

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
DE CONEXIÓN A RED
PRODUCTIVIDAD Y SOMBRAS

OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO

- 1 ENERGÍA PRODUCIDA POR UN SFCR
 - Procedimiento de cálculo

- 2 SOMBRAS Y OCUPACIÓN DE TERRENO
 - Sombras Lejanas
 - Sombras Cercanas: sistemas estáticos
 - Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento
 - Seguidores de eje horizontal NS
 - Elección de separaciones

- 3 RESUMEN

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

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

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 (kWh)
- G^* es la **irradiancia** en condiciones estándar de medida (STC, $G_{stc} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$, $T_c = 25^\circ\text{C}$)
- P_g^* es la **potencia nominal** del generador FV (kWp) en STC
- G_{ef} es la **irradiación efectiva incidente** en el plano del generador ($\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$)
- 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 sistema:

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

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 desde 1996, **el valor promedio ha sido de 0,74.**

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

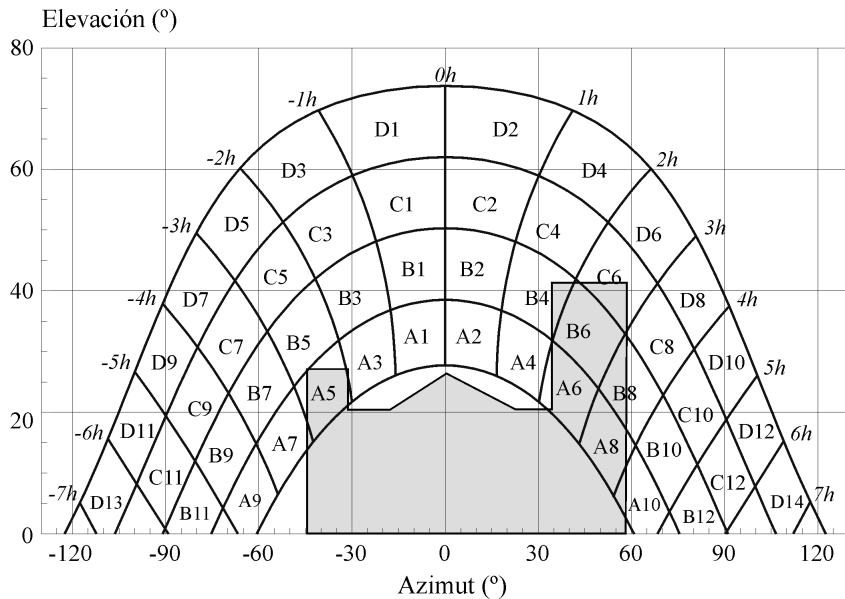
- Procedimiento de cálculo

2 SOMBRAS Y OCUPACIÓN DE TERRENO

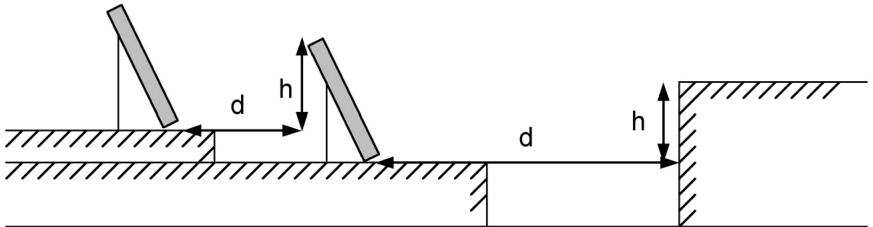
- Sombras Lejanas
- Sombras Cercanas: sistemas estáticos
- Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento
- Seguidores de eje horizontal NS
- Elección de separaciones

3 RESUMEN

MÉTODO CTE



SOMBRA 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:

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

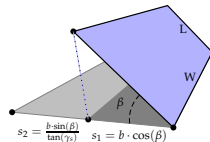
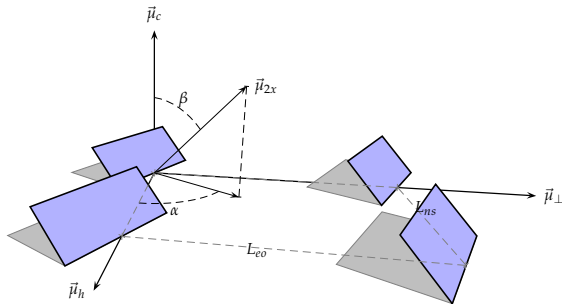
En el mediodía del solsticio de invierno

$$\gamma_s = 90 - 23,45 - \phi \simeq 67 - \phi$$

Para 2 horas antes y después:

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

SEPARACIÓN DE SEGUIDORES DOBLE EJE



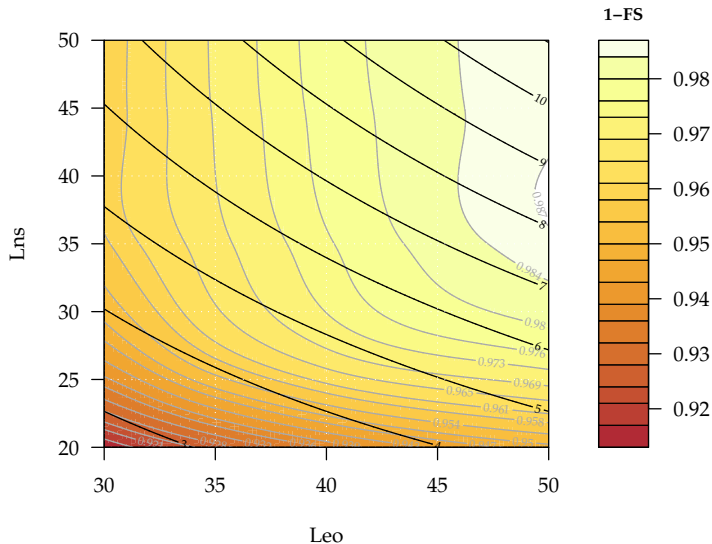
$$b = \frac{L}{W}$$

$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{b}$$

SEPARACIÓN DE SEGUIDORES DOBLE EJE

$$b = \frac{L}{W} = 0,475$$

$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{b}$$

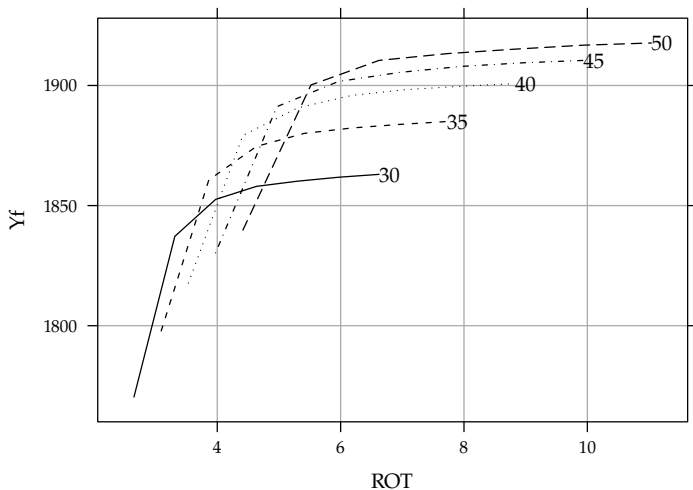


OCUPACIÓN DE TERRENO

ROT PARA DIFERENTES VALORES DE LEO

$$b = \frac{L}{W} = 0,475$$

$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{b}$$

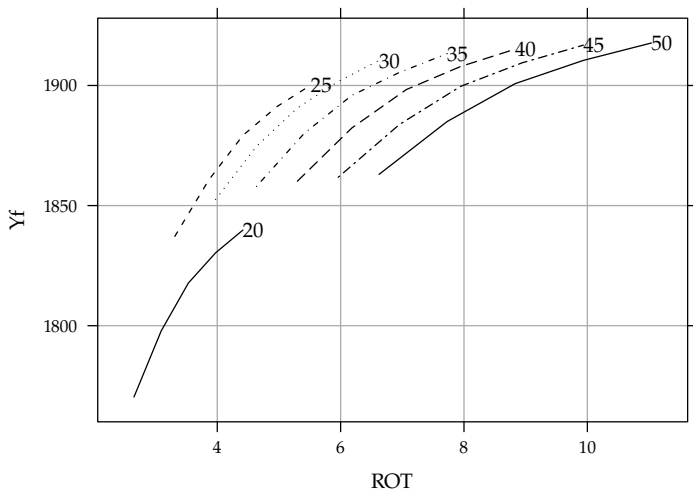


OCUPACIÓN DE TERRENO

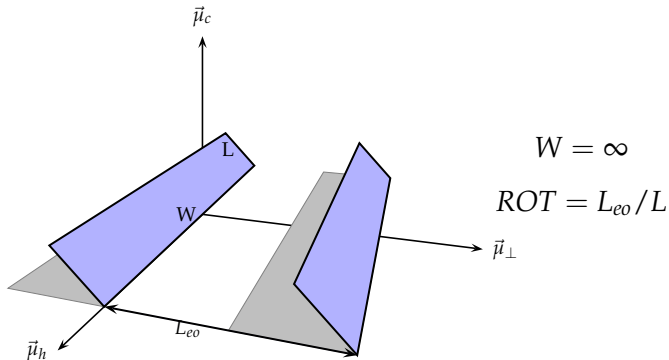
ROT PARA DIFERENTES VALORES DE LNS

$$b = \frac{L}{W} = 0,475$$

$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{b}$$

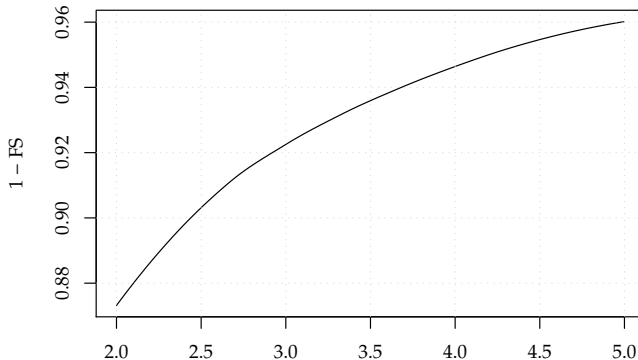


SEPARACIÓN DE SEGUIDORES EJE HORIZONTAL



SEPARACIÓN DE SEGUIDORES HORIZONTAL N-S

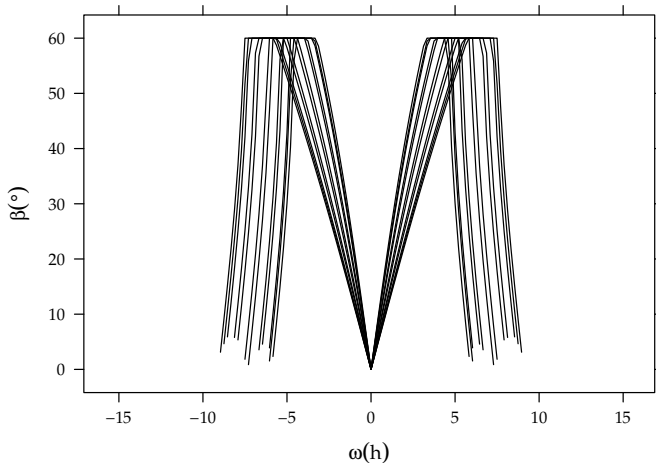
SOMBRA



BACKTRACKING

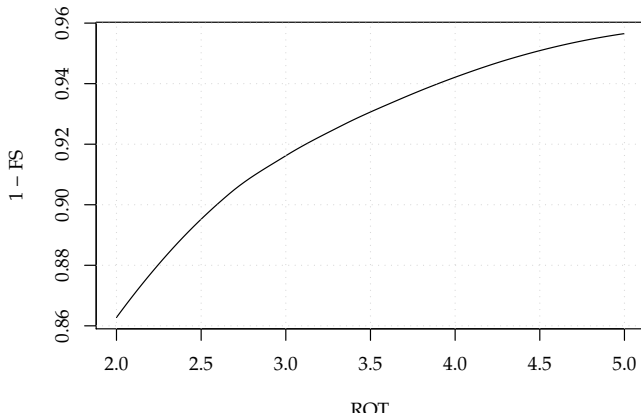
- El **sombreado** en un generador puede producir problemas por el efecto de **punto caliente**.
- En seguidores de eje horizontal se puede **evitar la incidencia de sombras** en cualquier instante mediante el “**backtracking**”:
 - Al **amanecer** el seguidor está en posición **horizontal**.
 - Según 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 DE SEGUIDORES HORIZONTAL N-S

BACKTRACKING



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:

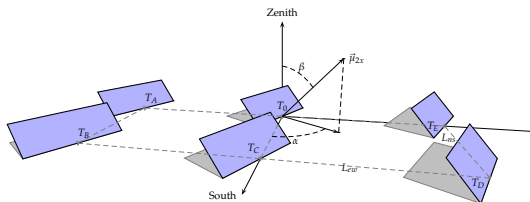
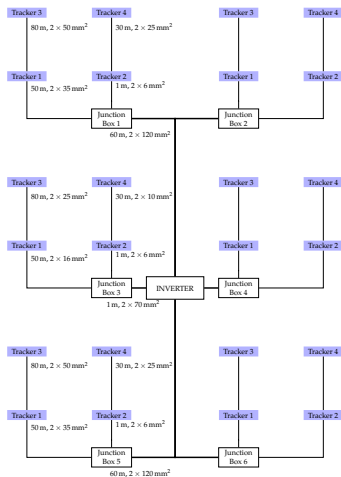
- Con mayor separación disminuyen las **pérdidas por sombreado mutuo**, aumenta la productividad del sistema.
- Con mayor separación aumentan los **costes relacionados con el area ocupada** por unidad de potencia.
- Con mayor separación aumentan los **costes relacionados con los elementos de unión entre estructuras** (cableado, canalizaciones, zanjas).

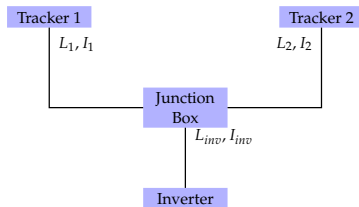
ELECCIÓN DE SEPARACIONES

- 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.)

RADIACIÓN PROMEDIO

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





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

$$\Delta U_{inv} + \Delta U_i = \Delta U$$

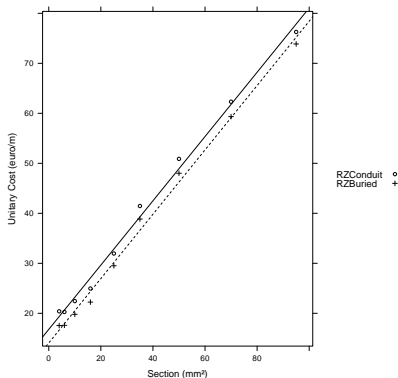
$$S_{inv} = 2 \cdot \rho \cdot \frac{L_{inv} \cdot I_{inv}}{\Delta U_{inv}}$$

$$S_i = 2 \cdot \rho \cdot \frac{L_i \cdot I_i}{\Delta U_i}$$

COSTE DE LA ENERGÍA PRODUCIDA

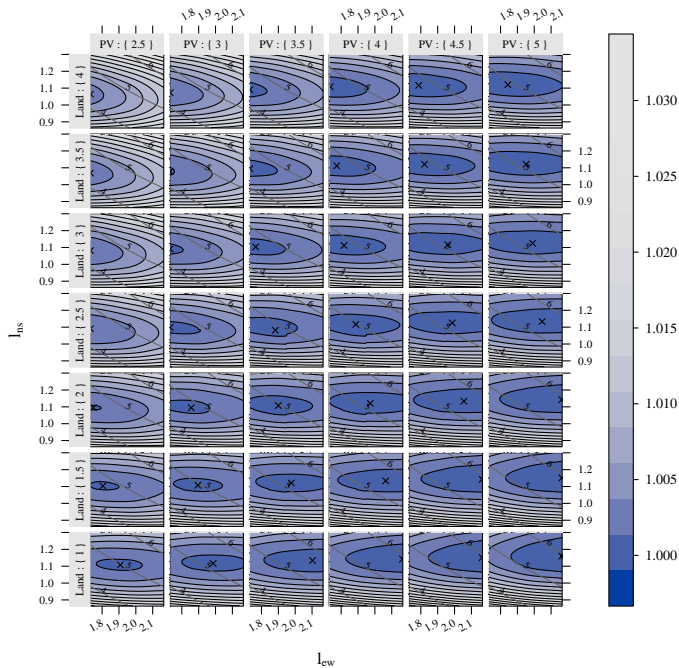
$$C_E = \frac{C_P}{E_{AC}}$$

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

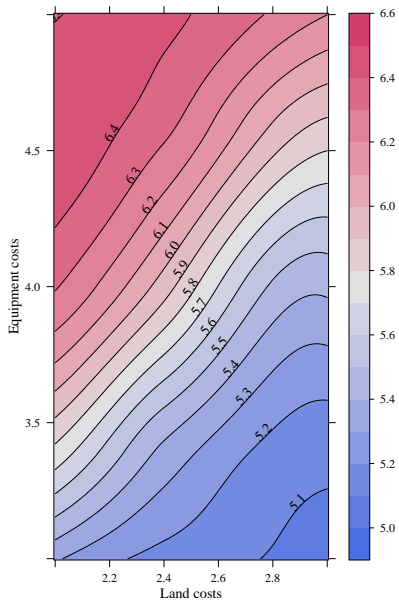


C_{PV} entre 2,5€/W y 5€/W

C_A entre 1,5€/m² y 4€/m²



RESULTADOS



1 ENERGÍA PRODUCIDA POR UN SFCR

- Procedimiento de cálculo

2 SOMBRAS Y OCUPACIÓN DE TERRENO

- Sombras Lejanas
- Sombras Cercanas: sistemas estáticos
- Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento
- Seguidores de eje horizontal NS
- Elección de separaciones

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