

Módulo y Generador

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro
<http://oscarperpinan.github.io>

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

- Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales.

- ▶ Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales.
- ▶ Es necesario realizar **agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas.**

Módulo Fotovoltaico

- ▶ Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales.
- ▶ Es necesario realizar **agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas**.
- ▶ Un **módulo fotovoltaico** es una **asociación de células** a las que **protege de la intemperie**, las **aisla eléctricamente** del exterior dando **rigidez mecánica** al conjunto.

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

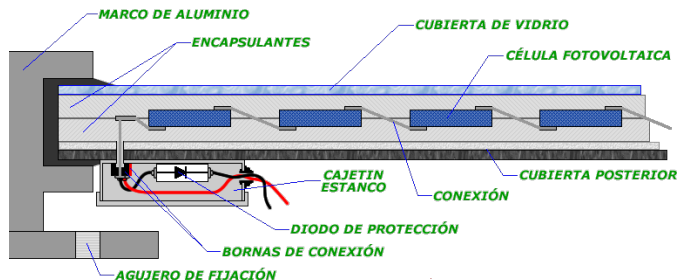
Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

- ▶ Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales.
- ▶ Es necesario realizar **agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas**.
- ▶ Un **módulo fotovoltaico** es una **asociación de células** a las que **protege de la intemperie**, las **aisla eléctricamente** del exterior dando **rigidez mecánica** al conjunto.
- ▶ Existen multitud de módulos diferentes, tanto por su configuración eléctrica como por sus características estructurales y estéticas.

Estructura de un módulo fotovoltaico



- ▶ La asociación de células es encapsulada en **dos capas de EVA** (etileno-vinilo-acetato), entre una **lámina frontal de vidrio** y una **capa posterior** de un polímero termoplástico (frecuentemente se emplea el **tedlar**).
- ▶ Este conjunto es enmarcado en una **estructura de aluminio anodizado** con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica del conjunto y facilitar el anclaje del módulo a las estructuras de soporte.

El vidrio frontal

- ▶ Debe tener y mantener una **alta transmisividad** en la banda espectral en la que trabajan las células solares.

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

El vidrio frontal

- ▶ Debe tener y mantener una **alta transmisividad** en la banda espectral en la que trabajan las células solares.
- ▶ Debe tener buena **resistencia al impacto y a la abrasión**.

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

El vidrio frontal

- ▶ Debe tener y mantener una **alta transmisividad** en la banda espectral en la que trabajan las células solares.
- ▶ Debe tener buena **resistencia al impacto y a la abrasión**.
- ▶ Su superficie debe ser de forma que combine un **buen comportamiento antireflexivo** con la **ausencia de bordes o desniveles** que faciliten la acumulación de suciedad o dificulten la limpieza de ésta mediante la acción combinada del viento y la lluvia.

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

El vidrio frontal

- ▶ Debe tener y mantener una **alta transmisividad** en la banda espectral en la que trabajan las células solares.
- ▶ Debe tener buena **resistencia al impacto y a la abrasión**.
- ▶ Su superficie debe ser de forma que combine un **buen comportamiento antirreflexivo** con la **ausencia de bordes o desniveles** que faciliten la acumulación de suciedad o dificulten la limpieza de ésta mediante la acción combinada del viento y la lluvia.
- ▶ Frecuentemente se emplea **vidrio templado con bajo contenido en hierro con algún tipo de tratamiento antirreflexivo**.

- ▶ El **encapsulante a base de EVA**, combinado con un tratamiento en vacío y las capas frontal y posterior, **evita la entrada de humedad** en el módulo, señalada como la causa principal de la degradación a largo plazo de módulos fotovoltaicos.
- ▶ Además, esta combinación permite obtener **altos niveles de aislamiento eléctrico**.

- ▶ Una **configuración eléctrica muy común** hasta hace unos años empleaba **36 células en serie** para obtener módulos con potencias comprendidas en el rango 50 Wp – 100 Wp con tensiones en MPP cercanas a los 15 V en funcionamiento.
- ▶ Estos módulos eran particularmente adecuados para su acoplamiento con baterías de tensión nominal 12 V en los sistemas de electrificación rural.
- ▶ Con el protagonismo abrumador de los sistemas fotovoltaicos de conexión a red, esta configuración ha perdido importancia. Ahora son frecuentes los módulos de potencia superior a los 200 Wp y tensiones en el rango 30 V – 50 V.

- ▶ Para los módulos compuestos por **células de silicio cristalino** es de aplicación la **norma internacional IEC-61215** «Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval».
- ▶ Esta norma internacional recoge los **requisitos de diseño y construcción** de módulos fotovoltaicos terrestres apropiados para su operación en períodos prolongados de tiempo bajo los efectos climáticos.
- ▶ Detalla un **procedimiento de pruebas** a los que se debe someter el módulo que desee contar con la certificación asociada a esta normativa

Módulo Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Suposiciones del modelo

- Los efectos de la resistencia paralelo son despreciables

$$I = I_{sc} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + I \cdot R_s}{V_t}\right)\right)$$

Suposiciones del modelo

- ▶ Los efectos de la resistencia paralelo son despreciables
- ▶ La corriente fotogenerada (I_L) es igual a la corriente de cortocircuito

$$I = I_{sc} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + I \cdot R_s}{V_t}\right)\right)$$

Suposiciones del modelo

- ▶ Los efectos de la resistencia paralelo son despreciables
- ▶ La corriente fotogenerada (I_L) es igual a la corriente de cortocircuito
- ▶ En cualquier condición de operación $\exp(\frac{V+I \cdot R_s}{V_t}) \gg 1$

$$I = I_{sc} \cdot (1 - \exp(\frac{V - V_{oc} + I \cdot R_s}{V_t}))$$

Efecto de la radiación y la temperatura

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- La **corriente de cortocircuito** depende exclusivamente y de forma lineal de la **irradiancia**.

$$I_{sc} = G_{ef} \cdot \frac{I_{sc}^*}{G^*}$$

- La **tensión de circuito abierto** depende exclusivamente de la **temperatura de célula**, y decrece linealmente con ella.

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}^* + (T_c - T_c^*) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT_c}$$

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Temperatura de operación de célula

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- La **temperatura de operación de la célula** depende de la **temperatura y la irradiación**

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

- Como consecuencia, la **eficiencia decrece** a razón de 0,5% por grado centigrado.
- La **resistencia serie** es **independiente** de las condiciones de operación.

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

- ▶ Temperatura que alcanza una *célula* cuando su *módulo* trabaja en las siguientes condiciones:
 - ▶ Irradiancia: $G = 800 \text{ W m}^{-2}$
 - ▶ Espectro: el correspondiente a $AM = 1.5$.
 - ▶ Incidencia normal
 - ▶ Temperatura *ambiente*: $T_a = 20^\circ\text{C}$.
 - ▶ Velocidad de viento: $v_v = 1 \text{ m s}^{-1}$.

Módulo Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Punto caliente

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

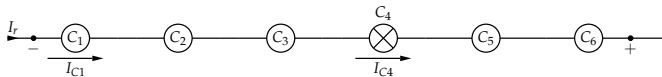
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Punto caliente

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

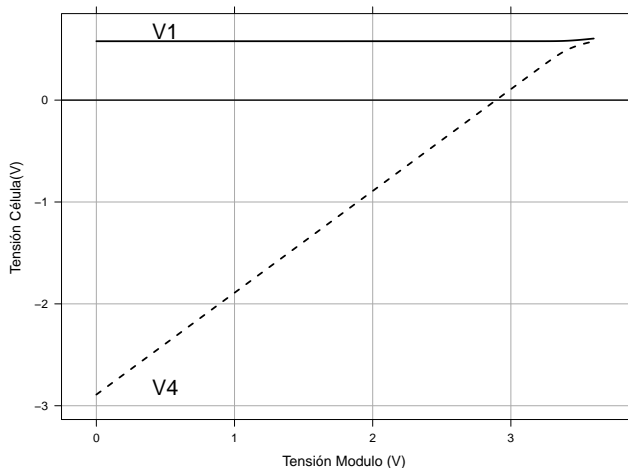
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Punto caliente

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

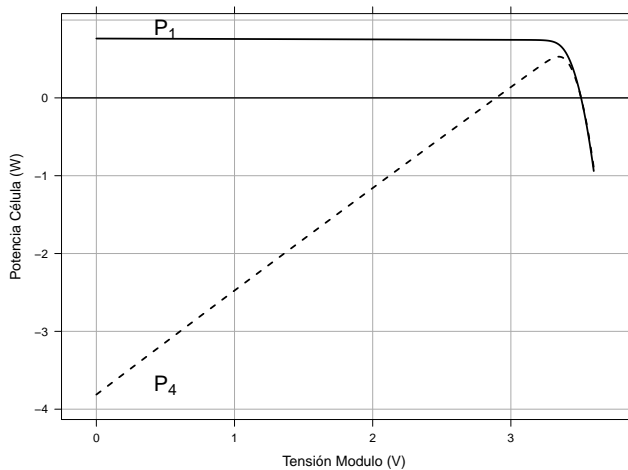
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Diodo de paso

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

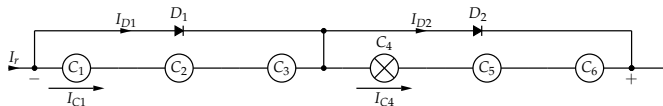
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Curvas I-V con diodo de paso

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

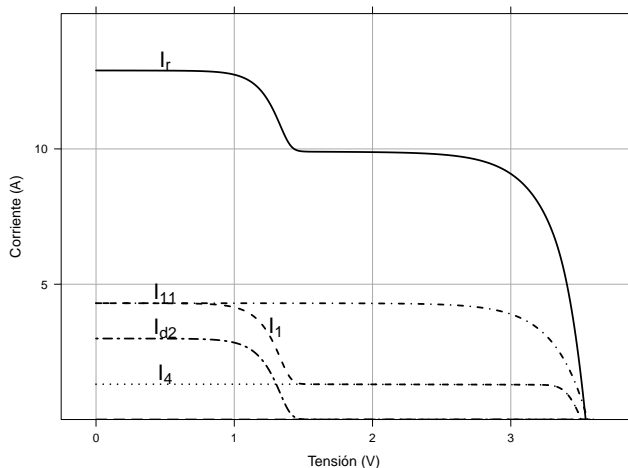
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Tensión con diodo de paso

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

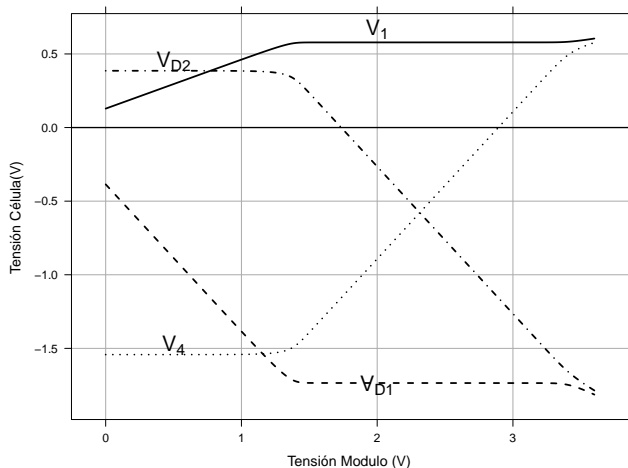
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Curvas Potencia con diodo de paso

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

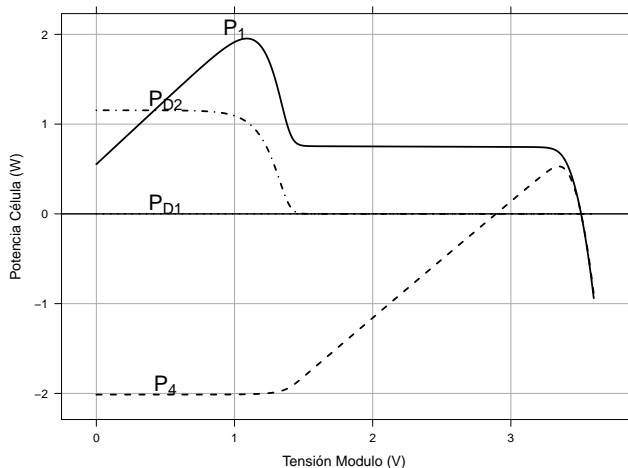
Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Curva Módulo con Diodos de Paso

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro

[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

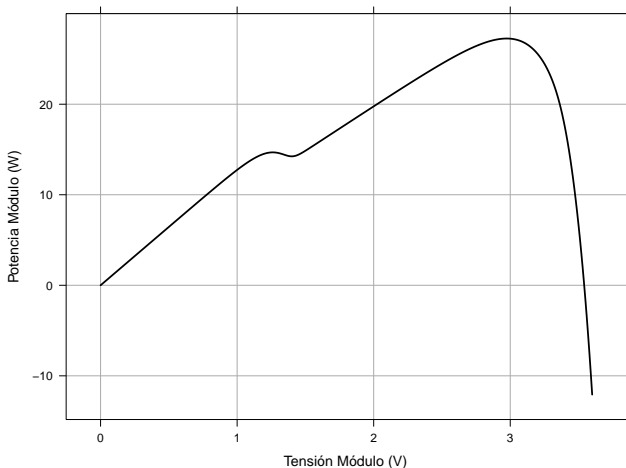
Introducción

Modelado de un módulo

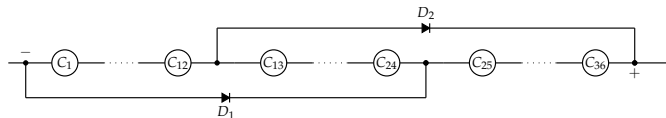
Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Diodos de paso



Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Introducción

Modelado de un módulo

Punto Caliente

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Generador Fotovoltaico

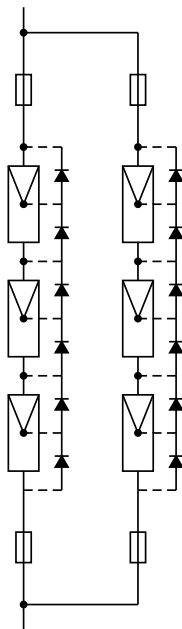
Definición

Pérdidas por dispersión

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Generador Fotovoltaico

- Un generador fotovoltaico es una **asociación eléctrica de módulos fotovoltaicos** para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de una aplicación determinada.



Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

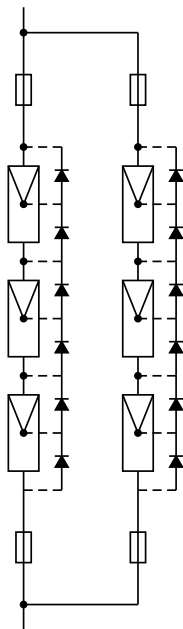
Generador
Fotovoltaico

Definición
Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Generador Fotovoltaico

- ▶ Un generador fotovoltaico es una **asociación eléctrica de módulos fotovoltaicos** para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de una aplicación determinada.
- ▶ Se compone de un total de $N_T = N_p \cdot N_s$ módulos, siendo N_p el número de ramas (módulos en paralelo), y N_s el número de módulos en cada serie.



Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición
Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Ramas y series

- El número de ramas, N_p , define la corriente total del generador

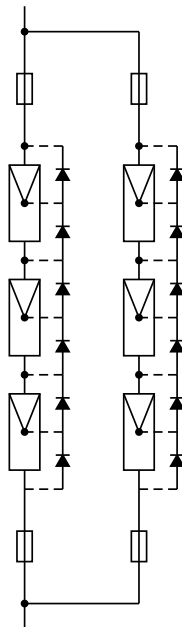
$$I_{sc,g} = N_p \cdot I_{sc,m}$$

- El número de módulos en serie, N_s , define la tensión del generador.

$$V_{oc,g} = N_s \cdot V_{oc,m}$$

- La potencia del generador es (idealmente):

$$P_g = N_T \cdot P_m = (N_s \cdot V_{mpp,m})(N_p \cdot I_{mpp,m})$$



Ejemplo de cálculo

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Calcular el comportamiento eléctrico de un generador fotovoltaico constituido por 40 módulos, asociados en 4 ramas, bajo la suposición de factor de forma constante.

- ▶ Las condiciones de operación de este generador son:
 $G_{ef} = 700 \text{ W/m}^2$ y $T_a = 34^\circ\text{C}$.
- ▶ De las fichas técnicas del módulo se extrae la siguiente información: $I_{sc}^* = 3 \text{ A}$, $V_{oc}^* = 19,8 \text{ V}$, $I_{mpp}^* = 2,8 \text{ A}$ y $V_{mpp}^* = 15.7 \text{ V}$.
- ▶ Cada módulo está constituido por 33 células asociadas en serie. La TONC del módulo es de 43°C .

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición

Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Generador Fotovoltaico

Definición

Pérdidas por dispersión

Ejemplos de generadores fotovoltaicos

Pérdidas por dispersión

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición

Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Definición del problema

Los parámetros eléctricos de un módulo FV presentan dispersión: la producción energética será menor que la ideal.

Distribución de valores de corriente y tensión

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

La corriente de máxima potencia de un conjunto de módulos puede caracterizarse por una distribución tipo Weibull

$$f(I_{mpp}) = \alpha \beta^{-\alpha} I_{mpp}^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{I_{mpp}}{\beta} \right)^{\alpha} \right]$$

siendo α el factor de forma y β el factor de escala de la distribución. La eficiencia de conexión serie es:

$$\eta_{cs} = \frac{I_{mpp}^r}{\overline{I_{mpp}}}$$

siendo I_{mpp}^r la corriente de la rama, y $\overline{I_{mpp}}$ la media de las corrientes del grupo de módulos.

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición
Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

- A partir de la distribución y la definición de eficiencia de conexión serie puede deducirse que ésta se calcula mediante

$$\eta_{cs} = N^{-\frac{1}{\alpha}}$$

siendo N el número de módulos en la serie. Por tanto, **la eficiencia disminuye si aumenta N**. Asimismo, la eficiencia aumenta con α .

- Por otra parte, puede demostrarse que la **tensión de un grupo de módulos** puede modelarse mediante una función **gaussiana** y que **la dispersión de valores de tensión es suficientemente baja para poder considerar que la eficiencia de conexión de ramas en paralelo es igual a 1**.

Clasificación de módulos

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ La dispersión de un conjunto depende inversamente del valor de α , así que un **método para reducir las pérdidas por dispersión** consiste en **realizar clasificaciones** de los módulos atendiendo a sus valores reales de corriente.
- ▶ En sistemas de cierta entidad, puede ser conveniente realizar una clasificación en tres categorías y crear cada rama con módulos de una misma categoría.
- ▶ Este método puede suponer reducciones del 2-3% en las pérdidas globales del sistema.

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición
Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Pérdidas por dispersión

Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Problema

- ▶ Las clasificaciones se realizan en base a las métricas realizadas por los fabricantes con «flash».
- ▶ **La indeterminación asociada a este método en relación a las medidas a sol real son del mismo rango que la separación entre categorías.**

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Definición

Pérdidas por dispersión

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos

Módulo Fotovoltaico

Generador Fotovoltaico

Ejemplos de generadores fotovoltaicos



Módulo y
Generador

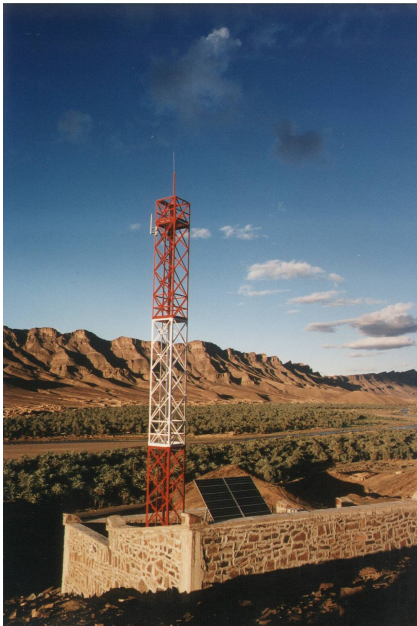
Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos





Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos







Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos



Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos







Módulo y
Generador

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Módulo
Fotovoltaico

Generador
Fotovoltaico

Ejemplos de
generadores
fotovoltaicos