

3^a
Edición

Miguel Pareja Aparicio

Energía solar fotovoltaica

NUEVAS ENERGÍAS

Cálculo de una
instalación aislada

 **marcombo**
ediciones técnicas

Energía solar fotovoltaica

Acceda a www.marcombo.info
para descargar gratis
contenido adicional
complemento imprescindible de este libro

Código:

SOLAR

Energía solar fotovoltaica

Cálculo de una instalación aislada

Miguel Pareja Aparicio



En la parte inferior de la primera página del libro encontrará el código de acceso que le permitirá acceder de forma gratuita al contenido adicional del libro en

www.marcombo.info

*Energía solar fotovoltaica
Cálculo de una instalación aislada*

Tercera edición, 2016

© 2016 Miguel Pareja Aparicio

© 2016 MARCOMBO, S.A.
Gran Vía de les Corts Catalanes, 594
08007 Barcelona
www.marcombo.com

Diseño de la cubierta: ENEDENÚ DISEÑO GRÁFICO

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de todos los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, incluidos la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución mediante alquiler o préstamo públicos.

ISBN: 978-84-267-2230-0

D.L.: B-16546-2015

Índice

Prólogo a la tercera edición	13
Prólogo a la segunda edición	15
Prólogo	17
Capítulo 1. Conceptos generales de una instalación fotovoltaica aislada	19
1.1. Introducción	19
1.2. Instalación solar fotovoltaica aislada	19
1.3. Módulos fotovoltaicos.....	20
1.3.1. Introducción	20
1.3.2. Tipos de módulos	20
1.3.3. Características eléctricas.....	22
1.3.4. Eficiencia del módulo	25
1.3.5. Factor de forma.....	25
1.3.6. Energía generada por un módulo fotovoltaico	26
1.3.7. Símbolo.....	27
1.3.8. Asociación en serie y en paralelo	27
1.3.9. Ejemplo de cálculo de la energía generada por un campo fotovoltaico.....	31
1.4. Batería	32
1.4.1. Introducción	32
1.4.2. Tipos de baterías	32
1.4.3. Capacidad	34
1.4.4. Profundidad de descarga	36
1.4.5. Vida útil	37
1.4.6. Símbolos	37
1.4.7. Asociación en serie y en paralelo.....	38
1.4.8. Ejemplo de elección de batería.....	42
1.5. Regulador de carga.....	44
1.5.1. Introducción	44
1.5.2. Regulador serie	45

1.5.3. Regulador paralelo	46
1.5.4. Algoritmos de control.....	47
1.5.5. Equipo comercial: características principales	49
1.5.6. Elección del regulador	51
1.5.7. Símbolos	52
1.5.8. Asociación en paralelo	55
1.5.9. Ejemplo de elección de un regulador.....	56
1.6. Convertidor	58
1.6.1. Introducción	58
1.6.2. Instalación fotovoltaica aislada.....	58
1.6.3. Instalación fotovoltaica conectada a la red	59
1.6.4. Datos del equipo comercial.....	60
1.6.5. Rendimiento.....	61
1.6.6. Elección del convertidor.....	61
1.6.7. Símbolos	62
1.6.8. Ejemplo de elección de un convertidor	63
1.7. Convertidor con seguimiento del punto de máxima potencia (PMP).....	65
1.8. Ejercicios propuestos	68
1.9. Actividades propuestas	70

Capítulo 2. Datos para el dimensionado de una instalación 71

2.1. Introducción	71
2.2. Condiciones de uso	71
2.2.1. Obtención del consumo	71
2.2.2. Electrificación de viviendas	73
2.3. Datos climatológicos	74
2.3.1. Horas de pico solar	75
2.3.2. Días de autonomía	76
2.3.3. PVGIS	76
2.4. Ejemplos de viviendas	80
2.4.1. Vivienda de uso permanente I	80
2.4.2. Vivienda de uso permanente II	82
2.4.3. Vivienda de uso en verano I	82

2.4.4. Vivienda de uso en verano II	83
2.4.5. Notas	83
2.5. Ejercicios propuestos	84
2.6. Actividades propuestas	87
Capítulo 3. Dimensionado de la instalación fotovoltaica aislada	89
3.1. Introducción	89
3.2. Métodos de dimensionado	89
3.3. Cálculo de pérdidas de la instalación	92
3.3.1. Cálculo genérico	92
3.3.2. Instalación en tensión continua (12/24/48 V)	93
3.3.3. Instalación en tensión continua (12/24/48 V) y alterna (230V y 50 Hz)	93
3.3.4. Instalación en alterna (230V y 50 Hz).....	94
3.4. Método de Ah	95
3.4.1. Proceso de dimensionado	95
3.4.2. Ejemplo I: instalación de 12 voltios en continua.....	99
3.4.3. Ejemplo II: instalación con receptores de 12 voltios en continua y 230 voltios de alterna.....	102
3.4.4. Ejemplo III: instalación de 230 voltios de alterna	109
3.5. Método IDAE o simplificado.....	116
3.5.1. Proceso de dimensionado	116
3.5.2. Ejemplo.....	118
3.5.3. Tablas del IDAE	119
3.6. Instalación con convertidor de seguimiento del punto de máxima potencia	121
3.6.1. Notas sobre el dimensionado	121
3.6.2. Ejemplo.....	123
3.7. Resumen.....	125
3.7.1. Proceso de dimensionado	125
3.7.2. Ejemplo.....	127
3.8. Ejercicios propuestos	129
3.9. Actividades propuestas	131
Capítulo 4. Sistemas de bombeo fotovoltaico	133
4.1. Introducción	133

4.2. Componentes del sistema de bombeo	133
4.2.1. Topología y componentes	133
4.2.2. Principales características	135
4.3. Dimensionado del sistema de bombeo	139
4.4. Ejemplo de bombeo	143
4.4.1. Obtener energía diaria con prueba de bombeo	143
4.4.2. Obtener potencia del motor	144
4.5. Curva caudal-potencia.....	146
4.6. Conexión del acondicionador de potencia.....	147
4.7. Ejemplo de consumo variable	148
4.8. Ejercicios propuestos	152
4.9. Actividades propuestas	154
Capítulo 5. Cálculos para la colocación de los módulos	155
5.1. Introducción	155
5.2. Orientación e inclinación.....	155
5.2.1. Orientación del módulo fotovoltaico	155
5.2.2. Inclinación	156
5.2.3. Latitud del lugar	157
5.2.4. Cálculo de la inclinación con la base de datos PVGIS.....	159
5.3. Efecto de sombras y distancia mínima entre módulos	160
5.3.1. Proceso de cálculo.....	160
5.3.2. Ejemplo.....	162
5.4. Cálculo de la sombra de un módulo fotovoltaico	162
5.4.1. Proceso de cálculo.....	162
5.4.2. Ejemplo I.....	164
5.4.3. Ejemplo II.....	165
5.5. Pérdidas admisibles.....	166
5.6. Ejercicios propuestos	168
5.7. Actividades propuestas	169
Capítulo 6. Cálculos del cableado de la instalación	171
6.1. Introducción	171
6.2. Cálculo de la sección	171

6.2.1. En corriente continua.....	172
6.2.2. En corriente alterna	174
6.3. Intensidades máximas admisibles.....	175
6.4. Ejemplo de elección del cableado.....	178
6.5. Representación en esquemas	179
6.6. Notas sobre la elección del cable	181
6.6.1. Código de colores.....	181
6.6.2. Cable comercial.....	181
6.6.3. Valores mínimos.....	183
6.6.4. Canalizaciones	183
6.7. Cableado en una vivienda	184
6.8. Ejemplo de cálculo y representación	185
6.9. Conductores enterrados	192
6.10. Ejemplo.....	194
6.11. Ejercicios propuestos	195
6.12. Actividades propuestas	197

Capítulo 7. Protecciones 199

7.1. Introducción	199
7.2. Circuitos de corriente continua.....	199
7.3. Circuitos de corriente alterna a 230 V.....	200
7.4. Dispositivos de protección	200
7.4.1. Introducción	200
7.4.2. Fusibles.....	201
7.4.3. Magnetotérmico	205
7.5. Protecciones en una vivienda	207
7.6. Protección para cargas individuales.....	209
7.7. Toma de tierra.....	210
7.7.1. Introducción	210
7.7.2. Interruptor diferencial.....	211
7.7.3. Instalación de piquetas	212
7.7.4. Instalación de toma de tierra en una instalación fotovoltaica aislada	214
7.8. Ejemplo de cálculo de protecciones.....	215

7.9. Relación entre protección y sección	219
7.9.1. Introducción	219
7.9.2. Ejemplo resuelto	220
7.10. Diodo de bloqueo	225
7.11. Ejercicios propuestos	227
7.12. Actividades propuestas	228
Capítulo 8. Documentación de una instalación fotovoltaica aislada	229
8.1. Introducción	229
8.2. Proyecto	230
8.3. Memoria técnica de diseño	231
8.4. Recepción y pruebas	236
8.5. Contrato de mantenimiento	237
8.6. Actividades propuestas	238
Capítulo 9. Montaje y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas aisladas	239
9.1. Introducción	239
9.2. Montaje de instalaciones fotovoltaicas aisladas	239
9.2.1. Consideraciones previas	239
9.2.2. Montaje de módulos fotovoltaicos	241
9.2.3. Montaje de baterías	245
9.2.4. Montaje de equipos electrónicos en una instalación fotovoltaica aislada	246
9.3. Mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas aisladas	248
9.4. Seguridad de instalaciones fotovoltaicas aisladas	254
9.4.1. Introducción	254
9.4.2. Equipos de protección individual	255
9.4.3. Seguridad durante el montaje	256
9.4.3. Seguridad durante el funcionamiento y la utilización de la instalación	258
9.5. Posibles anomalías/averías en la instalación	259
Apéndice 1. Efecto fotovoltaico, fundamentos de las células fotovoltaicas ...	263
A1.1. Efecto fotovoltaico	263
A1.2. La célula fotovoltaica	266
A1.3. Otros tipos de células fotovoltaicas	271

A1.4. El módulo fotovoltaico.....	274
A1.5. Comportamiento en cualquier condición de temperatura e irradiancia.....	276
A1.6. Protección ante sombreado parcial y total.....	278
Apéndice 2. Fundamentos de las baterías de plomo-ácido	281
A2.1. Desde el punto de vista químico.....	281
A2.2. Desde el punto de vista eléctrico.....	285
A2.3. Curvas de carga y descarga	288
A2.4. Estructura de una batería de plomo-ácido	290
Apéndice 3. Irradiación mensual (Wh/m²)	293
Apéndice 4. Latitud	311
Apéndice 5. Valores de <i>k</i>	313
Bibliografía	315

PRÓLOGO A LA TERCERA EDICIÓN

Tras la alegría de saber que se iba a realizar una segunda edición, me encuentro en la revisión para la elaboración de una tercera edición. Pues sí, suena tan fantástico como es. Solo espero no defraudar a los actuales lectores que utilicen mis textos.

Como toda nueva edición, el lector encontrará una nueva revisión del texto, y la actualización de algunos datos respecto a los nuevos equipos más utilizados en la actualidad. Pero además se han incluido nuevos apartados y nuevos ejemplos, así como una lista de posibles actividades para realizar en clase y ejercicios para resolver al final de cada capítulo.

Por otro lado, algunos lectores deseaban que se ampliara el primer capítulo con más información y conceptos teóricos, aunque he pretendido centrarme en conceptos más específicos para instalaciones fotovoltaicas aisladas, a fin de que no aumentara en demasía la cantidad de páginas. En consecuencia, se han añadido dos nuevos apéndices, que incluyen más información sobre las células y los módulos fotovoltaicos (apéndice 1) y sobre las baterías de plomo-ácido (apéndice 2). Dichos apéndices amplían conceptos incluidos en el capítulo 1, de tal forma que quien desee ampliar dicho campo pueda acceder a un texto adicional, sin sobrecargar con más conceptos el capítulo 1.

Del mismo modo, se ha revisado cada uno de los capítulos para incluir novedades o ampliar los conceptos ya indicados, y se ha aumentado el número de figuras y esquemas para una mejor comprensión de los datos incluidos. También se han incluido comentarios y comparaciones con otros métodos de dimensionado, y recomendaciones a tener en cuenta, para que el propio lector sea consciente de las alternativas y, al mismo tiempo, sea capaz de decidir si tenerlas en cuenta o no. Asimismo, se ha ampliado el tema del bombeo fotovoltaico, dedicándole todo un capítulo.

Al final de cada capítulo se han incluido problemas y actividades para realizar en clase. En particular, se ha propuesto ir incluyendo hojas de cálculo que faciliten el diseño con lo visto en cada capítulo, y finalmente construir nuestra propia herramienta informática de dimensionado. Para ello, y para facilitar la tarea, el lector puede descargarse desde la página web de Marcombo una plantilla para ir incluyendo sus propias fórmulas. También encontrará información

adicional, como las plantillas utilizadas en los capítulos 8 y 9, para cumplimentar la memoria y el plan de mantenimiento.

Finalmente, se ha incluido un último capítulo que hace referencia el montaje y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas aisladas.

PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN

Cuando recibí la noticia de que se iba a realizar una segunda edición, me propuse que no fuera una reimpresión con algunos cambios, sino que fuera mejorada. Siempre me había llamado la atención el texto «Nueva edición corregida y mejorada» en la cubierta de algunos libros.

Con esta premisa me enfrasqué en una nueva lectura, pero pensando en si faltaba comentar alguna cosa, si era conveniente incluir un nuevo ejemplo o nuevas anotaciones.

En este proceso tuve muy en cuenta los comentarios realizados por los lectores que se pusieron en contacto para transmitirme sus impresiones y sugerencias.

Se han incluido más ejemplos con nuevos esquemas aclaratorios, para que el lector se familiarice con diversas variantes que se pueden encontrar a la hora de dimensionar la instalación. Al mismo tiempo se ha aprovechado para realizar una revisión de cada una de las imágenes que forman la obra.

No deja de ser una obra que trata el tema de forma teórica, que explica cómo es todo el proceso de cálculo y de dónde se obtiene cada uno de los valores utilizados en cada ecuación. Por ello, se ha pretendido dar un enfoque lo más práctico posible y ello se consigue mediante la resolución de ejemplos que se asemejen a posibles problemas que se van encontrando en un caso real.

Del mismo modo, se ha utilizado un proceso secuencial. Se van incluyendo, conforme van pasando los capítulos, nuevas situaciones o cuestiones a tener en cuenta en el proceso de dimensionado, hasta elegir cada uno de los componentes que forman una instalación solar fotovoltaica aislada.

Con el fin de simplificar el proceso de cálculo, se han introducido nuevas ecuaciones para que sean más aclaratorias. Es decir, lo que en otras documentaciones se realiza en un paso, en este libro se muestra en dos o tres pasos para que el lector pueda comprender cada paso a realizar y así posteriormente pueda resolver cualquier cálculo relacionado con una instalación fotovoltaica aislada. En consecuencia, los nombres indicados en cada una de las variables se han realizado para que se asemejen lo máximo posible al valor al que hacen referencia, aunque para esta segunda edición se han revisado algunas variables que podían inducir a error.

Del mismo modo, se ha tratado que cada ejemplo mostrado no sea igual a los anteriores; claramente son parecidos, pero en cada uno de ellos se incluye algún aspecto o problema con el que se puede encontrar a la hora de dimensionar una instalación.

No me queda más que dar las gracias a todas aquellas personas que han hecho posible que estas líneas vean la luz. Así como a cada una de las personas que adquirió algún ejemplar.

Agradezco a toda mi familia su apoyo y el permitirme dedicar este tiempo a difundir el conocimiento, que es nuestro bien más preciado.

PRÓLOGO

¿Se ha preguntado alguna vez qué es una instalación fotovoltaica aislada?; ¿qué se necesita en una instalación fotovoltaica?; ¿cuántos módulos fotovoltaicos se necesitan?; ¿por qué se plantan los módulos de lado?, etcétera.

Pues todo esto es lo que encontrará en esta obra: la descripción básica de una instalación, los elementos que la constituyen, cómo elegirlos, el cálculo de la sección y la elección de los dispositivos de protección. Aunque presenta cierta carga matemática, se incluye una gran cantidad de ejemplos reales que pueden ser de utilidad para la comprensión de los procesos de cálculo.

Esta obra se ha creado con un fin muy directo: que sea, por una parte, completa (para que el lector no tenga que realizar ninguna búsqueda adicional) y, por otra, escueta (que vaya directo al grano sin entrar en largas definiciones ni grandes desarrollos teóricos).

En consecuencia, se decidió dedicarla solamente a las instalaciones fotovoltaicas aisladas, puesto que hay una gran cantidad de libros en el mercado sobre energías renovables o energía solar, en los cuales solo se incluye, como mucho, un capítulo dedicado al dimensionado, que lo describe de forma muy genérica.

Se ha incluido información sobre el cálculo de la sección de los conductores y la elección de los elementos de protección. Cuestiones con las que el instalador debe estar familiarizado, pero sobre las que, al tratarse de una instalación un poco especial, puede tener ciertas dudas.

La obra va dirigida a cualquier técnico, estudiante o profesional que comience a familiarizarse con las instalaciones fotovoltaicas aisladas. También puede ser de gran utilidad para la implantación de cursos de formación continua u ocupacional relacionados con la energía solar o las energías renovables.

CAPÍTULO 1

Conceptos generales de una instalación fotovoltaica aislada

1.1. Introducción

Antes de proceder a los cálculos de una instalación solar aislada, se ha incluido este capítulo con la intención de implementar los conceptos básicos sobre lo que se conoce como instalación fotovoltaica aislada.

Se comentan los componentes principales y su función, además de los datos necesarios que se extraen de las hojas de características, para realizar posteriormente los cálculos.

Este capítulo es una mera introducción para aquellos técnicos, o futuros técnicos, que requieran realizar los cálculos de una instalación solar fotovoltaica aislada.

1.2. Instalación solar fotovoltaica aislada

Un sistema fotovoltaico aislado o autónomo es un sistema auto-abastecedor, ya que aprovecha la irradiación solar para generar la energía eléctrica necesaria en el suministro de una instalación (vivienda, pozo, sistema de riego, sistema de telecomunicación, etcétera).

Para entenderlo mejor, en la figura 1.1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico, formado por:

- El **generador fotovoltaico**, que proporciona la tensión/corriente encargada de mantener la carga de la batería.
- La **batería**, que será la encargada de proporcionar energía a la instalación, cuando la irradiación solar sea escasa o nula.
- El **regulador**, que se encarga del control del estado de la carga de la batería, adaptando los diferentes ritmos de producción y la demanda de energía.
- El **suministro**, que hace referencia a la instalación que debe alimentar el sistema fotovoltaico.

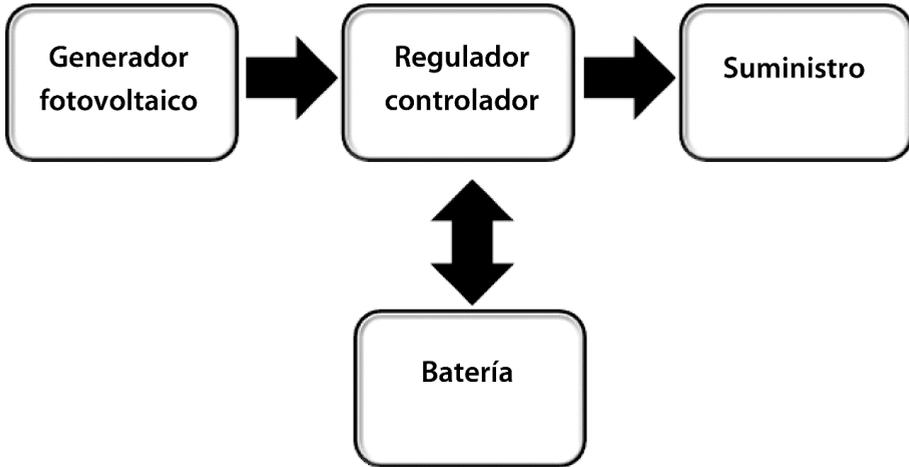


Figura 1.1. Sistema aislado fotovoltaico

1.3. Módulos fotovoltaicos

1.3.1. Introducción

Denominado *panel solar* o *módulo fotovoltaico*, su principal función es la de proporcionar energía a la instalación a partir de la irradiación solar, aprovechando el efecto fotoeléctrico.

Un módulo fotovoltaico está formado por la interconexión de varias células solares en serie y/o en paralelo, para adaptar el módulo a los niveles de tensión y corriente, puesto que cada célula puede suministrar unos 0,5 voltios. Para los módulos solares de uniones de silicio y con conexiones de células en serie, los valores de tensión por número de células rondan las 36 células para 12 voltios y las 72 células para 24 voltios.

1.3.2. Tipos de módulos

Las células solares, o células fotovoltaicas, más utilizadas son las formadas por una unión *P-N* y construidas con silicio monocristalino y policristalino.

Las células se fabrican mediante la cristalización del silicio, por lo que se encuentran tres tipos principales de módulos (los más utilizados):

- **Monocristalino:** presenta una estructura cristalina completamente ordenada. Se obtiene de silicio puro fundido dopado con boro. Se reconoce por su monocromía azulada oscura y metálica (figura 1.2).

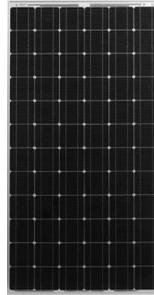


Figura 1.2. Panel solar de silicio monocristalino

- **Policristalino:** presenta una estructura ordenada por regiones separadas. Las zonas irregulares se traducen en una disminución del rendimiento. Se obtiene de la misma forma que el monocristalino, pero con menos fases de cristalización (combinación de átomos). Se reconoce porque en su superficie se distinguen distintos tonos de azules y grises metálicos (figura 1.3).

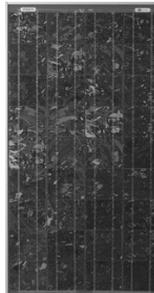


Figura 1.3. Panel solar de silicio policristalino

- **Amorfo:** presenta un alto grado de desorden y un gran número de defectos estructurales en su combinación química. Su proceso de fabricación es menos costoso que los anteriores (se deposita en forma de lámina delgada sobre vidrio o plástico). Tiene un color homogéneo.

El uso de células de tipo amorfo permite adaptarse a cualquier superficie, son de varios colores y translúcidas. Esta última característica favorece la integración en acristalamientos. En su contra, la potencia que se obtiene es inferior a las células que utilizan silicio monocristalino o policristalino. Este tipo se cataloga dentro de las denominadas *de película delgada*.

Los módulos fotovoltaicos con células de tipo amorfo se utilizan en instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, ya que permiten una mayor integración arquitectónica en viviendas y edificios.

Las más utilizadas en instalaciones aisladas han sido las de silicio monocristalino, por ofrecer una mejor eficiencia, aunque el aumento de la eficiencia de las células de silicio policristalino a un menor coste se ha traducido en un aumento de su utilización, siendo actualmente más utilizadas que las de silicio monocristalino. También se utilizan en instalaciones solares conectadas a la red, como los denominados *huertos solares*.

También existe otro tipo de células que son menos utilizadas: arseniuro de galio (GaAs), telurio de cadmio (CdTe) o seleniuro de cobre e indio (CuInSe₂). En el apéndice 1 se ha dedicado un apartado a este tipo de células. Actualmente, el instalador encontrará en el mercado, principalmente, módulos fotovoltaicos constituidos por células de silicio policristalino o monocristalino.

1.3.3. Características eléctricas

Para la realización de los cálculos se deben tener en cuenta las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos. Es decir, que los datos se extraen de sus hojas de características.

Para ello, hay que consultar la denominada *curva I-V*, ya que representa la relación entre la corriente y la tensión entregada del módulo a partir de unos valores de irradiación, o, en su defecto, se indicarán ciertos parámetros que sirven para definirla. Los parámetros que definen la curva I-V son:

- **Intensidad de cortocircuito:** denominada I_{SC} , es la máxima intensidad que se puede obtener en un panel o módulo fotovoltaico. Se calcula midiendo la corriente entre los bornes del panel cuando se provoca un cortocircuito (tensión de salida de 0 voltios).
- **Tensión en circuito abierto:** denominada V_{OC} , es el valor máximo de voltaje que se mediría en un panel o módulo si no hubiese paso de corriente entre los bornes del mismo (intensidad de 0 amperios).
- **Tensión nominal:** denominada V_n , es el valor de diseño al que trabaja el módulo fotovoltaico. Por ejemplo: 12, 24 o 48 voltios.
- **Potencia máxima:** denominada P_M , es el valor máximo de potencia que se obtiene entre el producto de la corriente por la tensión de salida del módulo fotovoltaico. Se trata del valor

máximo que se puede obtener del módulo fotovoltaico. También se denomina *potencia de pico* del módulo; este último término es el más utilizado para los cálculos de una instalación conectada a la red.

- **Tensión máxima:** denominada V_M , corresponde al valor de tensión para la potencia máxima. Se trata aproximadamente del 80% de la tensión en circuito abierto. En algunos casos se indica como V_{mp} (de potencia máxima).
- **Corriente máxima:** denominada I_M , corresponde al valor de corriente para la potencia máxima. En algunos casos se indica como I_{mp} .

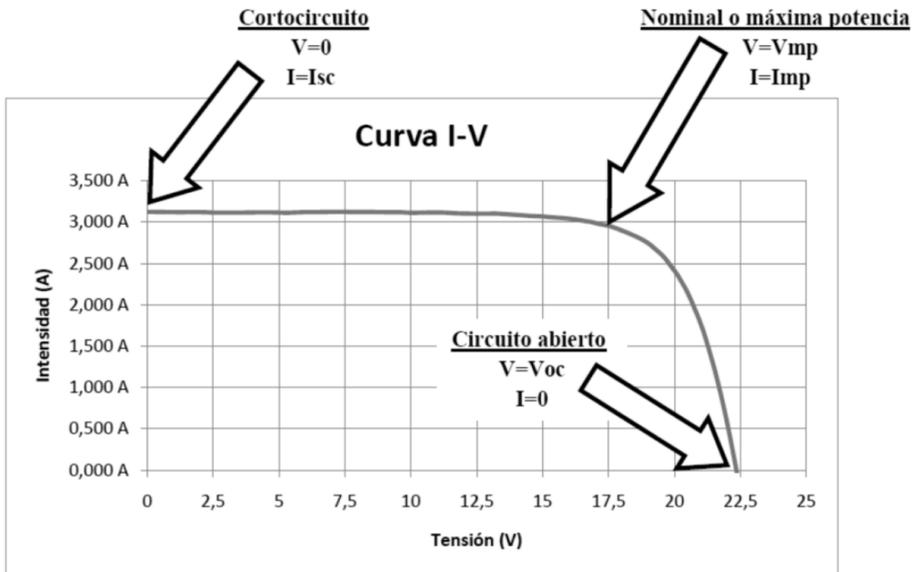


Figura 1.4. Curva I-V de un panel fotovoltaico

Potencia máxima (P_M)	50 W
Corriente máxima potencia (I_M)	2,9
Tensión máxima potencia (V_M)	17,4
Corriente en cortocircuito (I_{SC})	3,12 A
Tensión en circuito abierto (V_{OC})	22,3 V

Tabla 1.1. Valores de la curva I-V de la figura 1.4

En la figura 1.4 se muestran las indicaciones de los parámetros descritos indicados sobre la curva I-V. De igual forma, en la tabla 1.1 se

Energía solar fotovoltaica

muestran los valores de dichos parámetros. Así, cuando se consulte la documentación de un módulo fotovoltaico se podrán encontrar los datos de una u otra manera o, incluso, de ambas.

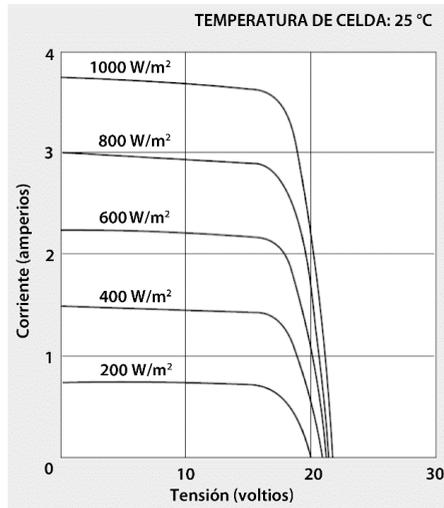


Figura 1.5. Curva I-V con variaciones de irradiación

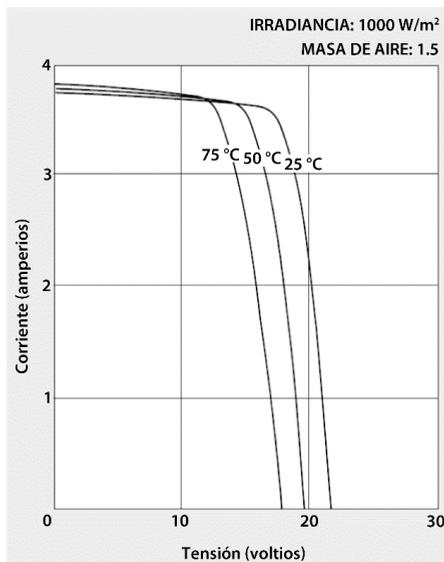


Figura 1.6. Curva I-V con variación de temperatura

La gráfica representada en la figura 1.4 está tomada para valores estándar, es decir, los valores pueden ser distintos en función de la

irradiación solar, puesto que la corriente generada va directamente relacionada con la irradiación solar (figura 1.5). Sucede lo mismo con las variaciones de temperatura, pero estas influyen sobre el punto de potencia máxima (P_M), la tensión máxima (V_M) y la tensión en circuito abierto (V_{OC}). Dichos valores disminuyen ante el aumento de temperatura (figura 1.6).

Los valores que se indican en la curva I-V se obtienen sometiendo el módulo fotovoltaico a unas condiciones específicas, denominadas *condiciones estándar de medida* (CEM).

Las CEM quedan definidas por los siguientes valores:

- **Irradiación:** 1000 W/m².
- **Temperatura de célula:** 25 °C.
- **Incidencia normal** (perpendicular a la superficie).
- **Espectro radiante o masa de aire o distribución espectral:** AM 1,5.

1.3.4. Eficiencia del módulo

La eficiencia es el cociente entre la potencia eléctrica producida por el módulo y la irradiación incidente sobre el mismo. Es decir, es el cociente entre la potencia máxima (P_M) y la potencia luminosa (P_L) recibida por la célula, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{V_M \cdot I_M}{P_L}$$

En la tabla 1.2 se muestran los valores medios de eficiencia con relación al material con el que se ha fabricado el módulo fotovoltaico.

Tecnología	Eficiencia (%)
<i>Silicio monocristalino</i>	15-18
<i>Silicio policristalino</i>	13-15
<i>Silicio amorfo</i>	10

Tabla 1.2. Relación entre el material y la eficiencia del módulo fotovoltaico

1.3.5. Factor de forma

Si la curva I-V fuera ideal se trataría de un rectángulo, pero debido a las pérdidas por la resistencia interna del módulo, la influencia de la temperatura, etc., la potencia va disminuyendo. Este efecto se define con el factor de forma (F_F).

Energía solar fotovoltaica

El factor de forma relaciona la tensión y la corriente máxima con la corriente en cortocircuito y la tensión en circuito abierto, como se indica en la siguiente ecuación:

$$F_F = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

Sabiendo que la potencia máxima es el producto de la tensión máxima y la corriente máxima, y despejando dicho término, se obtiene la ecuación que relaciona la corriente en cortocircuito y la tensión en circuito abierto con el factor de forma para obtener la potencia máxima, como se indica en la siguiente ecuación:

$$P_M = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot F_F$$

1.3.6. Energía generada por un módulo fotovoltaico

Para el cálculo se debe tener en cuenta la energía que genera un módulo fotovoltaico ($E_{Módulo}$) durante un día. Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{Módulo} = I_{Módulo} \cdot HPS \cdot \eta_{Módulo} [Ahd]$$

En donde $I_{Módulo}$ corresponde a la corriente de pico o corriente máxima, HPS corresponde a las horas de pico solar (horas de suficiente irradiación solar) y $\eta_{Módulo}$ corresponde al rendimiento de la conversión eléctrica del módulo fotovoltaico. El $\eta_{Módulo}$ relaciona la energía que realmente se genera $E_{Módulo}$ y la que se generaría en condiciones estándar de medida, mediante el producto de la intensidad máxima en condiciones estándar de medida y el número de horas de pico solar; es decir, la energía que se generaría según las características eléctricas y la que realmente se genera.

En el rendimiento del módulo se pueden escoger valores típicos entre el 85% y el 95%. Como norma general se escoge un rendimiento general del 90%, por lo que se multiplica por 0,9, quedando la ecuación como:

$$E_{Módulo} = 0,9 \cdot I_{Módulo} \cdot HPS [Ahd]$$

Para el cálculo de la energía generada por un campo fotovoltaico ($E_{campo_fotovoltaico}$) se tendría en cuenta la corriente generada por todo el campo fotovoltaico o generador fotovoltaico ($I_{campo_fotovoltaico}$), quedando la ecuación como:

$$E_{\text{campo_fotovoltaico}} = 0,9 \cdot I_{\text{campo_fotovoltaico}} \cdot HPS [Ahd]$$

La corriente del campo fotovoltaico o generador fotovoltaico se calcularía mediante el valor de la corriente de pico o corriente máxima, tras la asociación de todos los módulos fotovoltaicos que forman la instalación (véase el apartado 1.3.8).

1.3.7. Símbolo

El símbolo de una célula solar o de un módulo fotovoltaico se puede encontrar representado como en la figura 1.7, donde se indica el sentido de la corriente eléctrica generada (I), así como la polaridad de las conexiones.

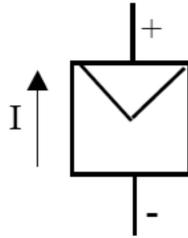


Figura 1.7. Símbolo utilizado para una celda o módulo fotovoltaico

1.3.8. Asociación en serie y en paralelo

En la mayoría de las instalaciones, dependiendo de la potencia de la instalación, será necesario asociar varios módulos en serie o en paralelo para obtener los niveles de tensión y corriente adecuados.

Nota: Como norma general no se conectarán entre sí módulos de distintas características y, en la medida de lo posible, serán del mismo fabricante.

Para la asociación de módulos fotovoltaicos hay tres posibilidades:

- **Conexión en paralelo:** se conectan todos los polos positivos y, por separado, todos los polos negativos. Con ello se consigue aumentar la corriente generada y mantener un mismo valor de tensión. La corriente generada es igual a la suma de todas las corrientes generadas por cada módulo o, lo que es lo mismo, al producto de la corriente generada por un módulo por el número de módulos (se supone que tienen las mismas características). Se muestra un ejemplo en la figura 1.8, con cuatro módulos fotovoltaicos de 12 voltios y 1 amperio

conectados en paralelo, para suministrar 12 voltios y 4 amperios.

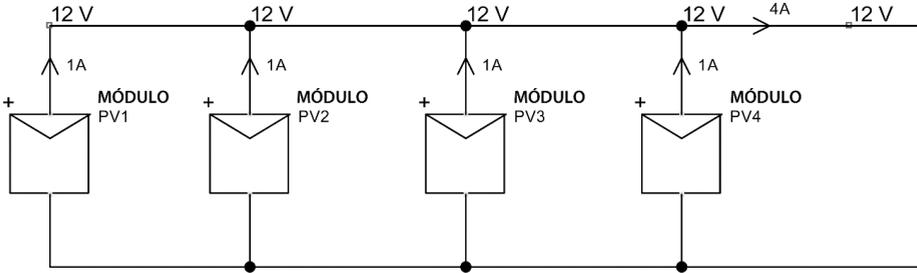


Figura 1.8. Conexión en paralelo de módulos fotovoltaicos

- **Conexión en serie:** se conecta un polo positivo de un módulo negativo con el polo negativo del siguiente. Con ello se consigue aumentar la tensión y mantener el mismo valor de corriente generada. La tensión generada es igual a la suma de todas las tensiones por cada módulo o, lo que es lo mismo, al producto de la tensión de un módulo por el número de módulos (ya que se supone que tienen las mismas características). Se muestra un ejemplo en la figura 1.9, con dos módulos fotovoltaicos de 12 voltios y 1 amperio conectados en serie, para suministrar 24 voltios y 1 amperio.

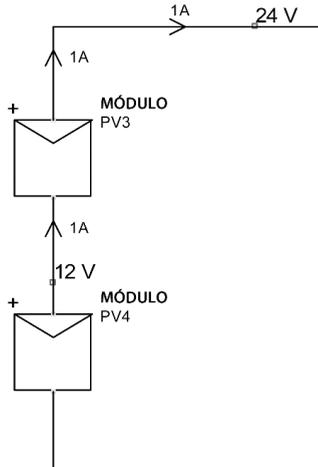


Figura 1.9. Conexión en serie de módulos fotovoltaicos

- **Conexión mixta:** se encuentran asociados tanto en serie como en paralelo. Se muestra un ejemplo en la figura 1.10, con cuatro módulos fotovoltaicos de 12 voltios y 1 amperio conectados en dos ramas de dos módulos en serie, para suministrar 24 voltios y 2 amperios.

Nota: Cuando en este apartado se habla de *tensión*, se hace referencia a la tensión nominal del módulo fotovoltaico.

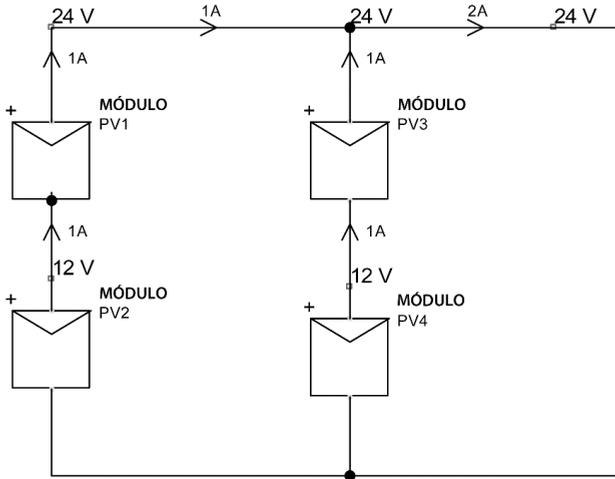


Figura 1.10. Conexión mixta de módulos fotovoltaicos

Cuando se conecta un conjunto de módulos fotovoltaicos en serie para conseguir un valor de tensión, dicho conjunto se suele denominar *rama*. Después, para conseguir el valor requerido de corriente se conectan tantos grupos en serie (ramas) como sea necesario.

En una instalación de varios módulos fotovoltaicos, el conjunto de todos los módulos se denomina *campo fotovoltaico* o *campo generador*.

Cuando se tiene que representar una cantidad elevada de módulos fotovoltaicos, se incluye el símbolo del primero y del último (son símbolos iguales diferenciados por las referencias) y se unen mediante una línea discontinua. Por ejemplo, si se desea representar 10 módulos fotovoltaicos en serie (recordemos que en la asociación los módulos deben ser de las mismas características) con las referencias: *PV1*, *PV2*, *PV3*, *PV4*, *PV5*, *PV6*, *PV7*, *PV8*, *PV9* y *PV10*, se representa con dos símbolos: uno con la referencia *PV1* y otro con la referencia *PV10*, y la unión que se realizaba mediante una línea continua (indica la conexión eléctrica) se sustituye por