

# SFCR: Productividad y Sombras

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① Energía Producida por un SFCR

② Sombras y ocupación de terreno

③ Resumen

## ① Energía Producida por un SFCR

Procedimiento de cálculo

# Potencia en un SFCR

## ► **Potencia** a la Salida del Generador FV

$$P_{dc} = A_g \cdot \eta_g(G_{ef}, T_a) \cdot G_{ef} = \frac{\eta_g(G_{ef}, T_a)}{\eta_g^*} \cdot \frac{G_{ef}}{G^*} \cdot P_g^*$$

## ► **Potencia** a la Salida del Inversor

$$P_{ac} = P_{dc} \cdot \eta_{inv}(P_{dc}, V_{dc}) = P_{dc} \cdot \eta_{inv}(G_{ef}, T_a)$$

## ► **Energía** Producida por un SFCR

$$E_{ac} = \int_T \frac{\eta_g(G_{ef}, T_a)}{\eta_g^*} \cdot \frac{G_{ef}}{G^*} \cdot \eta_{inv}(G_{ef}, T_a) \cdot P_g^* \quad dt$$

# Energía producida

$$E_{ac} = P_g^* \cdot \frac{G_{ef}}{G^*} \cdot PR \cdot (1 - FS)$$

- ▶  $E_{ac}$  es la **energía producida** en un periodo.
- ▶  $G^*$  es la **irradiancia** en condiciones estándar de medida (STC,  $G_{stc} = 1 \text{ kW m}^{-2}$ ,  $T_c = 25 \text{ °C}$ )
- ▶  $P_g^*$  es la **potencia nominal** del generador FV (kWp) en STC
- ▶  $G_{ef}$  es la **irradiación efectiva incidente** en el plano del generador
- ▶  $PR$  es el **rendimiento del sistema** o *performance ratio*
- ▶  $FS$  es el **factor de sombras**

# Productividad

En algunas ocasiones se habla de **productividad** del sistema,  $Y_f$ , que es el cociente entre energía producida y potencia nominal del **generador**:

$$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_g^*} (\text{kWh kWp}^{-1})$$

# Performance Ratio

- ▶ Está concebido para incluir todas las **pérdidas que no tienen dependencia con las condiciones meteorológicas**.
- ▶ Este factor *puede* caracterizar el funcionamiento de un sistema **independientemente de la localidad**.
- ▶ En sentido estricto no es cierto porque sí hay relación con la meteorología del lugar.
- ▶ Sin embargo, dado que estos factores son de segundo orden comparados con la relación entre potencia e irradiancia, **suele aceptarse** que el **PR** sirve para caracterizar la **calidad de un sistema fotovoltaico**.

# Performance Ratio

## Desglose de pérdidas

- ▶ **Dispersión de parámetros** entre los módulos que componen el generador (2-4%)
- ▶ **Tolerancia de potencia** de los módulos respecto a sus características nominales (3%)
- ▶ **Temperatura** de funcionamiento de los módulos (5-8%)
- ▶ Conversión DC/AC realizada por el **inversor** (8-12%)
- ▶ **Efecto Joule** en los cables (2-3%)
- ▶ Conversión BT/MT realizada por el **transformador** (2-3%)
- ▶ **Disponibilidad** del sistema (0,5-1%)



# Performance Ratio

## Valores reales

- ▶ El análisis de funcionamiento de diversos sistemas FV europeos ha mostrado que el rango de valores que toma el *performance ratio* es bastante amplio, con mínimos de 0,4 y máximos de 0,85.
- ▶ Para sistemas instalados entre 1980 a 1990, **el valor promedio ha sido de 0,7.**
- ▶ Para sistemas instalados entre 2005 a 2012, **el valor promedio ha sido de 0,8.**

## Factor de sombras

- ▶ **El factor de sombras suele tomar valores alrededor del 2 al 4%**, tanto en instalaciones estáticas como de seguimiento.
- ▶ En casos específicos este factor puede ser más alto (por ejemplo, debido a la existencia de edificios cercanos, o en aquellas plantas con un nivel de ocupación de terreno superior al óptimo).

① Energía Producida por un SFCR

② Sombras y ocupación de terreno

③ Resumen

## ② Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

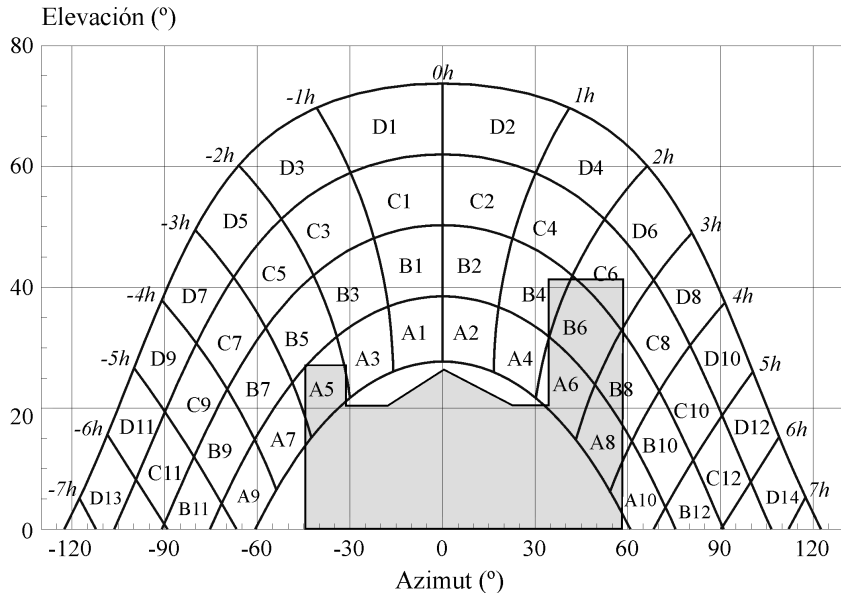
Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento 2X

Sombras Cercanas: Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

# Sombras en el horizonte



## ② Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

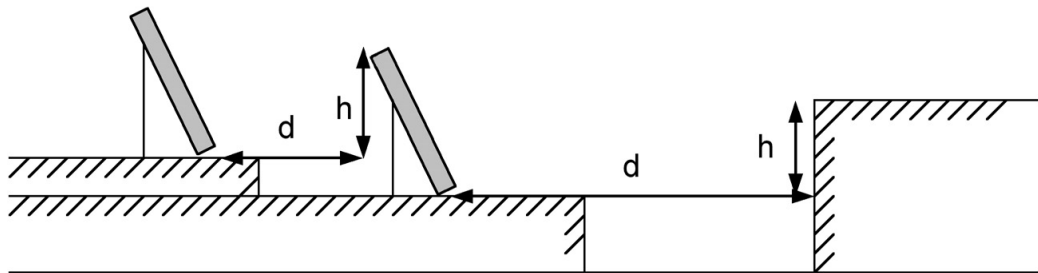
**Sombras Cercanas: sistemas estáticos**

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento 2X

Sombras Cercanas: Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

## Sombras entre filas



## Sombras entre filas

- ▶ Suele establecerse un objetivo de **4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno libres de sombra.**
- ▶ La longitud de la sombra de un obstáculo se mide con:

$$d = \frac{h}{\tan \gamma_s}$$

- ▶ En el mediodía del solsticio de invierno

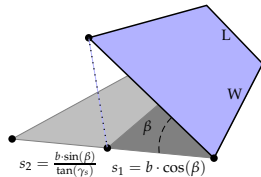
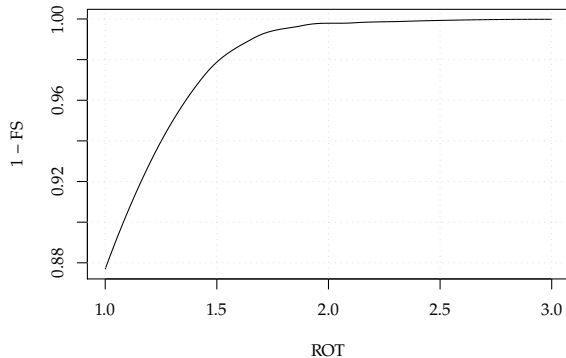
$$\gamma_s = 90 - 23.45 - \phi \simeq 67 - \phi$$

- ▶ Para 2 horas antes y después:

$$d_{min} = \frac{h}{\tan(61^\circ - \phi)}$$



# Separación entre filas



$$W = \infty$$

$$ROT = D/L$$

## ② Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

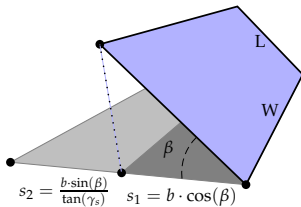
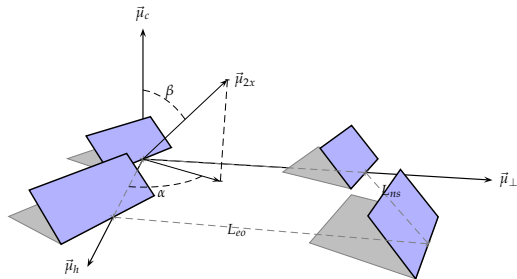
Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento 2X

Sombras Cercanas: Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

# Separación de seguidores Doble Eje

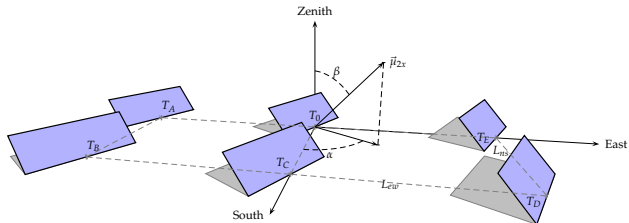
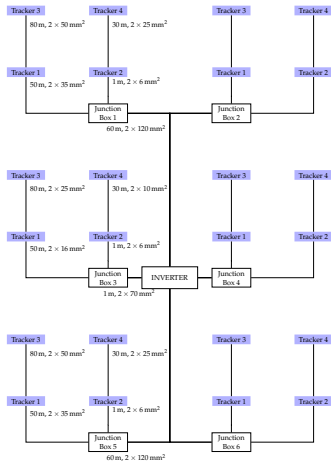


$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{L \cdot W}$$

$$E_{ac} = f(ROT)??$$

# Radiación promedio

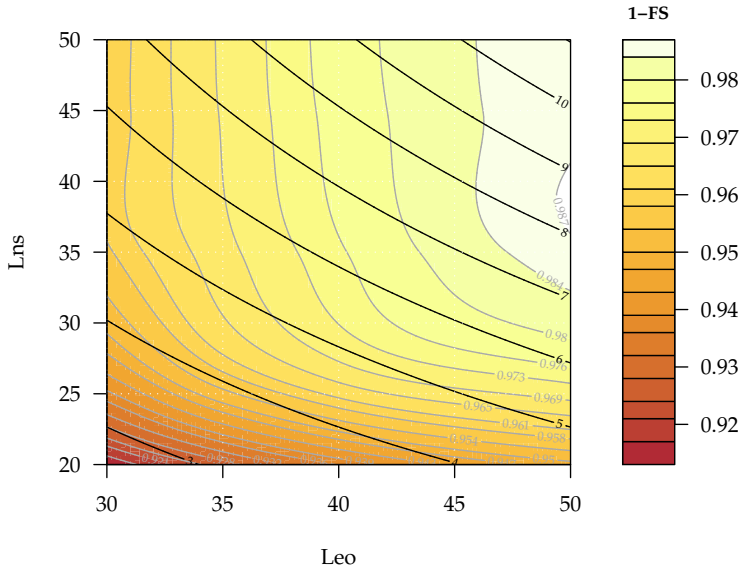
$$G_{ef,av} = 1/24 \cdot (10 \cdot G_{ef,0} + 5 \cdot G_{ef,A} + G_{ef,B} + 2 \cdot G_{ef,C} + G_{ef,D} + 5 \cdot G_{ef,E})$$



## Separación de Seguidores Doble Eje

$$b = \frac{L}{W} = 0.475$$

$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{L \cdot W}$$



## ② Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

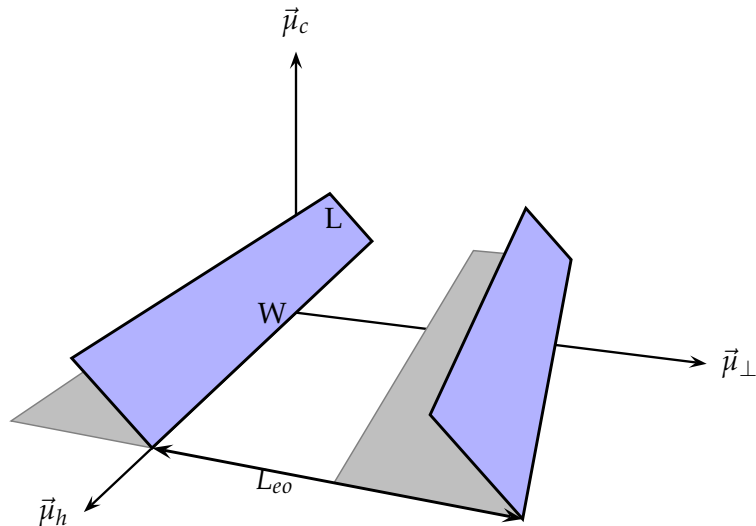
Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento 2X

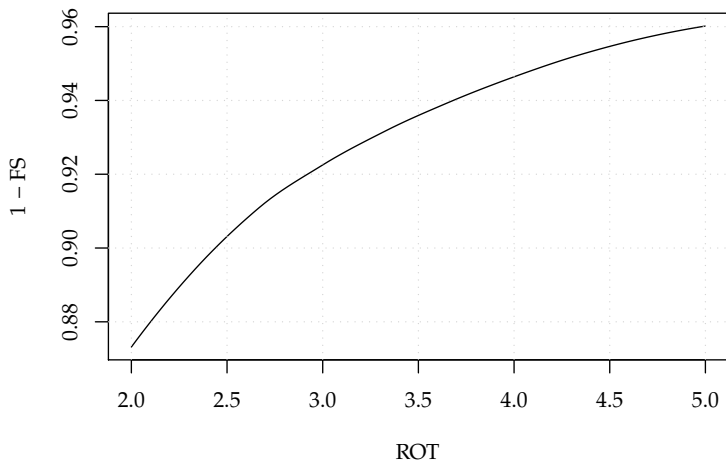
Sombras Cercanas: Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

# Separación de Seguidores Eje Horizontal



## Separación de Seguidores Horizontal N-S

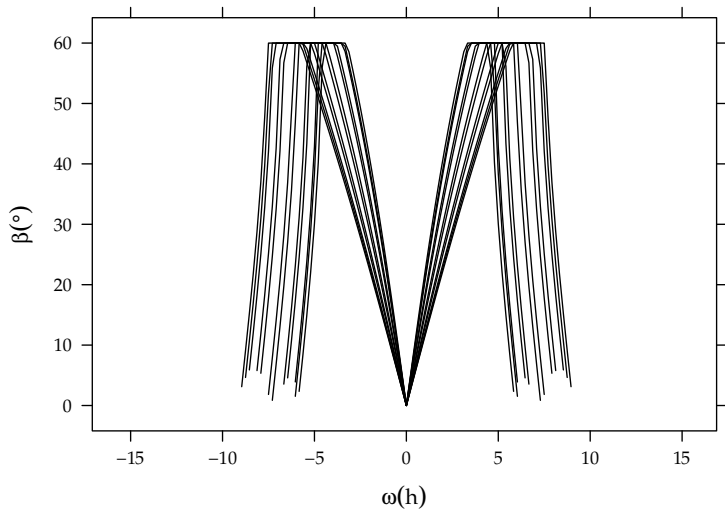




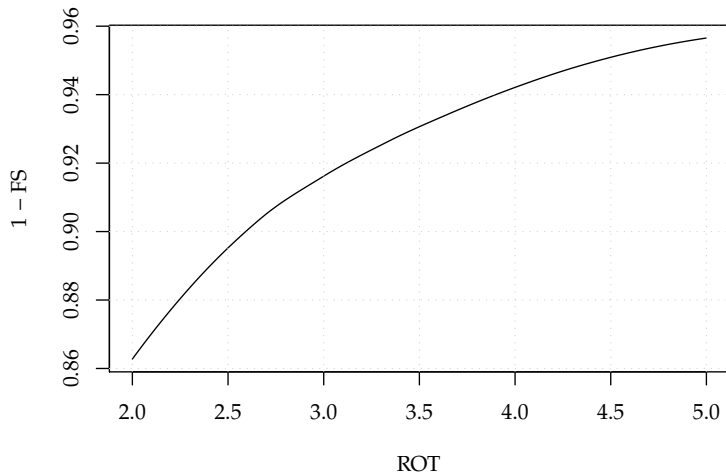
# Backtracking

- ▶ El **sombreado** en un generador puede producir problemas por el efecto de **punto caliente**.
- ▶ En seguidores de eje horizontal se puede **evitar la incidencia de sombras** en cualquier instante mediante el «**backtracking**»:
  - ▶ Al **amanecer** el seguidor está en posición **horizontal**.
  - ▶ Según avanza el día el seguidor gira en **sentido contrario al movimiento solar para evitar las sombras**.
  - ▶ En un determinado momento se cruza con el sol y puede continuar el movimiento «convencional».
  - ▶ En un instante de la tarde debe volver a cambiar el sentido hasta la **horizontal en la noche**.

# Backtracking



## Separación con backtracking



## Limitación de ángulo

- ▶ Es habitual limitar el ángulo de inclinación a valores máximos alrededor de  $70^\circ$  por motivos estructurales (protección frente al viento)
- ▶ Implica un desvío de los seguidores de su posición óptima.
  - ▶ Sombras más cortas que en el caso teórico (red más densa).
  - ▶ Reducción en la energía generada por incidencia no perpendicular

## ② Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento 2X

Sombras Cercanas: Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

# Elección de separaciones

La **separación óptima** entre elementos (seguidores o estructuras estáticas) es aquella que conduce al **mínimo valor del coste de la energía** producida por el sistema.

Al aumentar la separación:

- ▶ Disminuyen las **pérdidas por sombreado mutuo** (aumenta la productividad del
- ▶ Aumentan:
  - ▶ los **costes relacionados con el área ocupada** por unidad de potencia.
  - ▶ los **costes relacionados con los elementos de unión entre estructuras** (cableado, canalizaciones, zanjas).

# Elección de separaciones

- ▶ Esta separación óptima **depende** de las **estructuras elegidas** y de las **condiciones económicas** de los elementos.
- ▶ La separación finalmente elegida debe **tomar en consideración las condiciones del terreno** (fronteras, irregularidades, vaguadas, etc.)

# ROT y Coste de la energía producida

## ► Coste Energía

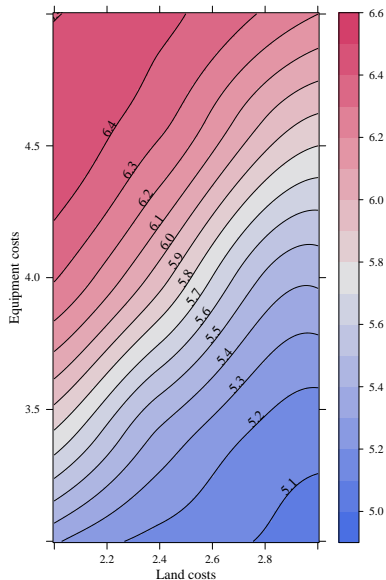
$$C_E = \frac{C_P}{E_{AC}}$$

## ► Coste Sistema

$$C_p = C_c + C_A + C_{PV}$$

►  $C_{PV}$  entre 2,5€/W y 5€/W (*antiguo*)

►  $C_A$  entre 1,5€/m<sup>2</sup> y 4€/m<sup>2</sup>





① Energía Producida por un SFCR

② Sombras y ocupación de terreno

③ Resumen

# Ocupación de terreno y productividad

SFCR	ROT	Productividad
Estático	2	1
Eje Horizontal NS	4	1,05-1,2
Doble Eje	6	1,3-1,5