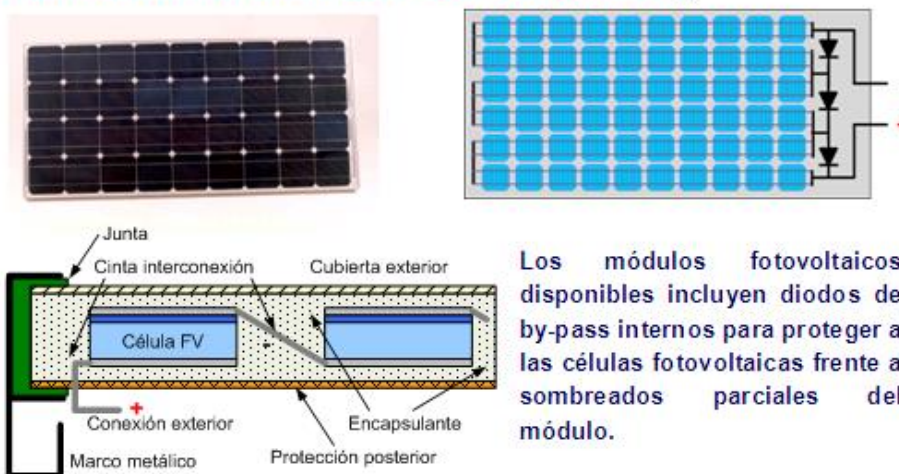
En sistemas de conexión a red y de potencias elevadas son habituales los módulos de 60 células (en una matriz de 6×10 – 6 tiras de 10 células en serie) y 72 células (en una matriz de 6×12). Para instalaciones aisladas son también habituales los módulos de 36 células (en una matriz de 4×9 – 4 tiras de 9 células en serie). Además de las células en el módulo encontramos otros elementos (encapsulantes, cristales, juntas, etc.) que le proporcionan las características mecánicas adecuadas y lo hacen resistente al medio ambiente y a los fenómenos atmosféricos.



CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO



Construcción de un módulo solar fotovoltaico (I).



Los módulos fotovoltaicos disponibles incluyen diodos de by-pass internos para proteger a las células fotovoltaicas frente a sombreados parciales del módulo.

21

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Los módulos fotovoltaicos incluyen dentro de la **junction-box** (situada en el reverso del módulo) **diodos de by-pass** internos para proteger a las células fotovoltaicas frente a sombreados parciales del módulo. Durante los sombreados parciales del módulo, algunas células fotovoltaicas pueden llegar a convertirse en «cargas» del resto de células fotovoltaicas y disipar la energía generada por las demás. En estas condiciones la temperatura se eleva de forma notable, formándose puntos calientes en la unión semiconductor. Si la temperatura sobrepasa un cierto valor (entre 85 y 100 °C) los materiales encapsulantes se dañan de forma irreversible y el módulo queda inservible. Los diodos de by-pass limitan la potencia máxima que puede llegar a soportar una célula sombreada y limitan la potencia máxima a disipar a un valor aceptable que no provoca daños irreparables.

Problema:

Se monta un módulo con una matriz de 6x10 células fotovoltaicas de 156mmx156mm que tienes las siguientes características: $V_{OC} = 0.63 \text{ V}$; $V_{MPP} = 0.54 \text{ V}$; $I_{SC} = 9 \text{ A}$; $I_{MPP} = 8.2 \text{ A}$; $P_{MPP} = 4.42 \text{ W}$. Determina las características del módulo construido.

Solución:

$$\begin{aligned}n^{\circ}_{\text{células}_{FV}} &= 6 \cdot 10 = 60 \\P_{\text{módulo}} &= 60 \cdot 4.42 = 265.2 \text{ W} \\V_{OC} &= 60 \cdot 0.63 = 37.8 \text{ V} \\V_{MPP} &= 60 \cdot 0.54 = 32.4 \text{ V} \\I_{SC} &= 9 \text{ A}; \quad I_{MPP} = 8.2 \text{ A};\end{aligned}$$

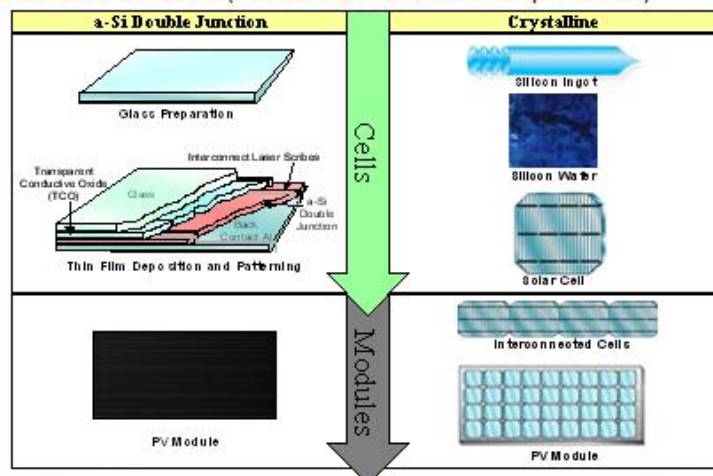
Los módulos fotovoltaico están contruidos mayoritariamente con todas las células conectadas en serie y por tanto:

- La tensión total del módulo (en V_{OC} y en V_{MPP}) la obtendrás multiplicando la tensión de la célula por el número de células.
- Las corrientes son las mismas (I_{SC} e I_{MPP}) en la célula que en el módulo.
- La potencia es la suma de las potencias de todas las células.

Cuando hay que construir un módulo fotovoltaico y hay que elegir la célula adecuado hay que recordar que los módulos se venden por su potencia. Por lo tanto, el parámetro de potencia deseada y el número de células que forman el módulo nos permitirán obtener la potencia promedio de la célula que hay que usar para construir el módulo. Después, en la línea de fabricación, los módulos pasan por un simulador solar que los testea y determina sus características I-V y los clasifica como de una determinada potencia según las tolerancias establecidas por cada fabricante.

El 90% del mercado mundial de módulos fotovoltaicos es de la tecnología cristalina, basada en células fotovoltaicas cuadradas (o cuasi-cuadradas en el caso de algunas células de silicio mono-cristalino) de tamaño 125x125 o 156x156 milímetros. En estos casos las células se unen en serie mediante unas tiras metálicas que se sueldan sobre los bus-bars de una célula y los contactos dispuestos en la parte trasera de la siguiente. Los materiales usados para la conexión de las tecnologías de capa fina son diferentes, como se explica en las siguientes transparencias:

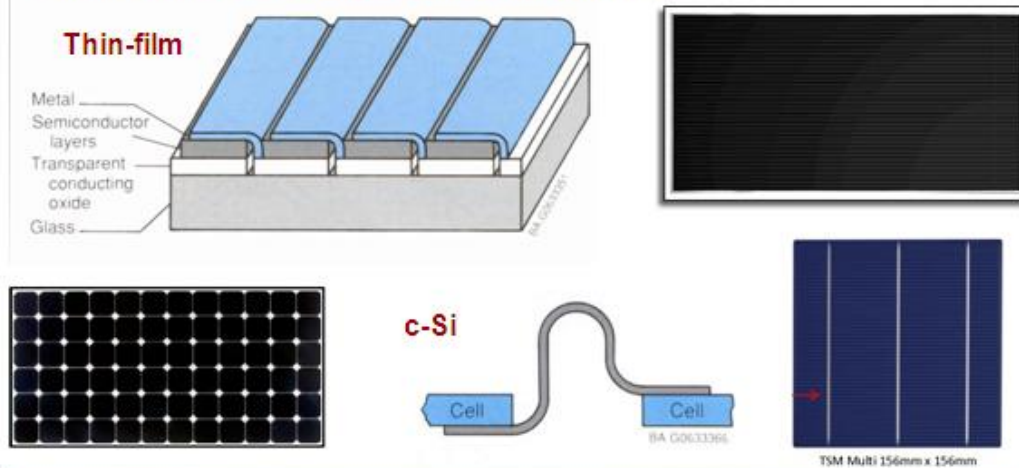
Tipos de células solares (Cortesía de EPV SOLAR - www.epvsolar.com).



24

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - @ S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Células solares a-Si: interconexión de células.



25

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - @ S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Errores comunes:

Un módulo fotovoltaico nunca llega a generar suficiente energía eléctrica como para compensar la energía eléctrica invertida en su proceso de fabricación.

Respuesta:

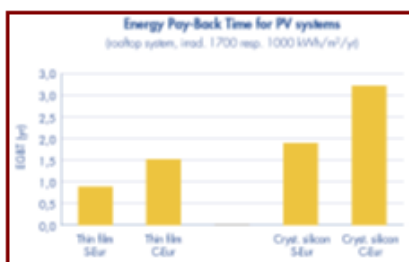
Esta afirmación era cierta en los inicios de la tecnología fotovoltaica, donde las células

fotovoltaicas eran poco eficientes (del orden del 6%) y utilizaban de un proceso de fabricación con un alto coste energético. El concepto de payback energético que te introducimos a continuación está relacionado con este error que esgrimen habitualmente algunos detractores de esta tecnología.

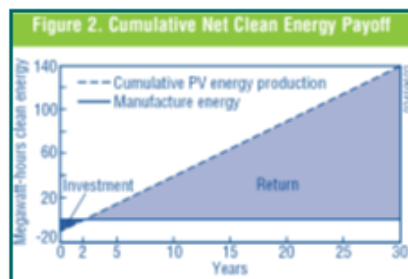
Puedes ampliar la información en los ficheros "Solar cell - Wikipedia, the free encyclopedia.pdf" y en "ASIF_Mitos_prejuicios_E2.pdf".

Aunque se ha de consumir energía en la fabricación de un módulo fotovoltaico, como puedes ver en los estudios realizados por diferentes organizaciones, el balance neto energético es positivo.

Un módulo nunca genera la energía que se ha necesitado para construirlo (payback energético)



www.eupvplatform.org



www.nrel.gov



Son numerosas las líneas de investigación y desarrollo relacionadas con los módulos fotovoltaicos y su proceso de fabricación:

- Detección micro-cracks
- Pastas soldaduras.
- Junction-box inteligentes
- Cristales anti-reflexivos.

En el video grabado al personal técnico de Trina Solar podrás ver el I+D que desarrolla la empresa en la mejora de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

Como autotest puedes resolver las siguientes preguntas:

A partir de la información técnica suministrada por Trina Solar para el módulo TSM-215-DC80.08 (disponible en el fichero "TrinaSolar_TSM_DC80_08_205-215W_ES_SEP_2013.pdf"), determina:

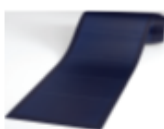
- La potencia nominal, la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto,..... en condiciones STC.
- El coeficiente de la corriente/tensión/potencia con la temperatura en unidades de A/K; V/K y W/K.
- La eficiencia de la célula y del módulo.

2.7 Tecnologías de módulos fotovoltaicos.

A partir de las diversas tecnologías de células fotovoltaicas descritas anteriormente, se construyen mediante diferentes procesos industriales los módulos fotovoltaicos que utilizan dichas tecnologías. La siguiente lista incluye datos básicos de estas tecnologías vinculadas a los datos técnicos de los correspondientes módulos comerciales:

Comparativa tecnologías módulos fotovoltaicos.

- SunPower (m-Si) E20-327-COM → 327 W en 1.63 m² ($\eta=20.1\% @ 4.99 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- Sanyo HIT-240-HDE4 → 240 W en 1.25 m² ($\eta=19\% @ 5.24 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- Trina (m-Si) TSM-215-DC80.08 → 215 W en 1.28 m² ($\eta=16.8\% @ 5.95 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- Trina (p-Si) TSM-310-PC14 → 310 W en 1.94 m² ($\eta=16\% @ 6.26 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- First Solar (CdTe) FS-395 → 95W en 0.72 m² ($\eta=13.2\% @ 7.58 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- Avancis (CIS) PowerMax-STRONG140 → 140 W en 1.09 m² ($\eta=12.8\% @ 7.82 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- Unisolar (a-Si) PVL-136 → 136 W en 2.16 m² ($\eta=6.29\% @ 15.88 \text{ m}^2/\text{kWp}$)
- EPVSOLAR (a-Si) EPV-53 → 53 W en 0.94 m² ($\eta=5.6\% @ 17.73 \text{ m}^2/\text{kWp}$)



Errores comunes:

La superficie necesaria para montar las instalaciones fotovoltaicas hace imposible que se puedan cubrir las necesidades energéticas solo con fotovoltaica.

Respuesta:

Puedes encontrar en "ASIF_Mitos_prejuicios_E2.pdf" los cálculos de cuanta superficie sería necesaria en España y en toda la tierra para cubrir completamente toda la demanda energética solo con fotovoltaica.

Es evidente que dado que la energía fotovoltaica solo está disponible en determinadas franjas horarias del día, la solución sostenible pasa por combinar en la canasta energética todo tipo de energías renovables, incluyendo soluciones de almacenamiento temporal de la energía en baterías, saltos de agua artificiales, sales fundentes, etc.

La elección "del mejor" modulo no es inmediata ni evidente. En la toma de decisión se incluyen aspectos técnicos y económicos, que fluctúan a lo largo del tiempo según las condiciones del mercado. En la siguiente tabla se resumen los aspectos más importantes de cada una de las tecnologías más habituales en el mercado. Los datos están obtenidos del informe de ASIF de 2009, por lo que podrás apreciar que alguna de las eficiencias ha mejorado.

TECNOLOGÍA CRISTALINA ESTÁNDAR		SILICIO AMORFO		CdTe	CIGS
		α-Si	α-Si/μ-Si		
Eficiencia actual de los módulos	13% - 19%	5,5% - 6,5%	9% - 11%	10% - 11%	8% - 11%
Precio de los módulos (€/Wp)	2,2 - 2,6	1,8 - 2	1,9 - 2,1	1,5 - 2	1,9 - 2,1
Cuota de mercado actual	90%	3,9%		2,7%	0,2%
Principales ventajas	Tecnología madura	Tecnología con experiencia		Eficiencia relativamente alta	Fácilmente implementable en sustratos flexibles
	Cadena de suministro establecida			Bajos costes de producción	
	Alta eficiencia	Buen comportamiento frente a la temperatura		Buen comportamiento frente a la temperatura	Eficiencia relativamente alta
Principales inconvenientes	Alta dependencia de los precios de las materias primas	Baja eficiencia	Menores expectativas de mejora de eficiencia a largo plazo	Potencial toxicidad del Cd	Alto coeficiente de pérdidas por temperatura
				Deficit potencial de telurio	Deficit potencial y elevado coste del indio
			Experiencia limitada	Experiencia limitada	Experiencia limitada

Las posibles aplicaciones de los módulos fotovoltaicos son elevadas, pudiéndose agrupar en cuatro sectores básicos:

- Residencial (tejados de viviendas).
- Industrial (cubiertas industriales).
- Sobre el terreno (huertos fotovoltaicos).
- Sistemas aislados de la red.

En la siguiente figura puedes ver la gama de productos ofrecida por Trina Solar y los diversos sectores hacia los que se orienta cada miembro de la gama.

Name		Layout	Power	Residential	Commercial	Utility	Off-grid
Universal	PC/A05	60 cells multi	230 — 245Wp	X	X	X	X
Universal	PDG5	60 cells multi	240 — 255Wp	X	X	X	X
	PC/A05A	60 cells multi	250 — 260 Wp	X			
Utility	PC/A14	72 cells multi	280 — 295 Wp		X	X	
	PC/A14A	72 cells multi	300 — 310 Wp		X	X	
	DC/A01A	72 cells mono	190 — 200 Wp	X	X		X
	DC/A80	72 cells mono	195 — 210 Wp	X			
DC05A	DC05A	60 cells mono	255 — 265 Wp	X	X		
Off-Grid Series	PC/A2x	36 cells multi	45 — 140Wp				X
	Tile Roof mounting solution			X			
	Metal Roof mounting solution			X			
	Flat roof mounting solution				X	X	
	Active system management			X	X		X

2.8 Características de los módulos fotovoltaicos.

La tensión, corriente y potencia generada por un módulo fotovoltaico dependen de las condiciones ambientales que lo rodean, cambiando a lo largo del día. Los siguientes valores corresponden a los **valores STC** (Standard Test Conditions) de un **módulo de silicio mono-cristalino (m-Si) TSM-215 DC80.08**:

- Nº de células: 72 de 125x125 mm (6x12).
- Corriente en el punto de máxima potencia: $I_{MPP}=5.6$ A.
- Corriente de cortocircuito: $I_{SC}=5.96$ A.
- Tensión en el punto de máxima potencia: $V_{MPP}=38.4$ V.
- Tensión en circuito abierto: $V_{OC}=46.7$ V
- Potencia en el PMP: 215 W
- Eficiencia: 16.8 %

Las condiciones STC fijan para la medida de los anteriores parámetros las siguientes condiciones.

- Irradiancia de 1000 W/m².
- Temperatura de la célula: 25° C
- Masa de aire de 1.5

Otros parámetros de los módulos fotovoltaicos se indican a continuación:



PARÁMETROS Y CURVAS DE UN MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO



Otros parámetros del módulo TSM-215 DC80.08:

Factor de Forma (FF):

- Determina como es la transición en la curva I-V del módulo entre la zona de corriente constante y la de tensión constante.
- Valores habituales del FF varían entre 0.7 y 0.8.
- El factor de forma ideal (FF=1) complicaría mucho el control del PMP del módulo.

Eficiencia de la conversión (η):

- Cociente entre la energía eléctrica generada por el módulo y la energía solar incidente (radiación solar) sobre el módulo.
- Su valor depende del tipo y calidad del semiconductor utilizado en la construcción del módulo (Valores típicos entre 6% y 40%).

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} = \frac{5.6}{5.96} \cdot \frac{38.4}{46.7} = 0.93 \cdot 0.82 = 0.77 \quad \eta = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{P_{incidente}} = 16.8$$

38

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

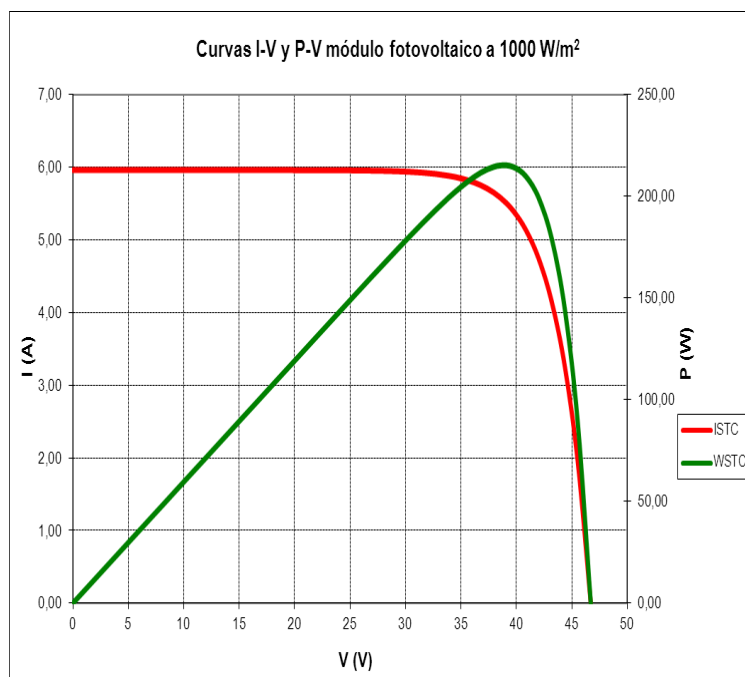
DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES STC	TSM-205 DC80.08	TSM-210 DC80.08	TSM-215 DC80.08
Potencia nominal-P _{máx} (Wp)	205	210	215
Tolerancia de potencia nominal (%)	0/+3	0/+3	0/+3
Tensión en el punto P _{máx} -V _{MPP} (V)	37,7	38,3	38,4
Corriente en el punto P _{máx} -I _{MPP} (A)	5,43	5,48	5,60
Tensión en circuito abierto-V _{OC} (V)	46,2	46,6	46,7
Corriente de cortocircuito-I _{SC} (A)	5,83	5,88	5,96
Eficiencia del módulo η_m (%)	16,0	16,4	16,8

STC: Irradiancia 1000W/m², temperatura de célula 25°C, masa de aire AM1.5 de acuerdo a EN 60904-3.
Reducción media de eficiencia del 4,5% a 200W/m² de acuerdo a EN 60904-1.

Además de los anteriores datos es habitual encontrar en las hojas de datos diversas curvas que muestran la relación existente entre:

- La corriente y la tensión de un módulo fotovoltaico: curva I-V.
- La potencia y la tensión de un módulo fotovoltaico: curva P-V.

Las anteriores curvas se pueden facilitar solo para valores STC, como la mostrada a continuación para el módulo TSM-215 DC80.08:



Comentario:

El **factor de forma** (FF o Fill Factor) se calcula con la expresión incluida anteriormente:

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

Los valores que se obtienen para módulos fotovoltaicos de una misma tecnología son bastante similares, pero entre las diversas tecnologías los valores pueden cambiar bastante. Es un parámetro que puede resultar interesante a la hora de modelar un módulo fotovoltaico pero tiene poca importancia en el diseño de instalaciones.

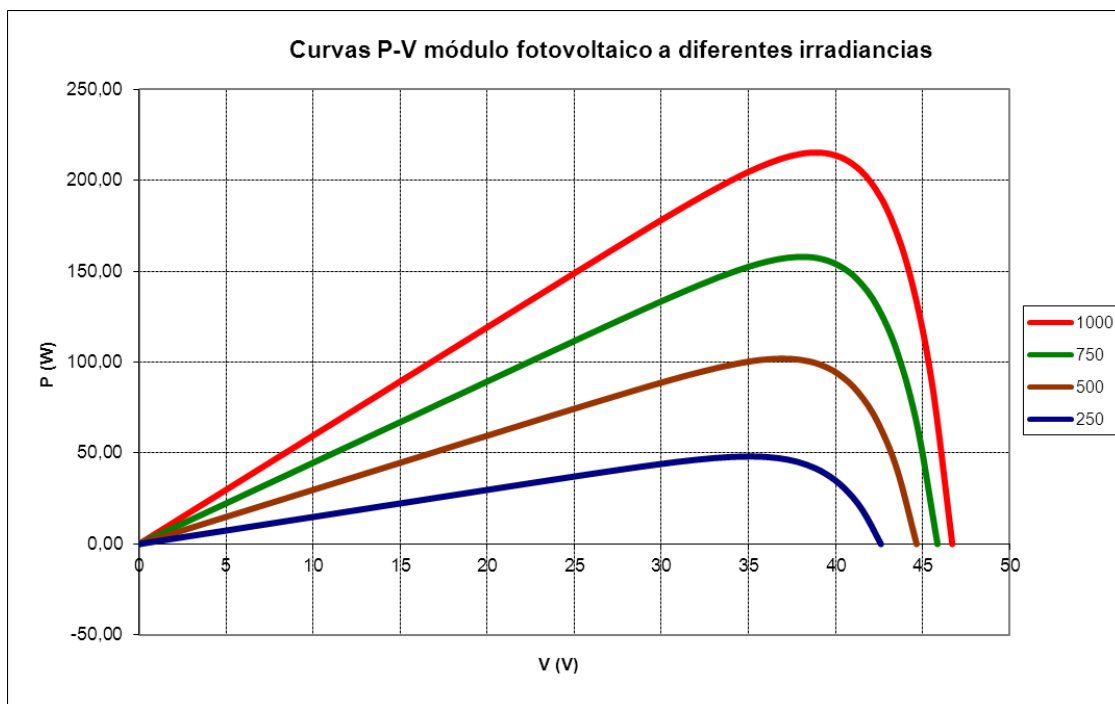
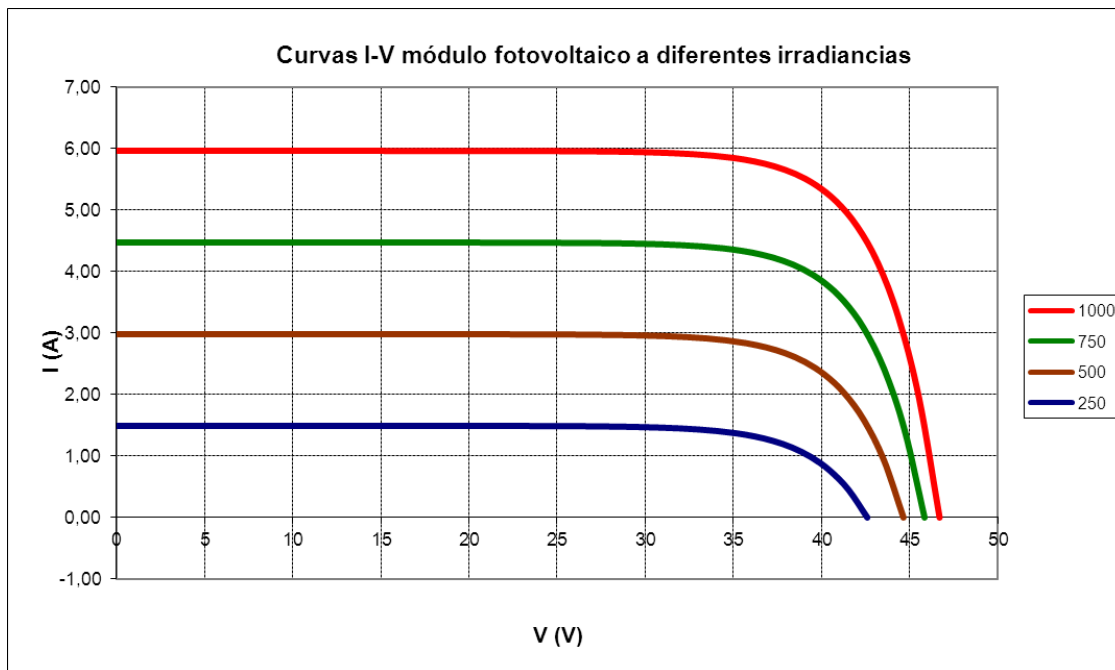
El factor de forma ideal es $FF=1$, donde $I_{MPP}=I_{SC}$ y $V_{MPP}=V_{OC}$. La curva I-V de un módulo con $FF=1$ sería un rectángulo, que proporciona para unos determinados valores de I_{SC} y V_{OC} la máxima potencia posible. Se dice que el control del MPP sería más complicado en este caso puesto que solo habría un punto de MPP y tanto a la derecha o la izquierda de ese punto la curva característica cambia muy deprisa, lo que dificultaría la implementación del algoritmo de seguimiento del MPP en el convertidor electrónico de potencia. Dispones de más información sobre estos algoritmos de control del MPP en la sección 2.11 de esta unidad.

La energía generada por los módulos fotovoltaicos puede incrementarse si realizamos el control del punto de máxima potencia o MPP. Alrededor de un 84% de la energía solar incidente en el módulo fotovoltaico se transforma en calor y el 16% restante se transforma en electricidad (valores para módulos c-Si).

También es habitual encontrar las curvas I-V y P-V cuando varía algún parámetro. Las siguientes curvas I-V y P-V corresponden al caso de irradiancia variable (E_x). Las expresiones que permiten calcular la

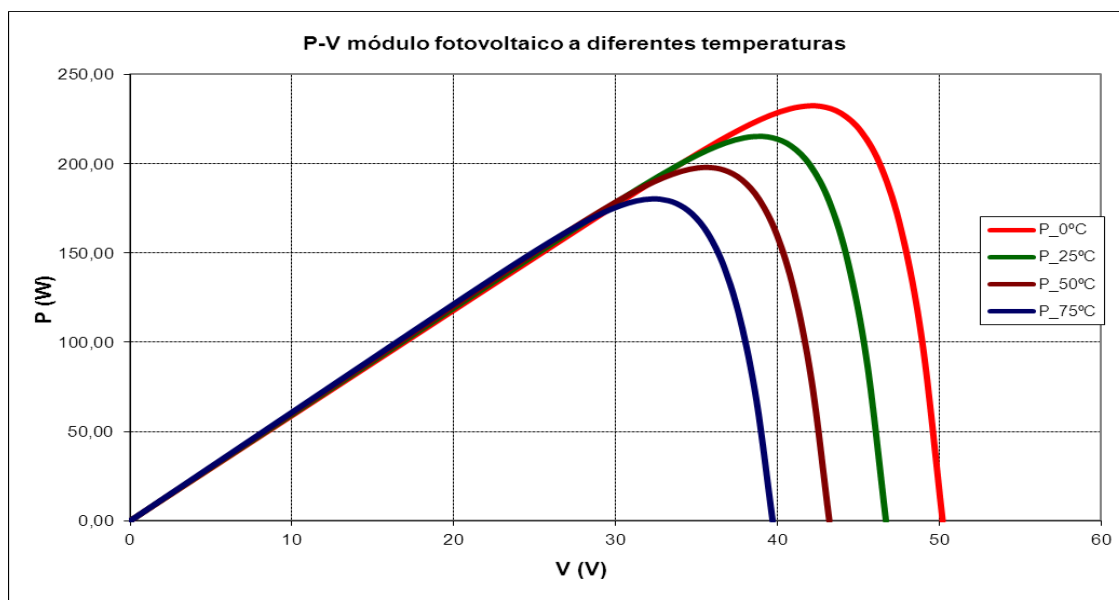
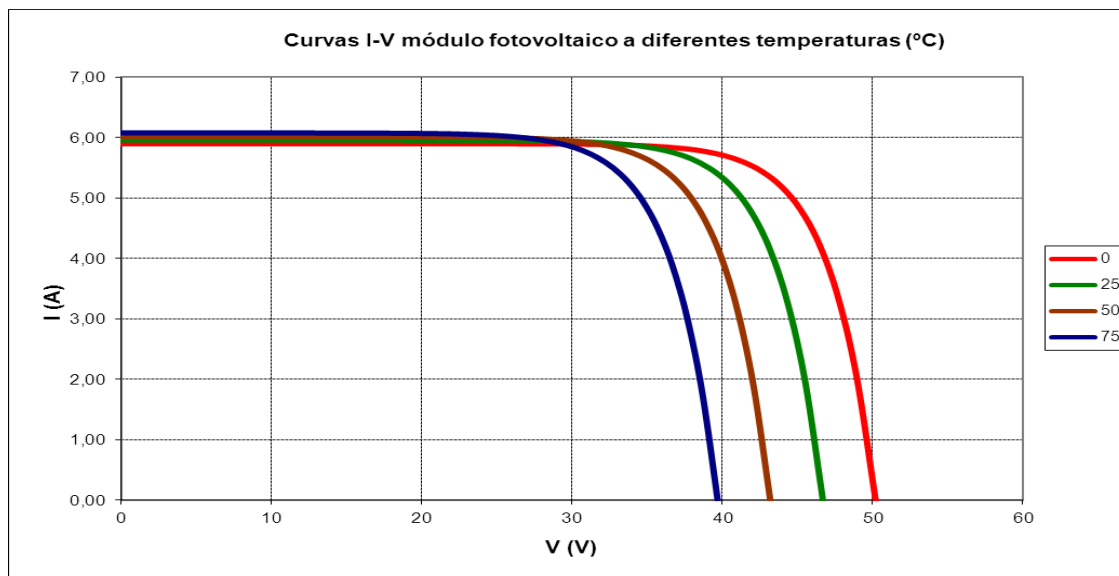
corriente y la potencia para cualquier valor de irradiancia, conocida la I_{SC} y la P_{MPP} para condiciones STC, son las siguientes:

$$I_{SC_{E_x}} = I_{SC} \frac{E_x}{1000} \quad P_{MPP_{E_x}} = P_{MPP} \frac{E_x}{1000}$$



En las gráficas anteriores puedes observar una pequeña disminución de la tensión V_{oc} con bajos niveles de irradiancia que suele no ser considerado por su baja repercusión en los sistemas fotovoltaicos.

Otro parámetro importante que afecta a los módulos fotovoltaicos es la temperatura. Las gráficas siguientes muestran las curvas I-V y P-V del TSM-215 DC80.08 con temperatura de célula (T_{cell}) variable e irradiancia constante igual a 1 kW/m^2 :



Dada la importancia de la variación de los parámetros con la temperatura, el estudio del efecto de la temperatura en el módulo fotovoltaico se realizará en una sección independiente.

Además de las condiciones STC, es habitual encontrar parámetros definidos para las condiciones NOTC o PTC. Las condiciones establecidas para medir parámetros son las indicadas a continuación:

- **PVUSA Test Conditions o PTC:** radiación de 1 kW/m², AM 1.5, temperatura ambiente de 20 °C y velocidad del viento de 1m/s.
- **Normal Operating Cell Temperature o NOCT** (TONC o Temperatura de Operación Normal de la Célula): radiación de 800 W/m², AM 1.5, temperatura ambiente de 20 °C y velocidad del viento de 1m/s.

Para el módulo TSM-215 DC80.08 el fabricante proporciona los siguientes datos para condiciones TONC:

DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES TONC	TSM-205 DC80.08	TSM-210 DC80.08	TSM-215 DC80.08
Potencia máx.-P _{MAX} (Wp)	151	155	158
Tensión en el punto P _{máx} -V _{MPP} (V)	34,6	34,9	35,1
Corriente en el punto P _{máx} -I _{MPP} (A)	4,35	4,42	4,50
Tensión en circuito abierto-V _{oc} (V)	42,7	43,0	43,1
Corriente de cortocircuito-I _{sc} (A)	4,66	4,74	4,81

TONC: Irradiancia a 800 W/m², Temperatura ambiente 20 °C, Velocidad del viento 1 m/s.

LÍMITES DE TEMPERATURA	
Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)	45°C (±2°C)
Coeficiente de temperatura de P _{MAX}	- 0,39%/K
Coeficiente de temperatura de V _{oc}	- 0,30%/K
Coeficiente de temperatura de I _{sc}	0,040%/K

Con **niveles bajos de irradiancia** los módulos fotovoltaicos experimentan una reducción de la eficiencia en la conversión luz-electricidad. La eficiencia del módulo TSM-215 DC80.08 tiene una reducción media del 4.5 % por lo que la eficiencia esperada para una irradiancia de 200 W/m² es de:

$$\eta_{200\text{W/m}^2} = 16.8 \cdot \left(1 - \frac{4.5}{100}\right) = 16.04\%$$

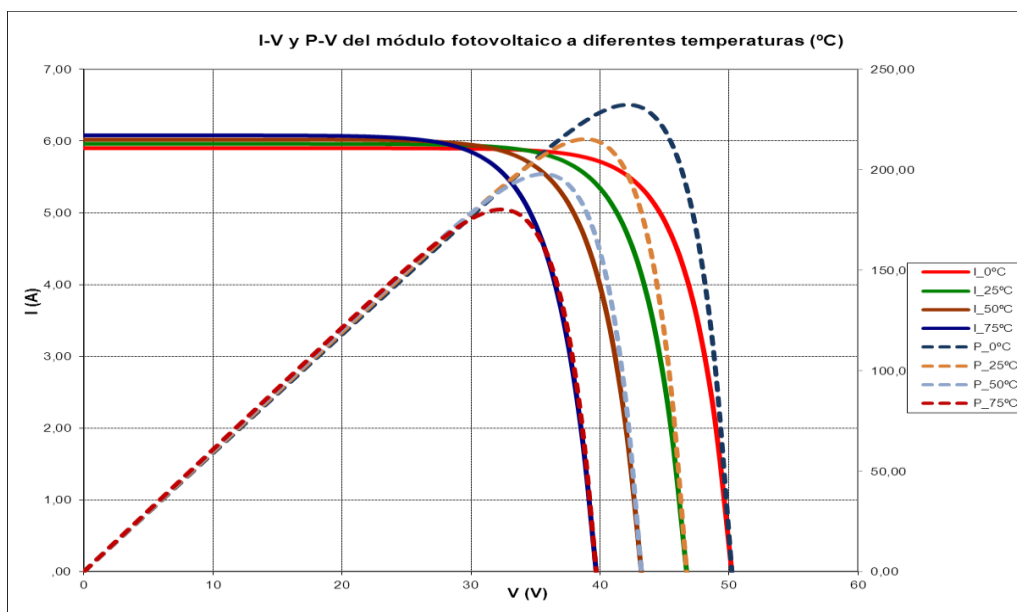
2.9 Efecto de la temperatura en los módulos fotovoltaicos.

Los factores que afectan al rendimiento de los módulos fotovoltaicos son diversos, siendo los principales los indicados a continuación:

- Temperatura de trabajo de los módulos.

- Montaje de módulos en una instalación con módulos de diferentes potencias (pérdidas por mismatching).
- Pérdidas por reflexión.
- Suciedad en los módulos.
- Sombreados parciales de la instalación.
- Eficiencia de la conversión con baja radiación.
- Conexiones deterioradas.
- Sistemas de protección (fusibles, magnetotérmicos, diodos, ...).

De todos los anteriores, en instalaciones bien diseñadas, el efecto de la temperatura de trabajo de los módulos es uno de los más importantes. El efecto de la temperatura en las curvas I-V y P-V del módulo se observa en las siguientes gráficas, representadas para las condiciones estándar de medida excepto para la temperatura que adopta los siguientes valores: 0°C, 25 °C; 50 °C y 75 °C.



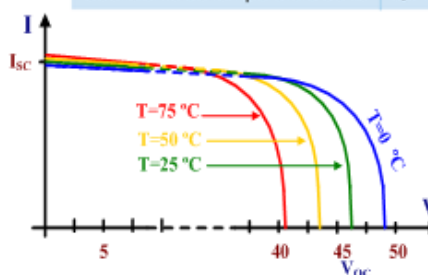
Como se puede observar, el incremento de la temperatura reduce sensiblemente la tensión y la potencia generada por el módulo fotovoltaico. La variación con la temperatura de los diversos parámetros eléctricos depende de unos coeficientes térmicos que se indican a continuación. Los coeficientes de variación de la corriente, la tensión y la potencia de un módulo fotovoltaico TSM-215 DC80.08 son los mostrados en la siguiente transparencia:

Dependencia de la características V-I en función de T_{cell} con irradiancia fija.

- Por cada grado de aumento de la temperatura en el módulo la producción de energía disminuye alrededor de un 0,4%.
- La temperatura estándar para determinar la potencia de pico ("nominal") del módulo es de 25°C en la célula.
- La generación fotovoltaica en lugares fríos es más eficiente.

LÍMITES DE TEMPERATURA

Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)	45°C (±2°C)
Coefficiente de temperatura de P _{MAX}	- 0,39%/K
Coefficiente de temperatura de V _{OC}	- 0,30%/K
Coefficiente de temperatura de I _{SC}	0,040%/K



53

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

El valor de la temperatura en condiciones NOCT es de 45 °C y permite calcular la temperatura prevista en la célula para diferentes irradiancias:

$$T_{cell} = T_{amb} + (TONC - 20) \cdot \frac{E}{800}$$

Puesto que en un módulo las células solares fotovoltaicas están conectadas en serie, la variación de la tensión de módulo en función de la temperatura experimenta variaciones superiores que la variación de la corriente. Las expresiones que se utilizan para calcular la tensión de vacío y la corriente de cortocircuito a temperaturas de trabajo distintas de las condiciones estándar de medida son:

- Coeficientes de temperatura del módulo: α en A/°C; β en V/°C y g en W/°C:

$$I_{SC_T_{cell}} = I_{SC_25^{\circ}C} + \alpha_{\%} \cdot (T_{cell} - 25)$$

$$V_{OC_T_{cell}} = V_{OC_25^{\circ}C} + \beta_{\%} \cdot (T_{cell} - 25)$$

$$P_{MPP_T_{cell}} = P_{MPP_25^{\circ}C} + g_{\%} \cdot (T_{cell} - 25)$$

- Coeficientes de temperatura del módulo en %/°C:

$$I_{SC_T_{cell}} = I_{SC\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{\%/^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right)$$

$$V_{OC_T_{cell}} = V_{OC\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{\%/^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right)$$

$$P_{MPP_T_{cell}} = P_{MPP\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \frac{g_{\%/^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right)$$

Recuerda que:

En este apartado tan solo estamos analizando el efecto de la temperatura en los parámetros eléctricos del módulo. Las expresiones que permiten calcular la corriente y la potencia para cualquier valor de irradiancia, conocida la I_{SC} y la P_{MPP} para condiciones STC, han sido explicadas en la sección anterior. En la sección 2.11 encontrarás las expresiones que combinan ambos efectos: temperatura e irradiancia.

Los valores típicos de los coeficientes de temperatura son los siguientes:

- **α (Coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito o I_{SC}):** se sitúan en el rango de $+0.02\%/^{\circ}C$ a $+0.1\%/^{\circ}C$.
- **β (Coeficiente de temperatura de la tensión de vacío o V_{OC}):** se sitúan en el rango de $-0.3\%/^{\circ}C$ a $-0.5\%/^{\circ}C$.
- **g (Coeficiente de temperatura de la potencia en el PMP o P_{MPP}):** se sitúan en el rango de $-0.3\%/^{\circ}C$ a $-0.5\%/^{\circ}C$.

Las expresiones anteriores pueden usarse para calcular también la corriente y la tensión de PMP:

$$I_{MPP_T_{cell}} = I_{MPP\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{\%/^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right)$$

$$V_{MPP_T_{cell}} = V_{MPP\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{\%/^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right)$$

Habitualmente no se suelen incluir en las hojas de datos de los fabricantes los datos del coeficiente de temperatura de la tensión o de la corriente en el punto de máxima potencia, por lo que se usan los valores disponibles indicados anteriormente.

Recuerda que:

Es lo mismo usar en ese caso los K (de Kelvin) que los grados centígrados (°C) ya que hablamos de variaciones de temperatura, y ambas escalas son iguales cuando hablamos de incrementos de temperatura.

Recuerda que β es de signo negativo. Como el término de la tensión suele ser superior al de la corriente, lo habitual es encontrar que g es de valor negativo

Nota:

Cuando el valor de g (Coeficiente de temperatura de la potencia en el PMP) no aparece en la hoja de datos del fabricante del módulo, es posible **calcular un valor de g aproximado** utilizando los coeficientes de temperatura de la corriente y la tensión definidos en %/K de la siguiente forma:

$$g_{\%/C} = \alpha_{\%/C} + \beta_{\%/C}$$

Si los coeficientes de temperatura están definidos en tanto por uno, respecto a I_{SC} o V_{OC} , la expresión de la potencia quedaría de la siguiente forma, donde g está en unidades de K^{-1} :

$$P_T = P_{pk\ 25^{\circ}C} \cdot \left(1 + \left(\frac{\alpha}{I_{SC}} + \frac{\beta}{V_{OC}} \right) \cdot (T - 25) \right)$$

Ejemplo:

A partir de la información técnica disponible para un determinado módulo de 75 W, determinar el coeficiente de la potencia respecto a la temperatura. Los datos disponibles son: $V_{OC} = 21$ V; $V_{PMP} = 17$ V; $I_{SC} = 4.8$ A; $I_{PMP} = 4.4$ A; $P_{PMP} = 75$ W; $\alpha = 2$ mA/°C; $\beta = -97.2$ mV/°C.

Solución:

$$g = \left(\frac{\alpha}{I_{SC}} + \frac{\beta}{V_{OC}} \right) = \left(\frac{0.002}{4.8} + \frac{-0.0972}{21} \right) = -0.00421\ K^{-1} \Rightarrow g = -0.42\ \%/K^{-1}$$

El valor del coeficiente de la tensión y de la corriente en tanto por cien son:

$$\beta_{\%/C} = 100 \cdot \frac{\beta_{V/C}}{V_{OC\ 25^{\circ}C}} = 100 \cdot \frac{-0.0972}{21} = -0.46\ \%/C$$

$$\alpha_{\%/C} = 100 \cdot \frac{\alpha_{V/C}}{I_{SC\ 25^{\circ}C}} = 100 \cdot \frac{+0.002}{4.8} = +0.04\ \%/C$$

Problema – Características del TSM-215 DC80.08 a diferentes T_{cell} :

Determina la tensión de vacío, la corriente de cortocircuito y la potencia máxima del módulo TSM-215 DC80.08 para las temperaturas de célula de 0°C, 50 °C y 75 °C (con 1000 W/m² de irradiancia).

Encontrarás la solución a este problema en el video correspondiente. Utiliza el fichero “FV_Intro_FIP_M1_Cap02_Trina_Modulos_sp_alumnos.xls” para su resolución.

2.10 Campo fotovoltaico

El campo fotovoltaico está formado por el conjunto de módulos que están conectados en asociaciones serie o paralelo para conseguir:

- La tensión adecuada de trabajo de los convertidores de potencia (reguladores de carga, inversores, ...).
- Los niveles de corriente máxima admitidos por los convertidores de potencia.
- La potencia necesaria de la instalación, como producto de la tensión total en el PMP por la corriente máxima en el PMP.

Con la **asociación en serie de módulos** la corriente que circula por los módulos es la misma para todos ellos. La tensión total que se obtiene es el producto de la tensión de un módulo por el número de módulos conectados en serie. La siguiente figura muestra cómo se puede efectuar la conexión en serie de varios módulos fotovoltaicos, formando una rama (o string), que a su vez se conectan en paralelo para aumentar la potencia total de la instalación.



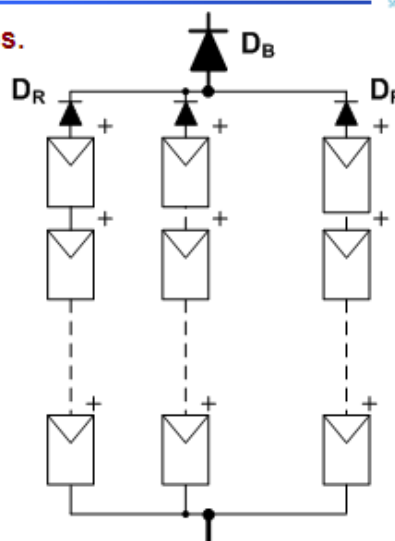
CAMPO SOLAR FOTOVOLTAICO



Asociación serie de módulos fotovoltaicos.

$D_R \rightarrow$ **diodo anti-retorno** para prevenir que la corriente de otras ramas en paralelo pueda circular y disiparse en ramas en serie con distinto punto de trabajo. Los diodos anti-retorno son útiles cuando hay módulos sombreados o hay un cortocircuito en algún módulo.

$D_B \rightarrow$ **diodo de bloqueo** para prevenir la descarga de la batería a través de los módulos durante la noche en instalaciones aisladas sin diodos anti retorno.



Se han incluido en el esquema dos tipos de diodos que actúan como diodos de bloqueo, evitando la circulación de corrientes inversas por las ramas y por el campo fotovoltaico. Otra protección habitual, que sustituye a los diodos D_R , son los fusibles, que se suelen conectar tanto en el terminal positivo como en el negativo de cada rama.

Con la **asociación en paralelo** la corriente total del grupo es la suma de la que circula por los módulos asociados en paralelo. La tensión de trabajo de todos los módulos es la misma. Los bloques en paralelo se pueden conectaren serie para aumentar la tensión de trabajo. Cada agrupación en paralelo está protegida por un diodo de by-pass, que evita los efectos adversos del sombreado en parte de los módulos (los sombreados parciales pueden provocar puntos calientes en las células sombreadas).



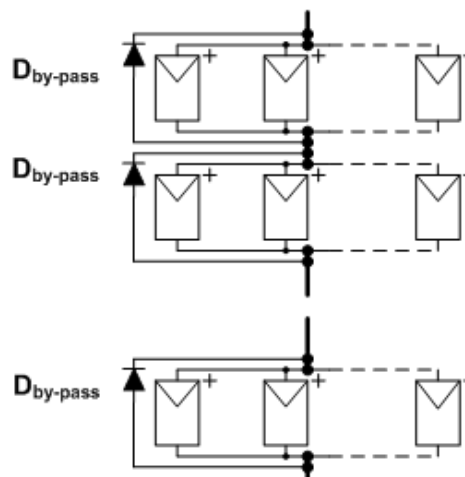
CAMPO SOLAR FOTOVOLTAICO



Asociación paralelo de módulos fotovoltaicos.

$D_{by-pass}$ → diodo de by-pass para prevenir el efecto del sombreado en parte de los módulos.

Este diodo externo deberá ser capaz de soportar toda la corriente máxima de los grupos paralelo y actúa antes que los diodos by-pass incluidos en el propio módulo para proteger las células frente a sombreados parciales del módulo.



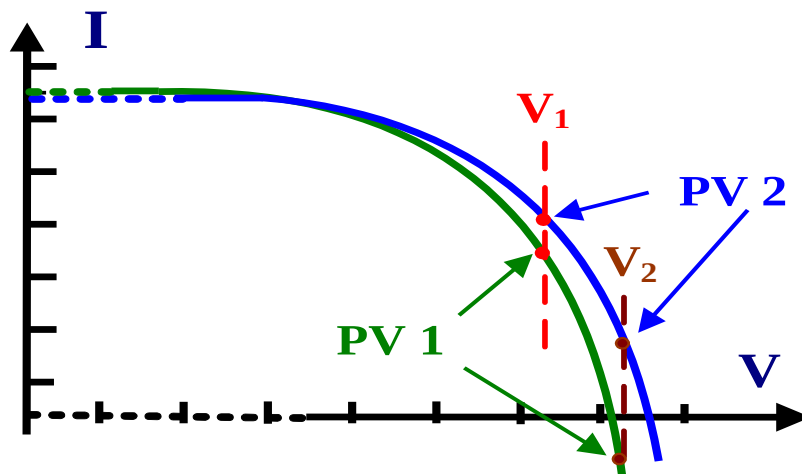
63

Módulos fotovoltaicos – Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

La asociación de módulos en paralelo (tal como aparece en la figura anterior) no es ni habitual ni aconsejable en las instalaciones fotovoltaicas. La siguiente figura permite explicar los problemas asociados a la conexión en paralelo de módulos fotovoltaicos. Se supone que las curvas de trabajo de dos módulos conectados en paralelo son algo distintas, debido a unas condiciones de trabajo diferentes y a las tolerancias de los componentes. La tensión de trabajo de los módulos solares en paralelo es la misma por lo que si las curvas I-V presentan diferencias van a trabajar en distinto punto de trabajo:

- Para una tensión de trabajo V_1 se observa que cada módulo genera un valor de corriente distinto, aunque ambas son positivas, por lo que los dos módulos están generando energía y entregándola al sistema.
- Para una tensión de trabajo V_2 se observa que cada módulo genera un valor de corriente distinto, siendo la del módulo 2 positiva y la del módulo 1 negativa. El valor negativo de la corriente hay que interpretarlo como que el módulo 1 está consumiendo energía, actuando como un receptor (carga o consumo).

La única forma de evitar estas corrientes negativas es utilizando diodos de bloqueo para cada módulo. El problema está en que los diodos tienen unas caídas de tensión que se traducen en pérdidas de potencia al circular corriente por el dispositivo.



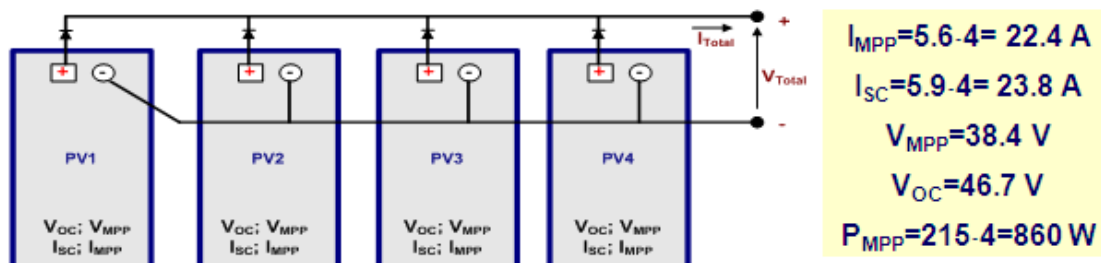
Es por ello que los campos solares se constituyen asociando módulos en serie formando ramas que después se asociarán con otras ramas para constituir el campo solar necesitado (tal como se ha dibujado en el caso de la asociación en serie).

El número máximo y mínimo de módulos que se pueden asociar en serie viene determinado por las tensiones mínima y máxima de continua de entrada del inversor (u otro tipo de convertidor utilizado) y por las tensiones características del módulo utilizado en la instalación (tensión de circuito abierto y tensión en el PMP). El número máximo de ramas en paralelo se determina a partir de la corriente de continua máxima a la entrada del inversor y la corriente en el PMP del módulo. En todos los cálculos hay que dejar unos márgenes de seguridad suficientes para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación.

En la **asociación de cuatro módulos TSM-215 DC80.08 en paralelo**, como se muestra en la siguiente figura, el campo solar tendría las siguientes características:

- Tensión de circuito abierto: $V_{OC} = 46.7 \text{ V}$.
- Tensión de PMP: $V_{PMP} = 38.4 \text{ V}$.
- Corriente de cortocircuito: $I_{SC} = 23.8 \text{ A}$.
- Corriente de PMP: $I_{PMP} = 22.4 \text{ A}$.

Asociación de 4 módulos TSM-215 DC80.08 en paralelo.



$N_{MS} \rightarrow$ número de módulos en serie.
 $N_{RP} \rightarrow$ número ramas en paralelo.

$$V_{total} = N_{MS} \cdot V_{módulo} = 1 \cdot V_{módulo}$$

$$I_{total} = N_{RP} \cdot I_{módulo} = 4 \cdot I_{módulo}$$

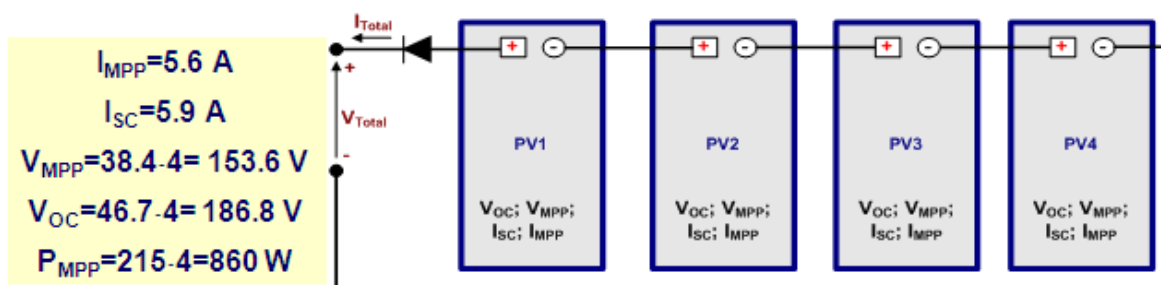
64

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

En la **asociación de cuatro módulos TSM-215 DC80.08 en serie**, como se muestra en la siguiente figura, el campo solar tendría las siguientes características:

- Tensión de circuito abierto: $V_{OC} = 186.8 \text{ V}$.
- Tensión de PMP: $V_{PMP} = 153.6 \text{ V}$.
- Corriente de cortocircuito: $I_{SC} = 5.9 \text{ A}$.
- Corriente de PMP: $I_{PMP} = 5.6 \text{ A}$.

Asociación de 4 módulos TSM-215 DC80.08 en serie.



$$V_{total} = N_{MS} \cdot V_{módulo} = 4 \cdot V_{módulo}$$

$$I_{total} = N_{RP} \cdot I_{módulo} = 1 \cdot I_{módulo}$$

$N_{MS} \rightarrow$ número de módulos en serie.
 $N_{RP} \rightarrow$ número ramas en paralelo.

65

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Problema – Campo fotovoltaico con el TSM-215 DC80.08.

Un determinado campo solar dispone de 40 módulos TSM-215 DC80.08 organizados en 4 ramas (strings). Determina la tensión de vacío, la corriente de cortocircuito y la potencia máxima de cada rama y del campo fotovoltaico (considerando condiciones STC).

¿Cuántos módulos se conectan en serie en cada rama (N_{MS})?

Encontrarás la solución a este problema en el video correspondiente. Utiliza el fichero “FV_Intro_FIP_M1_Cap02_Trina_Modulos_sp_alumno.xls” para su resolución.

Recuerda que después de finalizar esta sección debes resolver algunas de las preguntas del auto-test de campos fotovoltaicos (U2-AT04 Campo fotovoltaico con el TSM-215-DC80.08), todas ellas relacionadas con la hoja de datos de un módulo fotovoltaico:

Un determinado campo solar utiliza 22 módulos TSM-270 DC05A.08, disponiendo de dos ramas en paralelo. Determina:

- La tensión máxima del campo fotovoltaico en condiciones STC.
- La corriente de cortocircuito del campo fotovoltaico en condiciones STC.
- La potencia pico instalada en el campo fotovoltaico en condiciones STC.

En este otro tipo de pregunta se utilizan condiciones de trabajo distintas de las indicadas en condiciones STC (en la siguiente sección se te facilitan las expresiones cuando hay que estudiar el efecto combinado de la temperatura y la irradiancia):

Un determinado campo solar utiliza 22 módulos TSM-270 DC05A.08, disponiendo de dos ramas en paralelo. Si la temperatura ambiente es de 25°C y la radiación solar (irradiancia) de 900 W/m². (resto de parámetros en condiciones STC, determina:

- La potencia pico generada
- La tensión en el MPP
- La corriente en el MPP
- La temperatura que alcanzará el módulo fotovoltaico

En la **resolución de este tipo de preguntas** se han utilizado en un fichero de Excel los coeficientes de la tensión, corriente y potencia con la temperatura en las siguientes unidades:

- Coeficiente de la tensión V_{OC} con la temperatura (beta o β_{VOC}) en V/K.
- Coeficiente de la corriente I_{SC} con la temperatura (alfa o α_{ISC}) en A/K.

- Coeficiente de la potencia con la temperatura (g) en %/K.

En los módulos usados en los auto-test no se disponen de los valores de coeficiente de la tensión V_{MPP} con la temperatura (beta MPP o $\beta_{V_{MPP}}$) o del coeficiente de la corriente I_{MPP} con la temperatura (alfa MPP o $\alpha_{I_{MPP}}$) en A/K. Es por ello que todos los cálculos de tensiones o corrientes en el MPP están realizados con un fichero Excel usando los valores siguientes:

- $\beta_{V_{MPP}} = \beta_{V_{OC}}$, en V/K.
- $\alpha_{I_{MPP}} = \alpha_{I_{SC}}$, en A/K.

Finalmente, también encontrarás algunas preguntas sobre el espacio necesario para realizar la integración arquitectónica de un determinado campo fotovoltaico:

Para un caso de integración arquitectónica, determina la potencia instalada en una cubierta de 30x30 (en m²) cuando se usan módulos TSM-215-DC80.08 utilizando el valor de la eficiencia indicada en el catálogo del fabricante para condiciones STC.

2.11 Seguimiento del punto de máxima potencia.

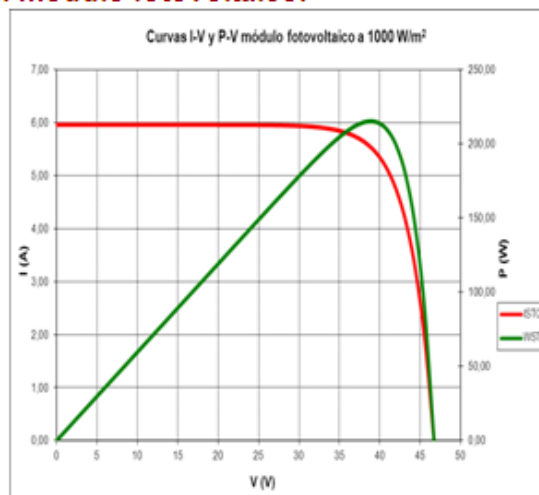
Para unas determinadas condiciones de trabajo, el punto de trabajo (o punto de operación) del módulo está definido por la tensión entre terminales que produce el módulo y la corriente que suministra el módulo a la carga conectada entre terminales. Para esas condiciones de trabajo solo existe un punto donde el producto de la tensión de módulo por la corriente de módulo da un máximo de potencia generada: es el **punto de máxima potencia** o **PMP** (MPP o Maximum Power Point en inglés).

El seguimiento del punto de máxima potencia de un módulo solar fotovoltaico o de un campo fotovoltaico es uno de los principales objetivos en una instalación solar fotovoltaica de conexión a la red de suministro (y también en las instalaciones fotovoltaicas aisladas). Con un buen seguimiento del punto de máxima potencia del campo solar, los kWh generados por la instalación serán los máximos para las condiciones de trabajo existentes.

En grandes obras (huertas solares o instalaciones sobre cubiertas de cientos de kilovatios) se puede pedir al fabricante de módulos que seleccione y organice los módulos de acuerdo a su PMP, de manera que el instalador pueda conectar entre sí los que sean similares y así se consigue “acoplar” mejor las series de módulos. De esta forma se consigue un aumento de la potencia disponible si lo comparamos con los mismos módulos conectados de manera aleatoria en cada serie.

Punto de Máxima Potencia de un módulo fotovoltaico.

- El Punto de Máxima Potencia (PMP), es el punto máximo de la curva de potencia generada para unas condiciones dadas.
- Este punto depende de:
 - ✓ Tecnología del módulo.
 - ✓ Temperatura.
 - ✓ Irradiancia.
- Condiciones STC de un módulo fotovoltaico (norma EN61215): 1kW/m², temperatura de célula de 25 °C y masa de aire de 1,5.



Módulo TSM-215 DC80.08

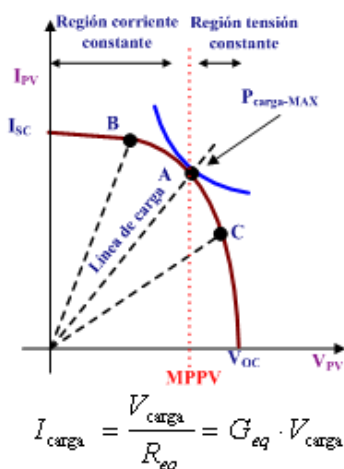
71

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Hay que tener en cuenta que incluso en el caso de que todos los módulos fueran idénticos, en realidad los PMP serán diferentes debido sobre todo a que las temperaturas de todos los módulos no van a ser iguales: los que estén en el lado por el que sopla el viento siempre estarán más fríos, en montajes con varias filas la parte superior recibe el calor evacuado por las filas inferiores, etc.

A partir de 3 kW hay suficientes módulos como para que los diferentes PMP de cada uno, al sumarlos se genera una curva de potencia en la que el PMP es más bien una meseta de máxima potencia, pues se aplana en la parte superior.

Punto de Máxima Potencia (PMP) (I).



El objetivo del control del PMP es establecer el punto de trabajo en el que el módulo solar (o conjunto de módulos solares) suministra la máxima potencia.

Para conseguirlo hay que controlar la carga que se conecta al módulo mediante el adecuado control de un convertidor conmutado DC/DC (bombeo, regulador de carga, iluminación) o de un DC/AC (conexión a red, bombeo de potencias altas).

72

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

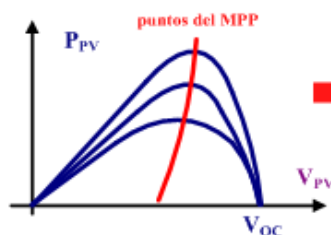
Las condiciones de trabajo de las instalaciones fotovoltaicas pueden ser muy diferentes entre unas y otras instalaciones. Además, las condiciones de trabajo de una misma instalación fotovoltaica presentan variaciones de forma diaria, semanal, mensual y anual.



PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (PMP)



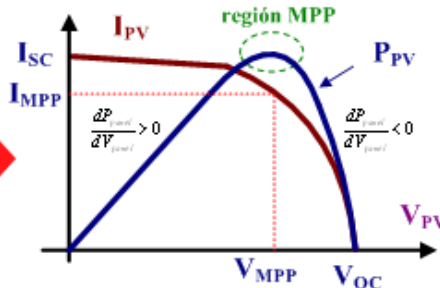
Punto de máxima potencia (PMP) (II).



El PMP varía según las condiciones del campo solar (irradiancia, temperatura,...).

Hay que calcular “continuamente” el valor óptimo del PMP.

El control del PMP sitúa el punto de trabajo del campo solar en la región donde la variación de la potencia respecto a la tensión es menor ($dP/dV \rightarrow 0$), con las coordenadas $V_{PMP}@I_{PMP}$.



73

Módulos fotovoltaicos – Trina Solar – © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Los convertidores electrónicos de potencia situados entre el campo fotovoltaico y la red de suministro son los que permiten realizar el seguimiento del PMP. Estos convertidores actúan variando continuamente la “resistencia equivalente” que el campo fotovoltaico ve conectada en sus terminales de salida, de forma que se extraiga la máxima energía posible.

Problema – Condiciones de trabajo del TSM-215 DC80.08 bajo condiciones de temperatura e irradiancia variables.

Determina, para el módulo TSM-215 DC80.08, la tensión de vacío, la corriente de cortocircuito y la potencia generada para las siguientes condiciones de trabajo:

- Temperatura ambiente de 18 °C e irradiancia de 200 W/m².
- Temperatura ambiente de 30 °C e irradiancia de 900 W/m².
- Temperatura ambiente de 25 °C e irradiancia de 200 W/m².

Encontrarás la solución a este problema en el video correspondiente. Utiliza el fichero “FV_Intro_FIP_M1_Cap02_Trina_Modulos.xls” para su resolución. Las expresiones que debes utilizar son las siguientes:

$$T_{cell} = T_{amb} + (TONC - 20) \cdot \frac{E}{800}$$

$$V_{OC_T_{cell}} = V_{OC_25^{\circ}C} + \beta_{V/C} \cdot (T_{cell} - 25)$$

$$I_{SC_T_{cell}} = \left[I_{SC_25^{\circ}C} + \alpha_{A/C} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2} = I_{SC_25^{\circ}C} \left[1 + \frac{\alpha_{\% / ^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2}$$

$$P_{MPP_E_x_T_{cell}} = \left[P_{MPP_25^{\circ}C} + g_{W/^{\circ}C} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2} = P_{MPP_25^{\circ}C} \left[1 + \frac{g_{\% / ^{\circ}C}}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2}$$

La variación de la tensión con la irradiancia NO suele considerarse por su bajo valor, siendo solo significativa la variación de la tensión con la temperatura.

NOTA: Encontrarás que en el video de esta sección (sobre el minuto 5:20) se indica que las expresiones a utilizar son las mostradas a continuación

$$V_{OC_T_{cell}} = V_{OC_25^{\circ}C} + \beta_{V/C} \cdot (T_{cell} - 25)$$

$$I_{SC_T_{cell}} = \left[I_{SC_25^{\circ}C} + \alpha_{A/C} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2}$$

$$P_{MPP_E_x_T_{cell}} = \left[P_{MPP_25^{\circ}C} + \frac{g}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \right] \cdot \frac{E_x}{1000 \text{ W/m}^2}$$

Pero comprobarás en el minuto 6:35 que realmente se usan las expresiones con coeficientes de temperatura expresados en valor porcentual. Además, la expresión anterior de la potencia debería sustituirse el 100 por un 1 (un error debido al cortar y pegar las formulas).

El convertidor conmutado consigue que el módulo fotovoltaico trabaje en el PMP, entregando la máxima potencia a la salida del convertidor conmutado, maximizando la energía generada. La salida del convertidor conmutado puede ser:

- **Continua:** el control del punto de máxima potencia (PMP) reside en un convertidor DC-DC. Dependiendo de la aplicación, en la salida del convertidor se pueden conectar: cargas DC, baterías, motor DC de un bombeo fotovoltaico, bus de continua con condensadores,...
- **Alterna:** el control del punto de máxima potencia (PMP) reside en un convertidor DC-AC. Dependiendo de la aplicación, en la salida del convertidor se pueden conectar: red de suministro, bombeo fotovoltaico, motores AC,

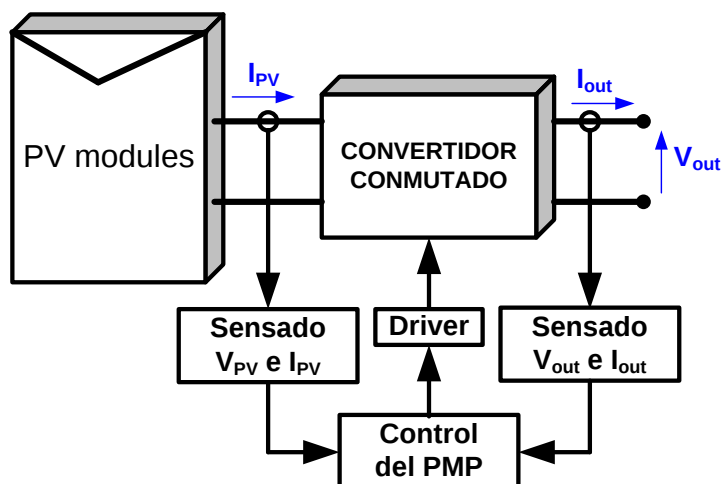
Para que el campo fotovoltaico trabaje en el PMP el control del convertidor conmutado trabaja en lazo cerrado y utiliza señales de realimentación a partir de las que calcula el punto óptimo de trabajo. Las principales magnitudes que se miden para el control del PMP son:

- Tensión y corriente de módulo.

- Tensión y corriente a la salida del convertidor conmutado (pueden ser magnitudes DC o AC).

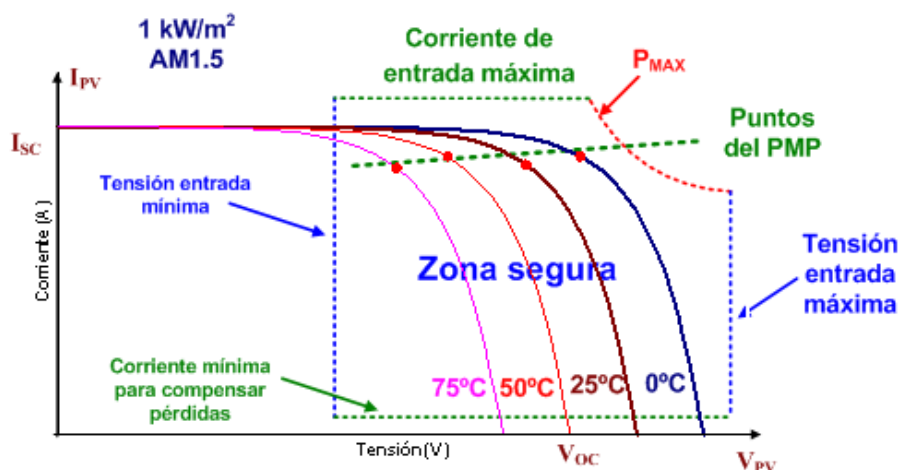
El control electrónico puede ser:

- Analógico (sistemas simples), utilizando amplificadores operacionales, transistores, etc.
- Digital (sistemas más complejos), utilizando procesadores digitales de señal o DSP.



El área de trabajo segura del convertidor electrónico se delimita dentro de las características de operación del campo solar fotovoltaico sobre el que trabaja.

Límites de trabajo del convertidor conmutado.



En realidad, cuando se está efectuando el diseño de una instalación fotovoltaica de conexión a la red de suministro, lo que se hace es diseñar un campo solar fotovoltaico que se adapte a las características de entrada del convertidor conmutado que vamos a utilizar en la instalación. Diseñar un campo solar fotovoltaico incluye: determinar el módulo que se va a utilizar en la instalación, determinar el número de

módulos serie a utilizar y determinar el número de líneas en paralelo que se van a disponer para alcanzar la potencia de pico de módulos adecuada para dicha instalación.

En un sistema de conexión a red típico el inversor comercial que nos venden incluye usualmente dos tipos de convertidores conmutados:

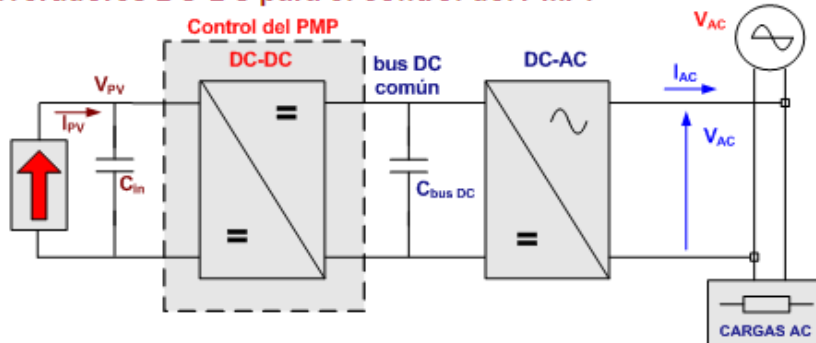
- Un DC/DC a la entrada que se conecta al campo fotovoltaico.
- Un DC/AC que es el que efectúa la conexión a la red de suministro de alterna.



PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (PMP)



Convertidores DC-DC para el control del PMP.



El control del DC-DC establece la tensión y la corriente del campo fotovoltaico que permite entregar la máxima potencia al bus DC común a ambos convertidores.

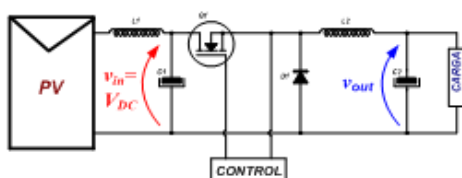
$$P_{PV} \approx P_{out \text{ bus DC}}$$

$$P_{out \text{ bus DC}} \approx P_{out AC}$$

Las **topologías básicas de convertidores DC/DC sin asilamiento** utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas son el convertidor reductor (o buck) y el convertidor elevador (o boost). Su diagrama de bloques y ecuaciones fundamentales se muestran a continuación:

Convertidores DC-DC para el control del PMP - tipos.

Reductor

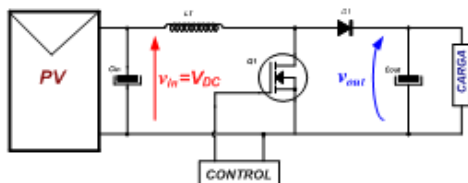


$$V_{CARGA} = \frac{t_{ON}}{T} V_{in} = \delta V_{in}$$

$$I_{CARGA} = \frac{I_{PV}}{\delta}$$

Reductor

Elevador



$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - \delta}$$

$$I_{CARGA} = (1 - \delta) \cdot I_{PV}$$

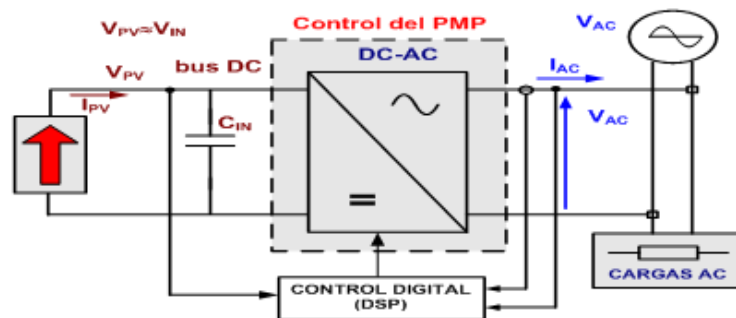
Elevador

83

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

También es posible encontrarse inversores comerciales que solo incluyen un convertidor conmutado del tipo DC/AC que efectúa el control del PMP y la conexión a la red. La desventaja de esta topología es que el rango de variación de las tensiones de entrada de continua es más reducido que cuando se utiliza un convertidor DC/DC a la entrada del campo solar fotovoltaico.

Convertidores DC-AC para el control del PMP.



$$P_{AC} \approx P_{PV} \Rightarrow V_{AC} \cdot I_{AC} \cdot \cos \varphi = V_{PV} \cdot I_{PV}$$

$$\Rightarrow I_{AC} = \frac{V_{PV} \cdot I_{PV}}{V_{AC}} = k \cdot P_{PV}$$

84

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com

Existen diversas formas de implementar el **control del punto de máxima potencia**, pudiéndose resumir en las tres que se indican a continuación.

- Método **Directo**: utiliza algoritmos software que a partir de los valores medidos de la corriente y la tensión del campo solar provoca modificaciones del punto de trabajo del convertidor conmutado y determina el valor del PMP óptimo en cada caso. El control del PMP puede ser continuo o discreto.
- Método **Indirecto**: utiliza una señal externa para estimar el PMP. Esta señal proviene de la medida de la radiación, la temperatura del módulo fotovoltaico y otros datos de la instalación.
- Método **Fijo**: consiste en fijar un PMP fijo donde la tensión de trabajo del campo solar se establece sobre el 80% del voltaje en circuito abierto (VOC).

El método directo de cálculo de la tensión y corriente del PMP en cada instante a partir de las magnitudes medidas en el sistema es el más habitualmente utilizado en sistemas fotovoltaicos de conexión a red. El método fijo es utilizado en algunos convertidores de pequeña potencia en instalaciones aisladas. La siguiente transparencia te explica cómo se implementa el control del PMP en los controladores digitales que gestionan todo el sistema.



PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (PMP)

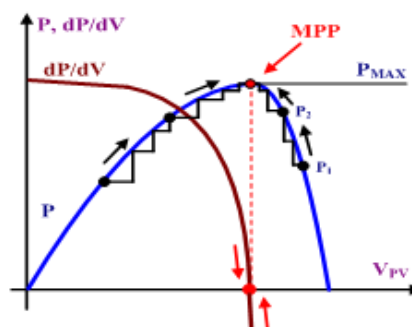


Control directo del PMP mediante conductancia incremental.

El PMP (V_{MPP} e I_{MPP} óptimos) se alcanza cuando la dP_{PV}/dV_{PV} es nula. Esta técnica de control suele implementarse con procesadores digitales de señal (DSP) donde la potencia dP_{PV} se calcula a partir de la diferencia entre la potencia obtenida para una muestra (k) y la anterior ($k-1$). La potencia en DC se calcula como el producto de la V_{PV} por la I_{PV} .

$$P(k) = V(k)I(k)$$

$$\frac{dP}{dV}(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$



86

Módulos fotovoltaicos - Trina Solar - © S. Seguí-F.J. Gimeno-S.Orts
www.cursofotovoltaica.com www.trinasolar.com



Trina Solar ha incorporado electrónica de Tigo Energy en sus módulos fotovoltaicos TSM-260-DC05A.25 y TSM-265-DC05A.28. Algunas de las ventajas que proporcionan son:

- Desconexión eléctrica del módulo por control remoto.
- Reduce el riesgo de arcos eléctricos e incendios.
- Monitorización a nivel de módulo.

	• Elimina pérdidas por mismatching. • Tensión en circuito abierto un 30% inferior. • Compatible con cualquier inversor. En el video grabado con el personal técnico de Trina Solar podrás comprender mejor las aportaciones de este nuevo producto.
--	--

2.12 Recuerda que:

- La potencia y la corriente generada por las células fotovoltaicas es linealmente dependiente de la irradiancia que reciben y de la superficie semiconductor.
- Los módulos fotovoltaicos se caracterizan por una serie de parámetros eléctricos (V_{OC} , V_{MPP} , I_{SC} , I_{MPP} , P_{MPP}) obtenidos para unas condiciones específicas de medida: las condiciones STC (Standard Test Conditions).
- Los módulos fotovoltaicos se construyen conectando en serie células fotovoltaicas. Según la tecnología de las células fotovoltaicas, la eficiencia en la conversión luz-electricidad varía entre valores del 5% al 30 %.
- Los campos fotovoltaicos se construyen conectando en serie módulos fotovoltaicos, formando ramas (o strings) que después se pueden conectar en paralelo con otras ramas para aumentar la potencia total de la instalación, llegando a formarse campos solares que alcanzan al orden de los megavatios.
- De todos los factores de pérdidas en el campo fotovoltaico, la temperatura es de los más importantes, sobre todo en lugares cálidos (que son los que normalmente tienen buenos niveles de radiación).
- El correcto seguimiento del punto de máxima potencia del campo fotovoltaico maximiza la potencia instantánea y la energía generada por un sistema fotovoltaico.

2.13 Autotest.

A partir de las características incluidas en el fichero "QCL_Q6L_GB_Jan06-004.pdf", se determina que la célula Q6L-1500 tiene:

- Una corriente de cortocircuito de:
- Un coeficiente de la corriente de cortocircuito con la temperatura de:
- Una tensión de circuito abierto de:
- Un coeficiente de la tensión de circuito abierto con la temperatura de:
- Una potencia máxima de:
- Un coeficiente de la potencia con la temperatura de: (en %/K)
- Una eficiencia en la conversión luz a electricidad de:
- Una respuesta espectral que presenta un pico en longitudes de onda cercanas a:
- Un grosor de:
- Una tecnología....

A partir de la información técnica suministrada por Trina Solar para el módulo TSM-215-DC80.08 (disponible en el fichero "TrinaSolar_TSM_DC80_08_205-215W_ES_SEP_2013.pdf"), determina:

- La potencia nominal, la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto,... en condiciones STC.
- El coeficiente de la corriente/tensión/potencia con la temperatura en unidades de A/K; V/K y W/K.
- La eficiencia de la célula y del módulo.

:

Un determinado campo solar utiliza 22 módulos TSM-270 DC05A.08, disponiendo de dos ramas en paralelo. Determina:

- La tensión máxima del campo fotovoltaico en condiciones STC.
- La corriente de cortocircuito del campo fotovoltaico en condiciones STC.
- La potencia pico instalada en el campo fotovoltaico en condiciones STC.

En este otro tipo de pregunta se utilizan condiciones de trabajo distintas de las indicadas en condiciones STC.

Un determinado campo solar utiliza 22 módulos TSM-270 DC05A.08, disponiendo de dos ramas en paralelo. Si la temperatura ambiente es de 25°C y la radiación solar (irradiancia) de 900 W/m². (resto de parámetros en condiciones STC, determina:

- La potencia pico generada
- La tensión en el MPP
- La corriente en el MPP
- La temperatura que alcanzará el módulo fotovoltaico

En la **resolución de este tipo de preguntas** se han utilizado en un fichero de Excel los coeficientes de la tensión, corriente y potencia con la temperatura en las siguientes unidades:

- Coeficiente de la tensión V_{OC} con la temperatura (beta o β_{VOC}) en V/K.
- Coeficiente de la corriente I_{SC} con la temperatura (alfa o α_{ISC}) en A/K.
- Coeficiente de la potencia con la temperatura (g) en %/K.

En los módulos usados en los autotest no se disponen de los valores de coeficiente de la tensión V_{MPP} con la temperatura (beta MPP o $\beta_{V_{MPP}}$) o del coeficiente de la corriente I_{MPP} con la temperatura (alfa MPP o $\alpha_{I_{MPP}}$) en A/K. Es por ello que todos los cálculos de tensiones o corrientes en el MPP están realizados con un fichero Excel usando los valores siguientes:

- $\beta_{V_{MPP}} = \beta_{V_{OC}}$, en V/K.
- $\alpha_{I_{MPP}} = \alpha_{I_{SC}}$, en A/K.

Finalmente, también encontrarás algunas preguntas sobre el espacio necesario para realizar la integración arquitectónica de un determinado campo fotovoltaico:

Para un caso de integración arquitectónica, determina la potencia instalada en una cubierta de 30x30 (en m²) cuando se usan módulos TSM-215-DC80.08 utilizando el valor de la eficiencia indicada en el catálogo del fabricante para condiciones STC.

2.14 Anexos.

En los documentos adicionales encontrarás información diversa relacionada con la fotovoltaica.

Varios de los documentos incluidos pertenecen a la Asociación de la Industria Fotovoltaica Europea (EPIA-European Photovoltaic Industry Association). Podrás encontrar más información en <http://www.solarpowereurope.org>. Algunos de los documentos incluidos tratan sobre el potencial de la fotovoltaica en las diversas regiones del mundo



(EPIA_Unlocking_the_Sunbelt_Potential_of_Photovoltaics_v2), la integración en el actual mix energético (o cesta o matriz energética) (EPIA_Connecting_the_Sun_Full_Report.pdf) o los mecanismos de apoyo a la tecnología (EPIA_An_Argument_for_Feed-in_Tariffs.pdf)

Del National Renewable Energy Laboratory (NREL - www.nrel.gov/) encontrarás un informe sobre el payback energético de los módulos fotovoltaicos (NREL FV pay_back times.pdf)

Del Sandia National Laboratories (<http://photovoltaics.sandia.gov>) encontrarás varios ficheros sobre las tecnologías de módulos fotovoltaicos.

2.15 Glosario.

Aislado de la red (*Off-grid or stand-alone*)

Sistema eléctrico que no está conectado a una red de distribución eléctrica.

Amperios (A) (*Ampere or Amp*)

La unidad de flujo de la corriente eléctrica (flujo de electrones). Un amperio es la cantidad de corriente producida por una fuerza electromotriz de 1 voltio aplicada a una resistencia de 1 ohm, siendo también igual a un culombio por segundo ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s} = 6,25 \times 10^{18}$ electrones por segundo).

Ánodo (*Anode*)

Terminal positivo de un diodo, correspondiente al terminal por donde entra la corriente eléctrica.

Asociación de módulos (*Module association*)

Configuración utilizada para optimizar los valores de tensión, corriente i potencia de un campo solar fotovoltaico. Los módulos pueden asociarse en serie o en paralelo. En la asociación en paralelo la corriente total del grupo es la suma de la que circula por los módulos asociados en paralelo y la tensión de trabajo de todos los módulos es la misma. En la asociación en serie la corriente que circula por los módulos asociados en serie es la misma para todos ellos mientras que la tensión total que se obtiene es el producto de la tensión de un módulo por el número de módulos conectados en serie

Cableado en serie (*Series wiring*)

Grupo de dispositivos eléctricos, tales como las baterías o los módulos fotovoltaicos, conectados entre sí para aumentar la tensión. La corriente que circula por todos los componentes de una conexión en serie es la misma. También denominado "conexión en serie".

Cadena (*String*)

Véase "rama".

Caída de tensión (*Voltage drop*)

1. Disminución de la tensión a lo largo de un conductor a través del cual circula la corriente.
2. Es la reducción del voltaje en un circuito eléctrico entre la fuente y la carga. En los códigos eléctricos nacionales suelen establecerse directrices sobre la máxima caída de tensión permitida en un circuito, para

garantizar una razonable eficiencia en la distribución de la energía eléctrica y un correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.

Caída de tensión en la línea (*Line voltage drop*)

Diferencia de tensión entre extremos de un conductor eléctrico debido a la circulación de una corriente a través de la resistencia del conductor.

Caja de conexionado (*Combiner box*)

Caja que se emplea como punto de conexión para dos o más circuitos eléctricos.

Caja de conexiones (*Junction box*)

Pequeño cuadro, generalmente adherido a la trasera de los módulos fotovoltaicos, donde las ramas de células están conectadas eléctricamente en serie y se conectan los cables que permiten el conexionado de los módulos para formar campos fotovoltaicos. Las cajas de conexiones suelen incluir dispositivos de protección frente al efecto de los sombreados (diodos de by-pass) u otros dispositivos (seguidores de PMP por módulo, etc.).

Campo fotovoltaico o generador fotovoltaico (*Photovoltaic array or array*)

Conjunto de módulos fotovoltaicos interconectados en serie y paralelo que funcionan como un único productor de electricidad. Los módulos están montados sobre una estructura de soporte o montaje. En los sistemas más pequeños, el campo fotovoltaico puede estar formado por un único módulo.

Carga, receptor, consumo (*Load*)

Dispositivos conectados a un circuito eléctrico de alimentación que, cuando el dispositivo está encendido (o activado), consumen la energía suministrada por el generador convirtiéndola en otra forma de energía o trabajo.

Célula, celda, elemento (*Cell*)

1. Bloque constructivo básico de un módulo fotovoltaico o una batería.
2. En módulos fotovoltaicos: dispositivo semiconductor que convierte la energía de la luz solar en energía eléctrica y que convenientemente conectado con otras células de similares características forma el módulo fotovoltaico.

Célula fotovoltaica (*Photovoltaic cell*)

Dispositivo semiconductor que convierte la radiación solar en electricidad. Se crean mediante la unión de materiales de tipo n y p a partir de silicio semiconductor.

Célula multiunión (*Multijunction cell*)

Célula fotovoltaica que maximiza la eficiencia de la conversión luz en electricidad mediante el uso de capas de células semiconductoras con diferentes respuestas a las longitudes de onda presentes en la luz solar.

Circuito eléctrico (*Electric circuit*)

Camino seguido por los electrones de una fuente de energía (generador, batería, etc.) a través de una línea externa, incluyendo los dispositivos que utilizan la electricidad, y volver a través de otra línea a la fuente.

Coefficiente de temperatura (*Temperature coefficient*)

Es el cambio relativo de una propiedad física cuando la temperatura se cambia 1 K (un Kelvin). Algunas magnitudes de los sistemas fotovoltaicos que presentan una importante dependencia con la temperatura son: capacidad de la batería, tensión y potencia de los módulos fotovoltaicos, capacidad de transporte de corriente de los cables, etc.

Condiciones de medida PTC (*PVUSA test conditions or PTC*)

Condiciones de medida de módulos fotovoltaicos en las que la irradiancia solar es de 1.000 W/m², la temperatura del aire es de 20 °C y la velocidad del viento es de 1 m/s a 10 metros sobre el nivel del suelo. Véase "PTC"

Condiciones de operación estándar (*SOC or Standard Operating Conditions*).

Conjunto de condiciones de referencia para tomar las medidas de un dispositivo fotovoltaico, consistente en: irradiancia de 800 W/m², 20 °C de temperatura ambiente y velocidad media de 1 m/s, con el módulo en circuito abierto, el viento orientado en paralelo al plano del sistema, y todas las partes del sistema totalmente expuesta al viento.

Condiciones Estándar de Medida o CEM o STC (*STC or Standard Test Conditions*)

Condiciones en las que un modulo fotovoltaico es normalmente comprobado en un laboratorio: irradiancia solar de 1.000 W/m², AM 1.5 (espectro de referencia solar) y con una temperatura de la célula de 25 °C.

Conexión en paralelo (*Parallel connection or parallel wiring*)

Disposición de los elementos de una batería (o módulo fotovoltaico o campo FV) realizado mediante la conexión de todos los terminales positivos juntos y todos los terminales negativos juntos. La tensión del conjunto sigue siendo el mismo que la tensión del elemento individual. La capacidad de la batería o la corriente del campo fotovoltaico se incrementan en proporción al número de elementos conectados. (Dos baterías de 12 VDC y 100 Ah conectadas en paralelo forman una batería de 200 Ah y 12 VDC).

Conexión en serie (*Series connection*)

Disposición de los elementos de una batería (o módulo fotovoltaico o campo FV) configurado al conectar el terminal positivo de cada elemento al terminal negativo del elemento siguiente, y así sucesivamente. La conexión en serie de los módulos fotovoltaicos o las baterías aumenta la tensión, mientras que la corriente sigue siendo la misma (dos baterías de 12 V_{DC} y 100 Ah conectadas en serie forman una batería de 24 V_{DC} y 100 Ah).

Corriente alterna o AC o CA (*Alternating Current or AC or ac*)

Corriente eléctrica que cambia su dirección de forma periódica, generalmente a una frecuencia fija. El término también se utiliza para describir tensiones alternas. Las centrales eléctricas generan corriente alterna debido a lo fácil que es subir y bajar la tensión de los sistemas de alterna mediante

transformadores. La tensión se eleva mucho para su transporte (en alta tensión se pierde menos energía en forma de calor que en baja tensión ya que, para la misma potencia, la corriente es más pequeña) mientras que es reducida a niveles seguros para su uso doméstico e industrial. En América del Norte, la frecuencia de la alternancia de la dirección del flujo es de 60 Hz (60 ciclos por segundo) mientras que en Europa es de 50 Hz.

Corriente continua o CC o DC (*Direct Current or DC*)

Corriente eléctrica en la que los electrones fluyen en una sola dirección (la corriente fluye en una sola dirección). Es la contraria de la corriente alterna. Las corrientes continuas pueden ser suministradas por baterías, módulos fotovoltaicos, generadores DC, pilas de combustible, etc. Hay un terminal que es el positivo (por el que sale la corriente eléctrica si se conecta una carga o receptor) y el otro es el negativo (por el que entra la corriente generada al cerrarse el lazo de corriente)

Corriente del campo fotovoltaico (*Array current*)

Corriente eléctrica producida por un generador fotovoltaico cuando se expone a la luz solar.

Corriente del punto de máxima potencia o I_{PMP} (*Current at maximum power point or I_{MPP}*)

Valor de la corriente en un módulo fotovoltaico cuando genera la máxima potencia bajo condiciones estándar de medida (condiciones CEM o STC, de *Standard Test Conditions*).

Corriente eléctrica (*Electric current*)

Flujo de electricidad a través de un conductor.

Corriente nominal del módulo (*Rated module current*)

Corriente de salida de un módulo fotovoltaico medido en condiciones STC, aunque el comportamiento de los módulos fotovoltaicos está mejor definido por medio de la corriente de cortocircuito (I_{SC}) y la corriente del punto de máxima potencia (I_{PMP}).

Curva corriente-tensión o curva I-V (*Current-voltage characteristic or I-V characteristic*)

Curva característica de generación de electricidad un dispositivo fotovoltaico sometido a una radiación luminosa.

Curva I-V (*I-V curve*)

Representación gráfica de la corriente en función de la tensión de un dispositivo fotovoltaico en el que la carga se incrementa desde la condición de cortocircuito (resistencia de carga nula) a la de circuito abierto (tensión máxima con una resistencia de carga infinita). Los tres puntos más importantes de la curva I-V son la tensión en circuito abierto (*open circuit voltage* o V_{OC}), la corriente de cortocircuito (*short circuit current* o I_{SC}) y el punto de máxima potencia (*maximum power point* o MPP), caracterizado por una tensión del punto de máxima potencia (V_{PMP} o V_{MPP}) y la corriente del punto de máxima potencia (I_{PMP} o I_{MPP}).

Diodo (*Diode*)



Dispositivo electrónico que permite el paso de la corriente eléctrica en una única dirección (de ánodo a cátodo). De forma simplificada, la curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones, por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con muy pequeña resistencia eléctrica

En fotovoltaica se utilizan como diodos de bloqueo (para evitar que la corriente circule hacia los módulos fotovoltaicos, como receptores de energía) y como diodos de by-pass (para reducir el efecto de los sombreados parciales).

Diodo de bloqueo (*Blocking diode*)

1. Diodo que se usa para prevenir el flujo de corriente no deseada.
2. Diodo utilizado para restringir o bloquear la corriente inversa hacia un módulo fotovoltaico
3. Diodo conectado en serie a una rama fotovoltaica (string) para proteger a sus módulos de un flujo de potencia inversa y, por tanto, contra el riesgo de destrucción térmica de las células solares. En un generador fotovoltaico el diodo de bloqueo se utiliza para prevenir el flujo de corriente hacia un módulo defectuoso o para evitar la descarga de la batería sobre el generador fotovoltaico durante los períodos de oscuridad o de baja producción de corriente.

Diodo de by-pass (*By-pass diode*)

Diodos conectados en anti-paralelo a lo largo de toda una parte de las células solares de un módulo fotovoltaico dispuesto para proteger estas células solares de la destrucción térmica en caso de sombra total o parcial, mientras que otras células están expuestas a plena luz.

Eficiencia (*Efficiency*)

Relación (cociente) entre la potencia (o energía) de salida y la potencia (o energía) de entrada. Normalmente se expresa en porcentaje. Referido a células solares, se trata del porcentaje de la energía solar convertida a electricidad.

Eficiencia de conversión (*Conversion efficiency*)

- 1.- Relación entre la potencia eléctrica (W) producida por una célula fotovoltaica respecto la radiación solar (o irradiancia, en W/m^2) que incide en la superficie de la célula (m^2).
- 2.- Relación entre la energía eléctrica (Wh) producida por una célula fotovoltaica respecto a la energía solar (o irradiación, en Wh/m^2) que incide en la superficie de la célula (m^2).

El término también se puede referir a la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos.

Eficiencia de conversión de la célula (o módulo) (*Cell or module conversion efficiency*)

Relación entre la energía eléctrica producida por un dispositivo fotovoltaico con la energía de la radiación solar incidente sobre la célula (o módulo).

Energía (*Energy*)

Capacidad para realizar un trabajo. La energía almacenada se convierte en trabajo cuando la usamos.



Energía solar (*Solar energy*)

Energía procedente del sol. El término se utiliza para describir todas aquellas tecnologías que utilizan la luz solar como fuente de energía: solar térmica, termoeléctrica, fotovoltaica, etc. La electricidad solar describe las tecnologías que convierten la luz solar en electricidad (termoeléctrica, fotovoltaica, etc.).

Fotón (*Photon*)

Cantidad de radiación electromagnética, considerada como una partícula de masa cero en reposo y carga, unidad de giro, y energía igual al producto de la frecuencia de la radiación por la constante de Planck

Fotovoltaico o FV (*Photovoltaic or PV*)

- 1.- Perteneciente a la conversión directa de la luz en electricidad.
- 2.- Abreviatura de energía fotovoltaica.

Fuerza electromotriz o fem (*Electromotive force*)

Toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico.

Fusible (*Fuse*)

Dispositivo de seguridad que protege a un circuito eléctrico frente a sobrecargas. Los fusibles contienen un trozo de alambre fino (por lo general de una aleación de metal) que se derrite y rompe el circuito si la corriente fluye en exceso por él. Se utilizan tradicionalmente para proteger equipos electrónicos y prevenir incendios, aunque en la actualidad han sido reemplazados en instalaciones domésticas e industriales por otros dispositivos (magnetotérmicos, disyuntores, etc.).

Generador (*Generator*)

De forma convencional un generador es una máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en electricidad que sirve de fuente de energía para otras máquinas o aplicaciones. Los generadores eléctricos que se encuentran en las grandes plantas de energía (centrales eléctricas) usan turbinas de agua, motores de combustión, molinos de viento u otras fuentes de energía mecánica para hacer girar las inductancias en fuertes campos magnéticos, lo que induce un potencial eléctrico en la bobina. Un generador que proporciona alimentación de corriente alterna se llama un alternador.

Generador fotovoltaico (*Photovoltaic generator*)

Todo el conjunto de módulos fotovoltaicos conectados eléctricamente para suministrar energía eléctrica a un determinado sistema que la utiliza para convertirla en otro tipo de energía. También se denomina campo fotovoltaico.

Irradiancia (*Irradiance*)

Energía que incide sobre una superficie por unidad de tiempo y área, equivalente a la potencia incidente por unidad de superficie. Se suele representar por G y se mide en W/m^2 . También se denomina como irradiancia solar o intensidad de radiación solar. La irradiancia máxima que llega a la superficie terrestre,

debido a efectos de dispersión y absorción de la atmósfera, es de 1100 W/m^2 , aunque es difícil medir valores que superen los 1000 W/m^2 .

Julio (J) (Joule)

Unidad de energía eléctrica que es igual al trabajo realizado cuando una corriente de un amperio circula a través de una resistencia de un ohmio durante un segundo. Un julio (1 J) es igual a $1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$ (1 Ws), equivalente a $1/3600000$ kilovatios-hora ($1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$).

Kilovatio (kW) (Kilowatt)

Unidad de potencia igual a 1.000 vatios ($1 \text{ kW} = 1.000 \text{ W}$).

Kilovatio-hora o kWh (Kilowatt-hour or kWh)

Unidad de energía igual a mil vatios-hora ($1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$). Es la unidad más común para la medida y facturación del consumo eléctrico.

Masa de aire (Air mass or AM)

La masa de aire es una indicación de la longitud de la ruta con que la radiación solar viaja a través de la atmósfera. Es un factor que mide la influencia relativa del espesor de la capa de aire sobre la radiación solar directa al atravesar la atmósfera: cuanto mayor es el camino que tiene que recorrer la radiación por la atmósfera más se reduce la intensidad de la radiación solar. AM0 (*air mass 0*) representa las condiciones del espacio exterior (el vacío) donde la radiación solar es de 1367 W/m^2 . AM1 representa las condiciones solares normales con una atmósfera limpia sin polución en la superficie terrestre en un mediodía seco. Un AM1.5 representa un aire de calidad media, con humedad y polución medias a una inclinación media y es la adoptada como referencia en diseños fotovoltaicos terrestres.

Módulo fotovoltaico (Photovoltaic module)

Grupo de células fotovoltaicas conectadas habitualmente entre sí en serie, selladas con un encapsulante y de un tamaño y potencia de salida determinadas por las características de la célula fotovoltaica utilizada. Además de las interconexiones entre células también se incluyen en el módulo fotovoltaico la caja de conexión DC (*junction box*), donde se alojan los dispositivos de protección (como los diodos de by-pass) y los terminales de salida. Es el bloque más pequeño disponible para implementar un campo fotovoltaico. También se denomina panel fotovoltaico.

Módulo fotovoltaico de capa fina (Thin-film PV module)

Módulo fotovoltaico construido con una o varias capas de materiales semiconductores, como el diseleniuro de cobre e indio, el telurio de cadmio, el arseniuro de galio o el silicio amorfo, de unas pocas micras o menos de espesor. Un módulo de capa fina tiene todo su sustrato cubierto de capas delgadas de materiales semiconductores utilizando técnicas de deposición de vapor o pulverizados. En una fase posterior se delimitan las células individuales mediante láser para después pasar a realizar las conexiones eléctricas entre las células. Las tecnologías de capa fina se están desarrollando como un medio de reducir el coste de la energía fotovoltaica al ser más baratas de fabricar debido a sus reducidos costes de material y que se precisa de menos energía en su fabricación.

Monocristalino o m-Si (*Single crystal or c-Si*)

Un monocristal es un material en el que la red cristalina es continua y no está interrumpida por bordes de grano hasta los bordes de la muestra. Muchas células fotovoltaicas están hechas de silicio monocristalino (silicio monocristalino o c-Si).

Multicristalino (*Multicrystalline or mc-Si*)

Compuesto de agregados de cristales de silicio. Ver policristalino.

Oblea (*Wafer*)

Lamina delgada de material semiconductor realizada por serrado de un lingote de cristal o multicristal.

Ohmio (*Ohm*)

1. Unidad de la resistencia al flujo de una corriente eléctrica.
2. Unidad de resistencia eléctrica en la que una fuerza electromotriz de un voltio mantiene una corriente de un amperio.

Payback (*Payback*)

Número de años necesario para que la energía generada por un módulo fotovoltaico se iguale a la energía gastada durante el proceso industrial de fabricación.

Pérdidas (*Losses*)

Diferencia entre la energía generada y la energía de la que disponemos al final del proceso debido a caídas de tensión en los conductores, pérdidas en el inversor, etc.

Pérdidas en la línea (*Line loss*)

El total de las diferentes pérdidas de energía que se tienen en una línea de transmisión y distribución eléctrica.

Pérdidas por falta de concordancia o desajustes (*Mismatching losses*)

Pérdidas de potencia en instalaciones fotovoltaicas debido a las variaciones (diferencias) de las características en la curva corriente-tensión de los módulos fotovoltaicos que están conectadas entre sí en serie (o en paralelo).

Pico de potencia, potencia de pico (*Peak power*)

1. Nivel máximo de potencia demandada (o producida) que se mide durante un período de observación. El pico de potencia se refiere también a la hora del día en que hay más demanda de electricidad.
2. La potencia de salida máxima de un módulo fotovoltaico de acuerdo con las condiciones estándar de media (condiciones STC). Véase "potencia de pico del módulo".

Policristalino (*Polycrystalline*)

1. Material que se solidifica formando numerosos pequeños cristales. Los átomos en un cristal individual están dispuestos simétricamente, mientras que los cristales se mezclan juntos. La gran cantidad de

bordes entre granos reducen la eficiencia del dispositivo. Algunas veces es referido como "multicristalino" o "semicristalino"

Potencia (Power)

Magnitud básica eléctrica, igual al producto de la diferencia de potencial aplicada (tensión o voltaje) por la corriente en un circuito de corriente continua. Varias magnitudes de potencia pueden ser definidas en el circuito de corriente alterna: potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, etc.

Potencia de pico del módulo (Module Peak Power or P_p or P_{pk})

Potencia máxima que un módulo fotovoltaico produce de acuerdo a las condiciones de prueba estándar (STC): radiación de 1.000 W/m², espectro solar AM 1.5 y temperatura del módulo de 25 °C.

Potencia de pico fotovoltaica (Photovoltaic peak watt)

Potencia entregada por una célula, módulo o sistema fotovoltaico que se producirá en las condiciones de prueba estándar (STC): radiación de 1.000 W/m², solar de espectro AM 1.5 y temperatura del módulo a 25 °C. Véase "potencia de pico del módulo".

PTC (PTC)

PTC se refiere a las condiciones PVUSA de prueba, que se desarrollaron para probar y comparar los sistemas fotovoltaicos como parte del proyecto PVUSA (*Photovoltaics for Utility Scale Applications*). Las condiciones de PTC son: 1.000 W/m² de irradiancia solar, temperatura del aire 20 °C, y velocidad del viento de 1 m/s a 10 metros sobre el nivel del suelo. Los fabricantes fotovoltaicos usan condiciones estándar de medida (CEM o STC), para calificar sus productos fotovoltaicos. El STC es 1.000 W/m² de irradiancia solar, una temperatura de la célula de 25 °C, una masa de aire igual a 1,5, y ASTM G173-03 del espectro estándar. Los valores PTC, inferiores a los valores STC, se reconocen generalmente como una medida más realista porque las condiciones de test reflejan mejor "el mundo real" de la energía solar fotovoltaica y las condiciones climáticas de funcionamiento, en comparación con los valores STC.

Punto caliente (Hot spot)

Fenómeno indeseable mientras opera el dispositivo fotovoltaico en el cual una o más células en un módulo fotovoltaico actúan como una carga resistiva, dando lugar a un calentamiento local excesivo o a la fusión de la célula o células.

Punto de funcionamiento (Operating point)

La intensidad y tensión que un módulo o campo fotovoltaico produce cuando se conecta a una carga. El punto de operación depende de numerosos factores, como son: la radiación solar, las condiciones de funcionamiento, la carga del sistema, el estado de carga de las baterías, etc.

Punto de máxima potencia o PMP (Maximum Power Point)

1. Punto en una curva I-V de un módulo o campo fotovoltaico que representa el rectángulo de mayor superficie que se puede extraer bajo la curva. Haciendo funcionar un generador fotovoltaico a dicha tensión (tensión del punto de máxima potencia o V_{PMP}) y corriente (corriente del punto de máxima potencia o I_{PMP}), se obtendrá la máxima potencia a su salida.



2. Punto de la curva corriente-voltaje (I-V) de un módulo o campo fotovoltaico expuesto a la radiación solar donde el producto de la intensidad y la tensión es máxima.

Radiación solar (*Solar radiation*)

Cantidad de energía solar que llega a la tierra. La magnitud que mide la radiación solar es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m².

Rama o ramal (*String*)

Conjunto de módulos fotovoltaicos interconectados eléctricamente en serie para producir la tensión de servicio requeridos por la carga. También denominado como “serie” o “cadena”.

Recubrimiento antirreflectante (*Antireflection coating*)

Fina capa de un material aplicada a la superficie de las células fotovoltaicas que reduce la reflexión de la luz y aumenta la transmisión de la luz hacia la célula.

Resistencia (*Resistance*)

1. La propiedad de un conductor que se opone al flujo de una corriente eléctrica provocando la generación de calor en el material conductor.
2. La medida de la resistencia de un conductor dado es la fuerza electromotriz necesaria para que circule la unidad de flujo de corriente (el amperio). La unidad de la resistencia son los ohmios.
3. La oposición de un cuerpo o sustancia a la corriente que pasa a través de ella, dando lugar a un cambio de energía eléctrica en calor u otra forma de energía.

Semiconductor (*Semiconductor*)

Material que tiene una capacidad limitada para conducir una corriente eléctrica. Por lo general su conductividad se sitúa entre la de un metal y un aislante. Algunos semiconductores son especialmente indicados para el proceso de conversión fotovoltaica: silicio (Si), arseniuro de galio (GaAs), diseleniuro de cobre e indio (CIS), y telurio de cadmio (CdTe).

Semiconductor amorfo (*Amorphous semiconductor*)

Material semiconductor no cristalino. Más fácil y más barato de fabricar que el cristalino pero que es menos eficaz y poco a poco se degrada con el tiempo. Forma parte de las tecnologías fotovoltaicas de capa fina (*thin-film*).

Semiconductor tipo n (*n-type semiconductor*)

Un semiconductor producido por el dopaje de un semiconductor intrínseco (silicio) con impurezas que son donantes de electrones (como el fósforo (P), el antimonio (Sb) o el arsénico (As)).

Semiconductor tipo p (*p-type semiconductor*)

Un semiconductor producido por el dopaje de un semiconductor intrínseco (silicio) con impurezas que son aceptores de electrones (como el boro (B), aluminio (Al) galio (Ga) o indio (In)).

Serie, rama, ramal, cadena (*String*)

Véase “rama”.

Silicio o Si (*Silicon*)

Elemento químico de número atómico 14, semimetálico en la naturaleza y de color gris oscuro, es considerado un material semiconductor excelente. Es un componente común de la arena y el cuarzo (como el óxido). Cristaliza en forma de red cúbica centrada en la cara, como un diamante. Es el material semiconductor más comúnmente utilizado en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos.

Silicio amorfo o a-Si (*Amorphous silicon*)

Célula fotovoltaica de silicio formada por una película delgada que no tiene estructura cristalina y que habitualmente se fabrica por deposición del material sobre un sustrato (vidrio, metal, etc.)

Silicio cristalino o c-Si (*Crystalline silicon*)

Células fotovoltaicas de silicio obtenidas a partir del corte de un lingote de un solo cristal (silicio monocristalino) o de diversos cristales (silicio policristalino).

Silicio de grado solar (*Solar grade silicon*)

Silicio de grado intermedio utilizado en la fabricación de células solares. Menos caro que el silicio de grado electrónico, pero más caro que el silicio de grado metalúrgico actual.

Silicio metalúrgico de grado solar (*Upgraded metallurgical-grade silicon or UMG Si*)

El silicio de grado metalúrgico ó UMG (*Upgraded metallurgical-grade*) es menos puro que el polisilicio pero utilizado en la producción de módulos fotovoltaicos está considerado como una alternativa interesante al polisilicio por su menor coste efectivo aunque la eficiencia de conversión sea más pequeña

Silicio monocristalino o m-Si (*Monocrystalline silicon or c-Si*)

El silicio monocristalino tiene una estructura cristalina única y continua conteniendo prácticamente cero defectos o impurezas. Véase “monocristalino”.

Silicio policristalino o p-Si (*Polycrystalline silicon or poly-Si*)

Material utilizado para hacer células fotovoltaicas que se componen de muchos cristales de silicio, en contraste con el silicio monocristalino. Algunas veces conocido como “polisilicio” o “Poly-Si”.

Silicio tipo n (*n-type silicon*)

Material de silicio que se ha dopado con un material que tiene más electrones en su estructura atómica que el silicio.

Silicio tipo p (*p-type silicon*)

Material de silicio que se ha dopado con un material que tiene menos electrones en su estructura atómica que el silicio.

Sistema fotovoltaico (*Photovoltaic system*)



1. Componentes que forman un sistema fotovoltaico de generación eléctrica. Por lo general consta de: módulos fotovoltaicos, regulador de carga, inversor, protecciones (fusibles, interruptores, etc.) y batería.
2. Conjunto de componentes utilizados para convertir la luz solar en electricidad mediante el proceso fotovoltaico, incluyendo el generador fotovoltaico y el resto de componentes del sistema (BOS o *Balance of System*).
3. Una instalación de módulos fotovoltaicos y otros componentes diseñados para producir energía eléctrica a partir de la luz solar y satisfacer la demanda de energía para una carga determinada.

Temperatura ambiente (*Ambient temperature*)

La temperatura de la zona circundante.

Temperatura normal de operación de la célula o TONC (*Normal Operating Cell Temperature or NOCT*)

Temperatura a la cual las células fotovoltaicas de un módulo operaran bajo condiciones de operación estándar (SOC o *standard operating conditions*). Estas condiciones son: irradiancia de 800 W/m², 20 °C de temperatura ambiente y velocidad media de 1 m/s, con el módulo en circuito abierto, el viento orientado en paralelo al plano del sistema, y todas las partes del sistema totalmente expuesta al viento.

Tensión o voltaje (*Voltage*)

Se mide en voltios (V), es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Una tensión de 1 voltio hace que circule una corriente de 1 amperio a través de una resistencia de 1 ohmio. La tensión en circuito abierto de una célula fotovoltaica de silicio es de medio voltio, mientras que la tensión nominal de una célula de plomo-ácido es de dos voltios, aproximadamente.

Tensión de circuito abierto (*Open circuit voltage or V_{oc}*)

Tensión máxima producida por una célula, módulo o campo fotovoltaico sin carga conectada, en condiciones STC. Esta tensión aumentará si la temperatura del módulo decrece.

Tensión de trabajo del campo fotovoltaico (*Array operating voltage*)

Tensión producida por un generador fotovoltaico cuando se expone a la luz solar y está conectado a una carga.

Tensión en circuito abierto (*Open circuit voltage or V_{oc}*)

Tensión suministrada por un dispositivo cuando no hay carga (en circuito abierto, sin corriente). Se suele representar como V_{oc} .

Tensión nominal (*Nominal voltage*)

Tensión de referencia utilizada para describir las baterías, módulos o sistemas, como pueden ser las baterías de 12 V o 24 V, módulos de 12 V o 24 V, etc.

Tensión nominal de módulo (*Rated module voltage*)

Tensión de salida de un módulo fotovoltaico medido en condiciones STC. El comportamiento de los módulos fotovoltaico está mejor definido por medio de la tensión en circuito abierto (V_{OC}) y la tensión del punto de máxima potencia (V_{PMP}).

Unión de la célula (*Cell junction*)

Área de contacto inmediato entre las capas positiva (semiconductor tipo p) y negativa (semiconductor tipo n) de una célula fotovoltaica. La unión se encuentra en el centro de la zona de agotamiento (*depletion zone*).

Unión p-n (*p-n junction*)

Transición entre dos capas de material semiconductor, una de ellas tiene carga positiva (semiconductores de tipo p) y otra negativa (semiconductores de tipo n). Aparece un campo eléctrico en la unión p-n que favorece la corriente de los electrones excitados por la luz.

Vatio (W) (*Watt*)

Unidad de potencia eléctrica. Igual a la cantidad de trabajo (Joule) realizado en una unidad de tiempo (segundo). Un amperio de corriente que fluye a un potencial de un voltio produce un vatio de potencia.

Vatio-hora (*Watt-hour or Wh*)

Unidad de medida de energía que relaciona la potencia y el tiempo de consumo o tiempo de generación. Un vatio-hora (Wh) es la cantidad de energía eléctrica consumida por una carga de 1 vatio durante una hora. 1 vatio-hora es equivalente a 3.600 julios ($1 \text{ W} \times 3600 \text{ s}$). El joule es la unidad SI de la energía.

Vatios de pico (*Peak watts or W_p or W_{pk}*)

Potencia que un módulo fotovoltaico produce en condiciones de prueba estándar (STC): radiación de 1.000 W/m^2 , solar de espectro AM 1.5 y temperatura del módulo a 25°C . Véase "potencia de pico".

Voltaje en el punto de máxima potencia o V_{PMP} (*Voltage at Maximum Power Point or V_{MPP}*)

Tensión en la que esta disponible la máxima potencia de un módulo en condiciones STC.

Voltio (V) (*Volt*)

Unidad de medida de la fuerza electromotriz o diferencia de potencial (tensión), que provocará una corriente de un amperio a través de una resistencia de un ohmio.

Watio (W) (*Watt*)

Véase "vatio".

Watio-hora (Wh) (*Watt-hour*)

Véase "vatio-hora".