

Sombras y Ocupación de Terreno

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

Planteamiento

- ▶ Al diseñar una central fotovoltaica se debe decidir la ubicación de las diferentes partes del generador resolviendo un **compromiso** entre la mejor **ocupación del terreno** disponible y la minimización del **impacto de sombras mutuas** arrojadas entre los módulos.
- ▶ Métricas de ocupación de terreno:

$$GCR = \frac{A_G}{A_T}$$

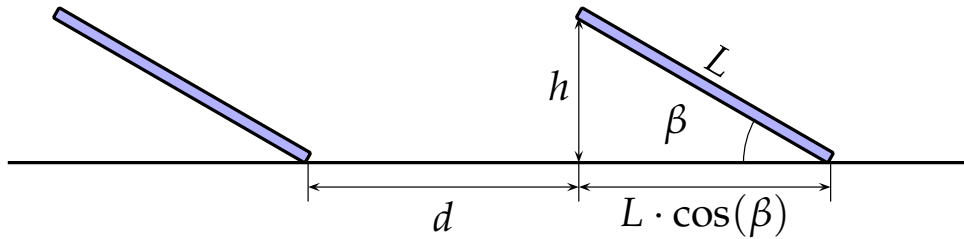
$$ROT = \frac{A_T}{A_G}$$

Ejemplo

Un sistema con un $ROT = 4$ requiere un terreno de un área 4 veces el área del generador fotovoltaico. O, dado que $GCR = 0.25$, el generador fotovoltaico ocupará una cuarta parte del terreno.

- ① Sistemas estáticos
- ② Sistemas de seguimiento 2X
- ③ Seguidores de eje horizontal NS
- ④ 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:

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

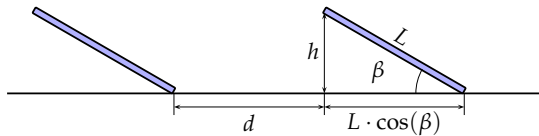
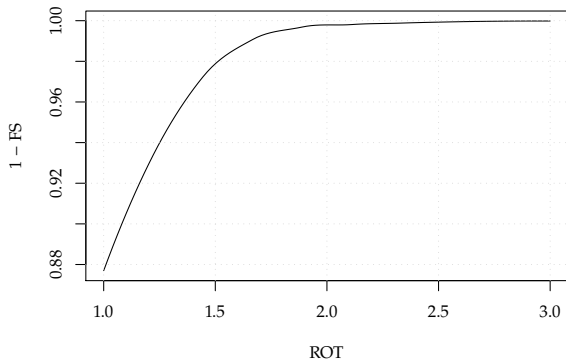
- ▶ En el mediodía del solsticio de invierno

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

- ▶ Para 2 horas antes y después:

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

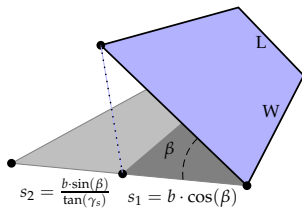
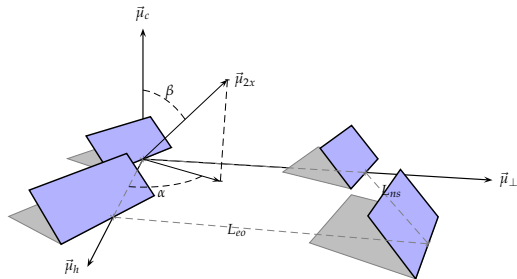
Separación entre filas



$$W \rightarrow \infty$$
$$ROT = \frac{A_T}{A_G} = \frac{d + L \cdot \cos(\beta)}{L}$$
$$GCR = \frac{A_G}{A_L} = \frac{L}{d + L \cdot \cos(\beta)}$$

- ① Sistemas estáticos
- ② **Sistemas de seguimiento 2X**
- ③ Seguidores de eje horizontal NS
- ④ Elección de separaciones

Separación de seguidores Doble Eje



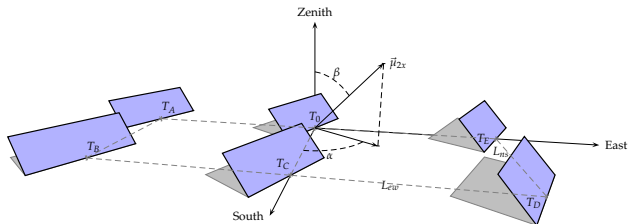
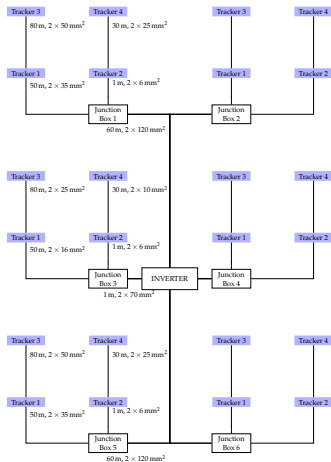
$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{L \cdot W}$$

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

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

Radiación promedio

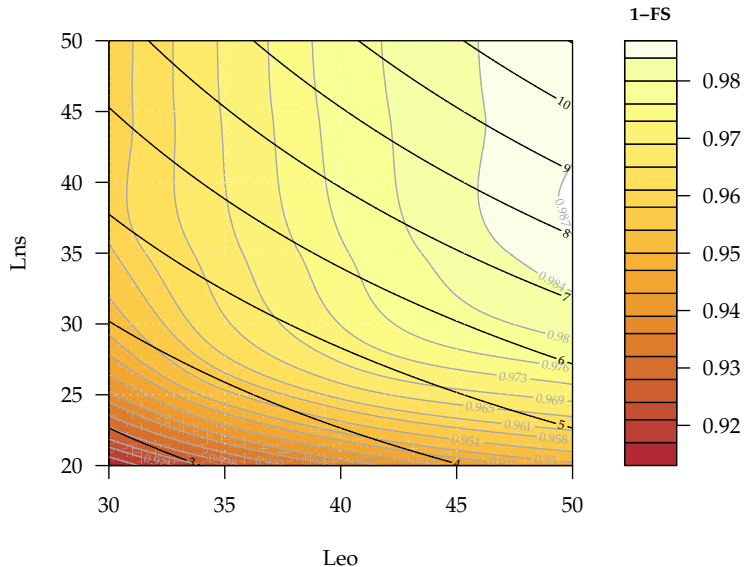
$$G_{ef,av} = 1/24 \cdot (10 \cdot G_{ef,0} + 5 \cdot G_{ef,A} + G_{ef,B} + 2 \cdot G_{ef,C} + G_{ef,D} + 5 \cdot G_{ef,E})$$



Separación de Seguidores Doble Eje

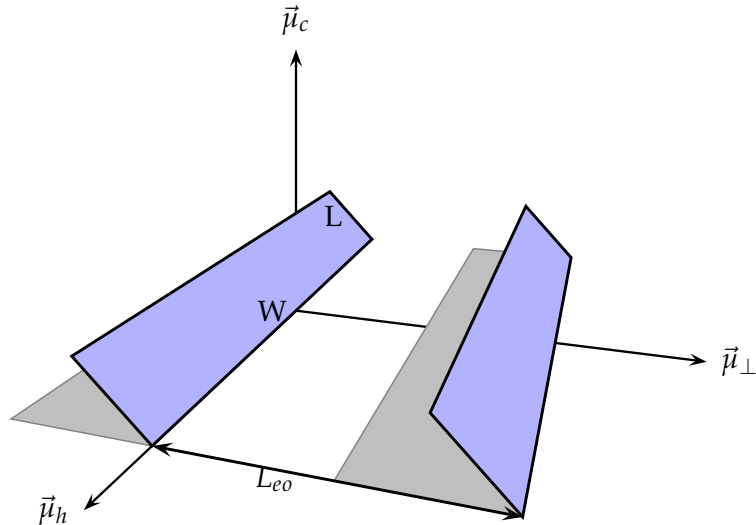
$$ROT = \frac{L_{ns} \cdot L_{eo}}{L \cdot W}$$

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

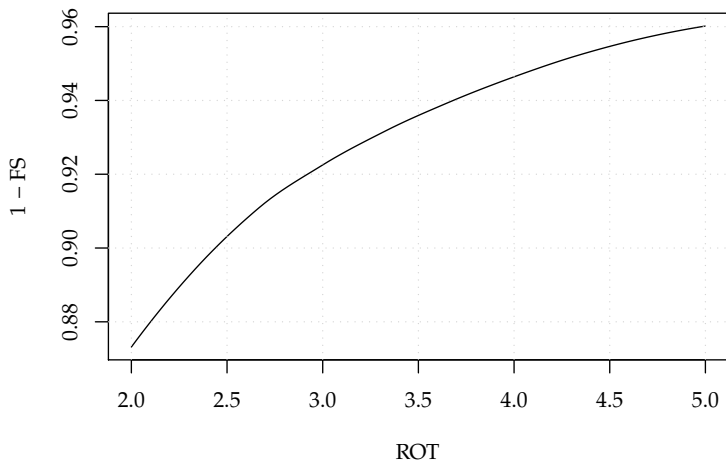


- ① Sistemas estáticos
- ② Sistemas de seguimiento 2X
- ③ Seguidores de eje horizontal NS
- ④ Elección de separaciones

Separación de Seguidores Eje Horizontal



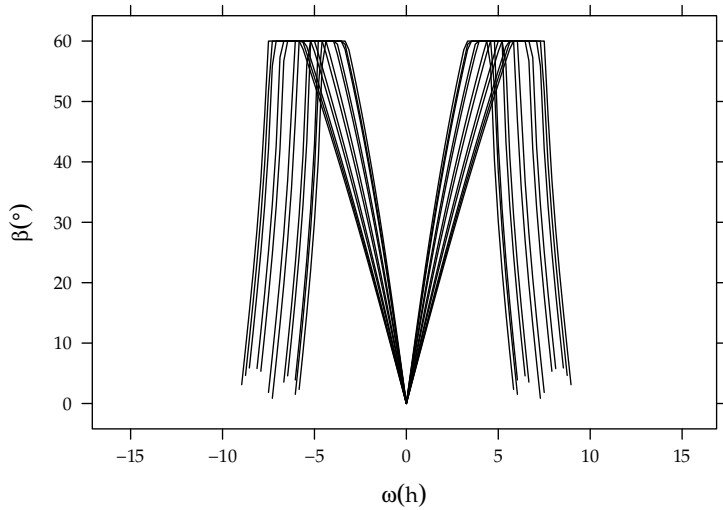
Separación de Seguidores Horizontal N-S



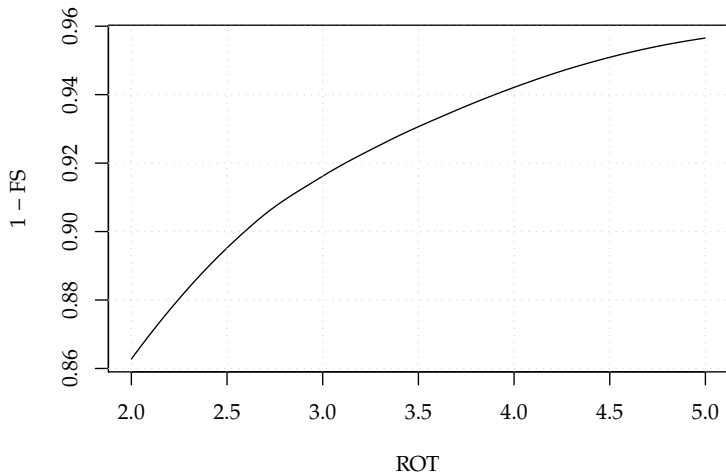
Backtracking

- ▶ 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° 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

- ① Sistemas estáticos
- ② Sistemas de seguimiento 2X
- ③ Seguidores de eje horizontal NS
- ④ 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.

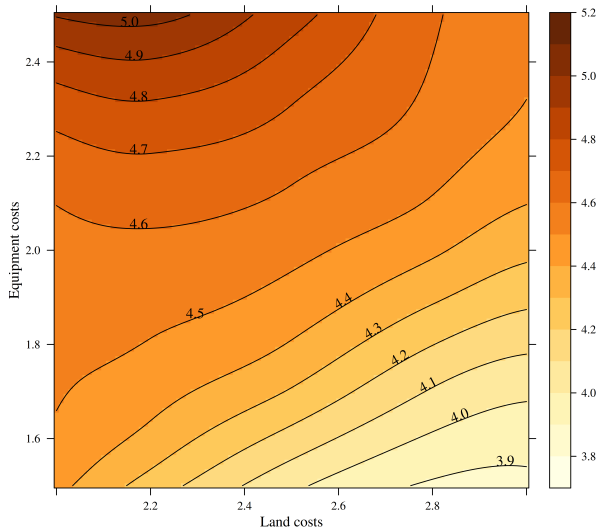
Al aumentar la separación:

- ▶ 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.)

Ocupación óptima



► Coste Energía

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

► Coste Sistema

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

► C_{PV} entre 1,5€/W y 2,5€/W

► C_A entre 2€/m² y 3€/m²

Separaciones y coste de la energía

