

# Configuración Eléctrica del Generador FV en un SFCR

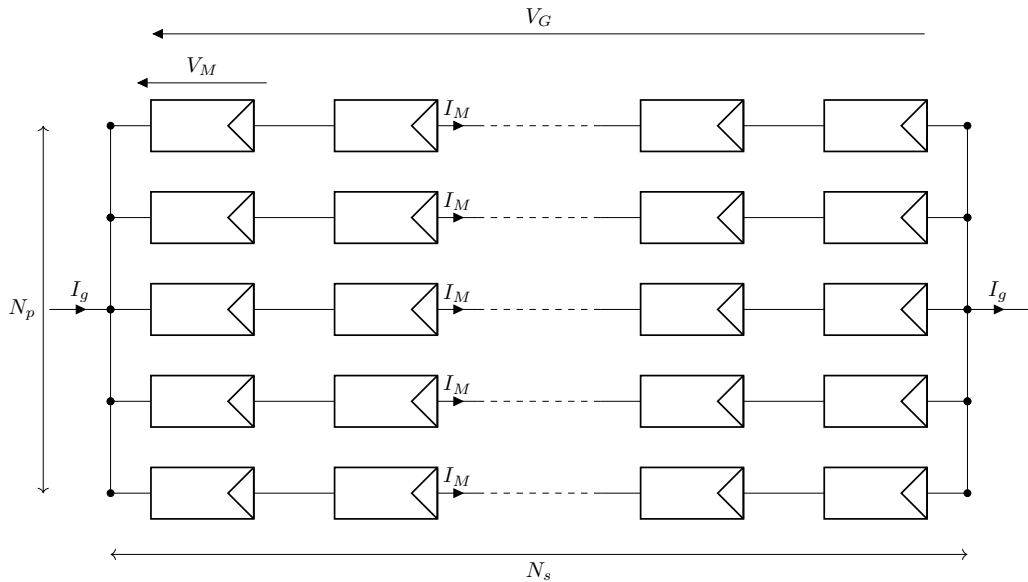
## Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

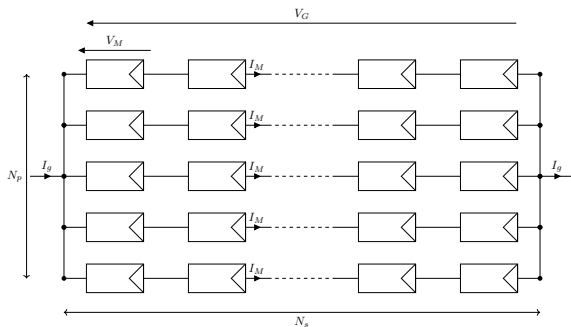
Universidad Politécnica de Madrid

① Configuración Eléctrica del Generador

② Cableado Eléctrico



# Planteamiento



- **Objetivo:** determinar número de módulos en serie ( $N_s$ ) y ramas en paralelo ( $N_p$ ).
- No tomamos en cuenta dispersión de parámetros: todos los módulos tienen la **misma tensión** ( $V_M$ ) y la **misma corriente** ( $I_M$ ).

$$V_G = N_s \cdot V_M$$

$$I_G = N_p \cdot I_M$$

## Modulos en serie

- ▶ El inversor está diseñado para soportar una **tensión máxima en la entrada**,  $V_{max,inv}$ . Superarla puede conllevar la **avería** del equipo.

$$\max(V_{ocG}) < V_{max,inv}$$

- ▶ El algoritmo de **búsqueda del MPP** se realiza en un rango de tensiones limitado,  $V_{mppMIN}, V_{mppMAX}$ .

Para **evitar pérdidas** por trabajar en un punto alejado del MPP, la tensión del generador debe estar dentro de este rango:

$$V_{mppMIN} \leq V_{mppG} \leq V_{mppMAX}$$

# Procedimiento de cálculo

## Tensión máxima

- Temperatura de célula ( $G = 200 \text{ W/m}^2$ ,  $T_a = -10^\circ\text{C}$ )

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{NOCT - 20}{800} \rightarrow T_c = -10 + 200 \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

- Tensión del módulo

$$V_{ocM} = V_{ocM}^* + (T_c - T_c^*) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT_c} \rightarrow V_{ocM} = V_{ocM}^* + (T_c - 25) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT_c}$$

- Número de módulos en serie

$$V_{ocG} = N_s \cdot V_{ocM} \rightarrow N_{sMAX} = \frac{V_{max,inv}}{V_{ocM}}$$

# Procedimiento de cálculo

## Tensión MPP

- Temperatura de célula ( $G_{stc}$ ,  $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{NOCT - 20}{800} \rightarrow T_c = 25 + 1000 \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

- Tensión de circuito abierto del módulo

$$V_{ocM} = V_{ocM}^* + (T_c - T_c^*) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT_c} \rightarrow V_{ocM} = V_{ocM}^* + (T_c - 25) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT_c}$$

# Procedimiento de cálculo

## Tensión MPP

- Tensión MPP del módulo

$$V_{mppM} = V_{ocM} \cdot \frac{V_{mppM}^*}{V_{ocM}^*}$$

- Número de módulos en serie

$$V_{mppG} = N_s \cdot V_{mppM} \rightarrow \begin{cases} N_{sMPP}^{min} = \frac{V_{mppMIN}}{V_{mppM}} \\ N_{sMPP}^{max} = \frac{V_{mppMAX}}{V_{mppM}} \end{cases}$$



## Ramas en paralelo

- ▶ El fabricante del inversor elige los componentes para soportar una **corriente máxima admisible**,  $I_{max,INV}$ .
- ▶ En general, el inversor es capaz de autoprotegerse ante valores superiores a este umbral desplazando el punto de funcionamiento del generador fuera del MPP.
- ▶ No obstante, el diseñador del sistema debe elegir el número de ramas en paralelo de forma que no se supere este umbral.

$$N_{pMAX} = \frac{I_{max,INV}}{I_{scM}^*}$$

# Configuración del generador

De los cálculos anteriores se obtiene un **conjunto de configuraciones** del generador que permiten un buen acoplamiento entre inversor y generador.

Para **elegir una configuración** deben tenerse en cuenta diferentes aspectos:

- ▶ Configuración eléctrica y ubicación física de los módulos en la estructura.
- ▶ Inversión y rendimiento económicos.
- ▶ Espacio disponible.
- ▶ Relación de potencias de generador e inversor.
- ▶ La curva de eficiencia del inversor depende de la tensión de entrada.

# Configuración eléctrica y estructura

- ▶ Es recomendable elegir **series** compuestas por un número de módulos que puedan ser ubicados en una **única hilera de la estructura**.
  - ▶ **Se facilita el trazado del cableado:**  
La propia estructura puede servir como fijación auxiliar, se evitan cruzamientos indeseados.
  - ▶ **Se minimiza la influencia de las sombras:**  
Es muy frecuente la aparición de sombras entre partes del generador o entre seguidores, sombras de forma rectangular y que comienzan afectando a las partes bajas de la estructura. Al cablear por hileras, las sombras de las hileras bajas no afectan a las hileras inmediatamente superiores.

# Inversión y rendimiento económicos

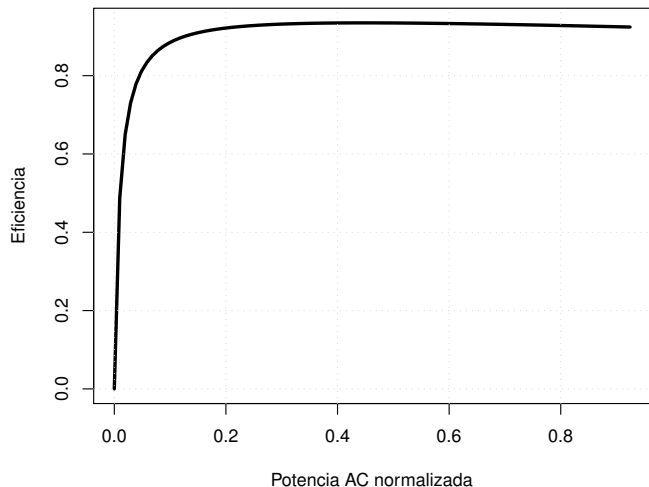
- ▶ La potencia del generador fotovoltaico está relacionada directamente con la **inversión económica** a realizar.
- ▶ Por otra parte, la relación entre **energía generada** y potencia nominal es aproximadamente lineal, y por tanto, los **ingresos económicos** dependen casi linealmente de la potencia del generador.
- ▶ Por tanto, para decidir la potencia del generador ( $P_g^* = N_s \cdot N_p \cdot P_m^*$ ) debe tenerse en cuenta el capital o financiación disponible, y el rendimiento económico deseado.

## Terreno ocupado

- ▶ La potencia del generador es proporcional al área del generador y al **terreno ocupado** (que también influye, aunque en menor grado, en el cálculo económico).
- ▶ Por tanto, debe tenerse en cuenta el espacio disponible (o el coste que se pretende asumir por el uso de terreno).

## Relación de potencias entre generador e inversor

Dado que la potencia entregada por el generador varía con las condiciones meteorológicas, el inversor trabajará en diferentes zonas de su curva de eficiencia.



## Relación de potencias entre generador e inversor

- ▶ Por tanto, una de las preguntas a responder es **que relación debe existir entre la potencia del generador FV y el inversor.**

$$F_{DI} = P_g^* / P_{inv}$$

- ▶ Si esta relación es alta, el inversor trabajará con frecuencia en la región de alta eficiencia, pero a cambio es posible que deba limitar la potencia del generador para evitar superar su umbral de corriente admisible.

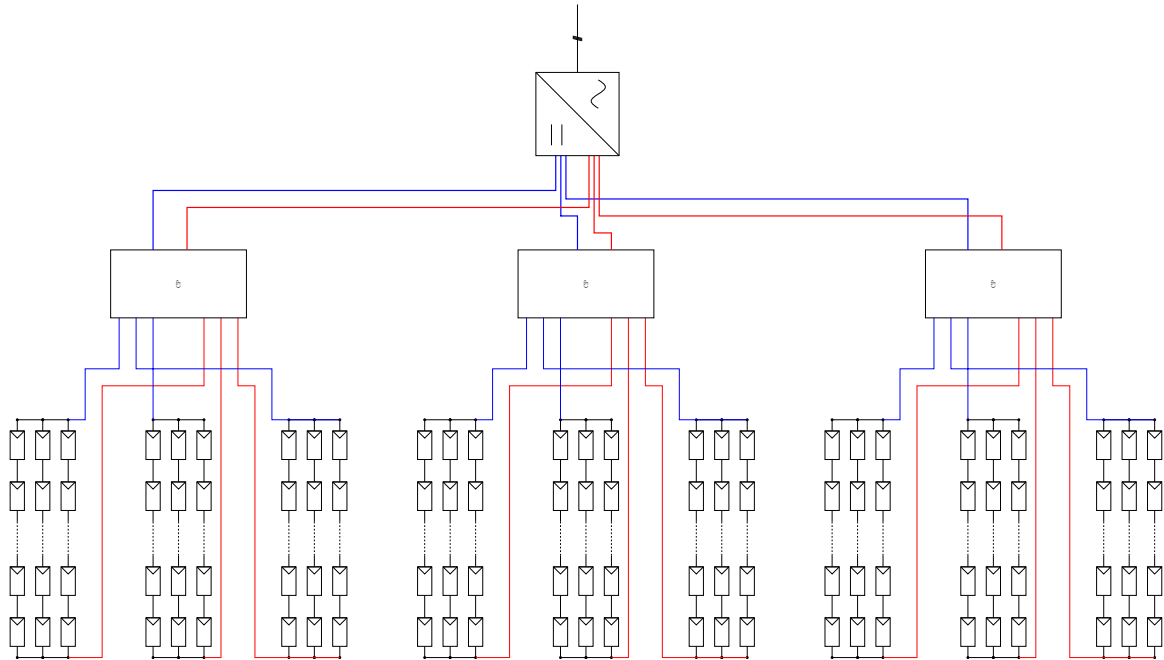
## Relación de potencias entre generador e inversor

- ▶ Según el **tipo de sistema** (estático, seguimiento) se debe elegir una relación de potencias de generador e inversor.
- ▶ En **sistemas de seguimiento** esta probabilidad suele ser alta. Se recomiendan inversores de potencia similar a la del generador ( $P_g^*/P_{inv} \in [1; 1.2]$ )
- ▶ No obstante, es posible demostrar que el valor de esta relación no es tan crítico como **elegir un inversor con buena curva de eficiencia.**



① Configuración Eléctrica del Generador

② Cableado Eléctrico



# Características básicas

- ▶ Criterio de caída de tensión.
- ▶ Comprobar intensidad máxima admisible.
- ▶ En sistemas de gran tamaño reducir bucles.

## Criterio de Caída de Tensión

- ▶ En primer lugar se calculan las secciones mediante el criterio de caída de tensión (RBT ITC-BT-07):

$$S_{dc} = \frac{2 \cdot L_{dc} \cdot I_{dc}}{\gamma_{\theta} \cdot \Delta V_{dc}}$$

$$S_{1ac} = \frac{2 \cdot L_{1ac} \cdot I_{1ac}}{\gamma_{\theta} \cdot \Delta V_{1ac}}$$

$$S_{3ac} = \frac{\sqrt{3} \cdot L_{3ac} \cdot I_{3ac}}{\gamma_{\theta} \cdot \Delta V_{3ac}}$$

- ▶ La conductividad del cable,  $\gamma_{\theta}$ , depende del material y de la temperatura de operación:

Material	$T = 20^{\circ}$	$T = 70^{\circ}$
Cobre	$\gamma_{20^{\circ}} = 58 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$	$\gamma_{70^{\circ}} = 48,47 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$
Aluminio	$\gamma_{20^{\circ}} = 35,71 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$	$\gamma_{70^{\circ}} = 29,67 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$

## Criterio de Caída de Tensión

- ▶ Según el apartado 5 de la ITC-BT-40, se exige una caída máxima de tensión 1,5 % de la tensión nominal.
- ▶ Para aplicar correctamente este porcentaje es importante caer en la cuenta de que **cada zona (DC y AC) tiene su propia tensión nominal.**
- ▶ Cuando un circuito (en DC o AC) está dividido en varios tramos (por ejemplo, por el uso de cajas de paralelos), la caída de tensión total del circuito es la suma de las respectivas caídas en cada uno de los tramos.

## Cálculo por tramos (DC)

- ▶ Al existir dos tramos y una única condición existe un grado de libertad que permite fijar la sección de uno de los tramos u optimizar el volumen total de conductor empleado.
- ▶ La fracción de caída de tensión en el tramo de la caja al inversor es:

$$\frac{\Delta U_{inv}}{\Delta U} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^2 \cdot I_i}{L_{inv}^2 \cdot I_{inv}}}}$$

- ▶  $\Delta U$  la caída de tensión admisible en el circuito,
- ▶  $\Delta U_{inv}$  la caída en el tramo desde una caja de paralelos hasta la entrada del inversor,
- ▶  $L_i$  la longitud de cableado desde el generador hasta la caja de paralelos,
- ▶  $I_i$  la corriente que circula desde el generador hasta la caja de paralelos,
- ▶  $L_{inv}$  la longitud de cableado desde la caja hasta el inversor,
- ▶  $I_{inv}$  la corriente desde la caja hasta el inversor.

## Ejemplo de cálculo por tramos (DC)

En una instalación se agrupan en una caja de paralelos las salidas los generadores ubicados en 20 seguidores, cada uno de ellos con 30 A. Esta caja de paralelos está ubicada a 200 m del inversor y a 30 m de todos los seguidores.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta U_{inv}}{\Delta U} &= \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^2 \cdot I_i}{L_{inv}^2 \cdot I_{inv}}}} = \\ &= \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20 \cdot 30^2 \cdot 30}{200^2 \cdot 600}}} = \\ &= 0,87\end{aligned}$$

Si la tensión nominal de los generadores es de 500 V, este resultado implica que la sección del tramo de la caja de paralelos al inversor se diseñará con una caída de tensión de  $0,87 \cdot 1,5 \cdot 500/100 = 6,525$  V. El tramo desde los generadores hasta la caja de paralelos se diseñará con una caída de tensión de  $(1 - 0,87) \cdot 1,5 \cdot 500/100 = 0,975$  V.

## Ejemplo

- ▶ En una instalación que conduce 75 A a la salida de un inversor trifásico, situado este a 100 m de la conexión a red, se deberá utilizar un cable de sección (teniendo en cuenta que  $\gamma_{70} = 48 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ ).

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 75}{48 \cdot 1,5\% \cdot 400} = 45,46 \text{ mm}^2$$

- ▶ Dado que la sección de los cables está normalizada, se deberá optar por la sección inmediatamente superior, y por tanto la conexión del inversor a la red se realizará con tres cables de sección  $S = 50 \text{ mm}^2$ .



## Intensidad Máxima Admisible

- ▶ Con este resultado, es necesario comprobar que la intensidad de diseño es inferior a la intensidad máxima admisible del cable para sus condiciones de servicio, según las tablas de la ITC-BT-07.
- ▶ No obstante, las secciones que resultan del criterio de caída de tensión aplicado a los sistemas fotovoltaicos habitualmente son sobradamente capaces de conducir la corriente del sistema.

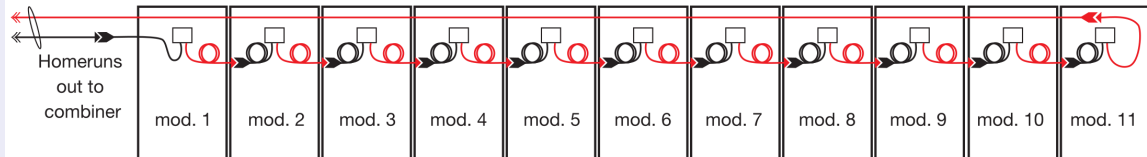
## Continua vs. Alterna

Suponiendo que en una planta con varios inversores trifásicos existe la posibilidad de ubicar los inversores debajo del generador FV (*distribución en alterna*) o en un centro específico junto al punto de conexión a red (*distribución en continua*), **¿cuál es la tensión de trabajo en continua que permite optar por una distribución en continua?**

Se puede demostrar que para tensiones de generador  $V_{mpp} \geq 475 \text{ V}$ , la distribución en continua es preferible a la distribución en alterna desde el punto de vista de masa de conductor necesario.

# Estrategia de Cableado

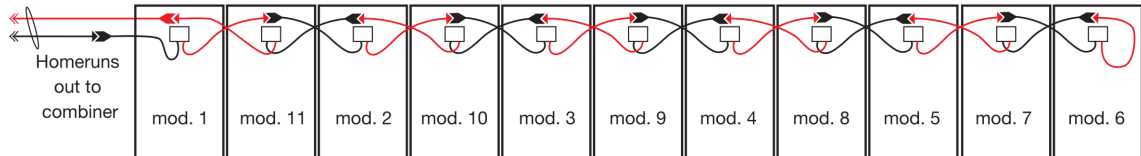
## Secuencial (*daisy chain wiring*)



- ▶ Es el modo habitual (todos los instaladores lo conocen).
- ▶ Requiere cable de retorno.
- ▶ El cable sobrante entre módulos debe quedar bien sujeto.
- ▶ Puede requerir más tiempo de instalación.

# Estrategia de Cableado

## Salteado (*leapfrog wiring*)



- ▶ No requiere cable de retorno.
- ▶ Hay que comprobar que la longitud del cable del módulo es suficiente.
- ▶ Hay menos cable sobrante entre módulos.
- ▶ Puede requerir menos tiempo de instalación.