

SFCR: Productividad y Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y ocupación de terreno

Resumen

Potencia en un SFCR

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

► **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

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

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

- ▶ 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**

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

Productividad

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

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

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

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

Performance Ratio

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

- ▶ 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%)

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

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

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Procedimiento de cálculo

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

- ▶ **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).

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

Resumen

Sombras en el horizonte

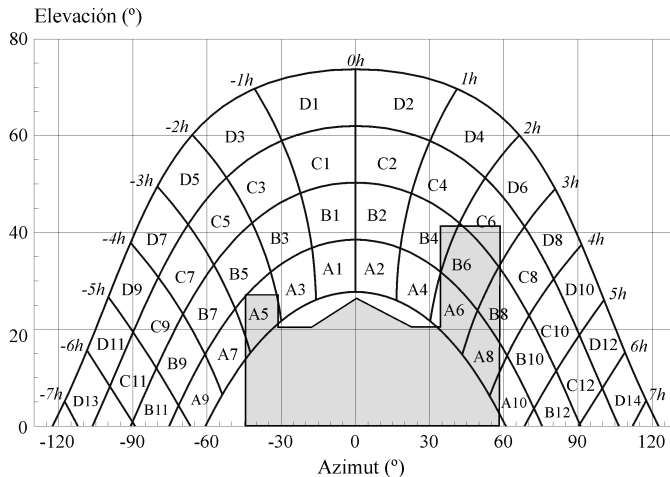
Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Sombras Cercanas: sistemas
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones



Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

Resumen

Sombras entre filas

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

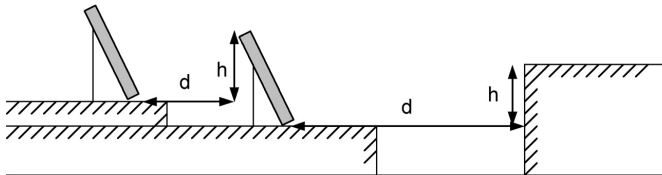
Sombras Cercanas: sistemas
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen



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:

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

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas estáticos

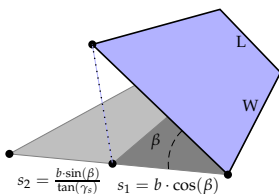
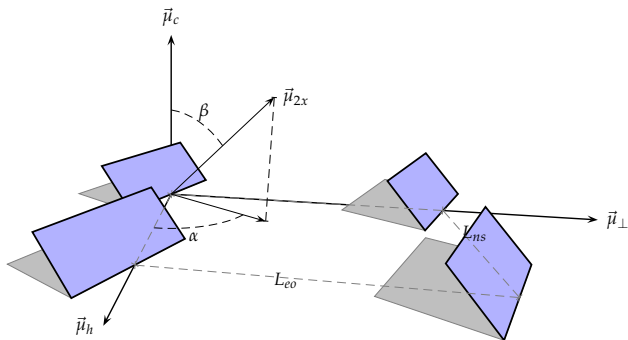
Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

Resumen

Separación de seguidores Doble Eje



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

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

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

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

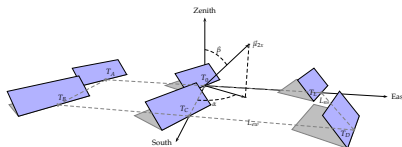
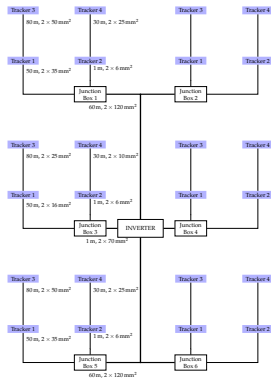
Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Radiación promedio

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



SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

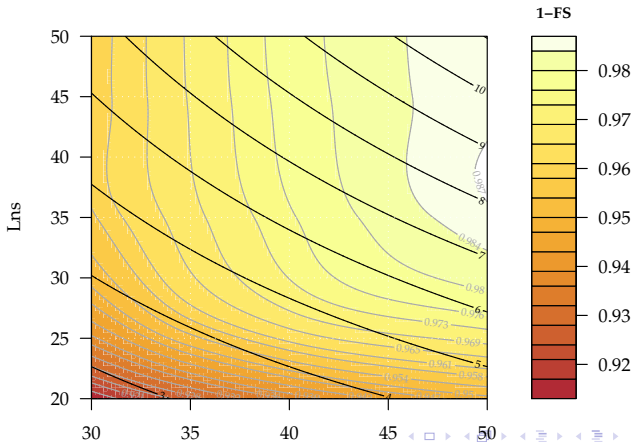
Elección de separaciones

Resumen

Separación de Seguidores Doble Eje

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

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



SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistemas estáticos

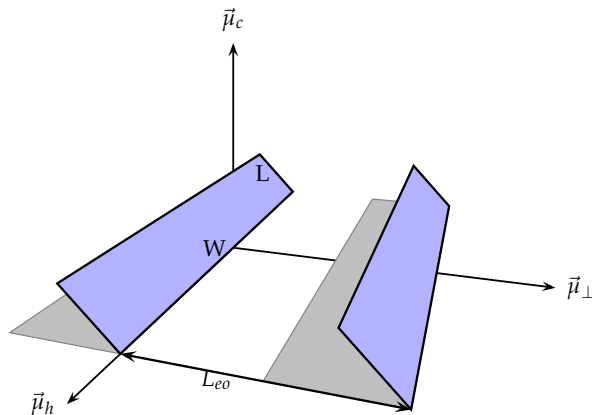
Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

Seguidores de eje horizontal NS

Elección de separaciones

Resumen

Separación de Seguidores Eje Horizontal



$$W = \infty$$

$$ROT = L_{eo}/L$$

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

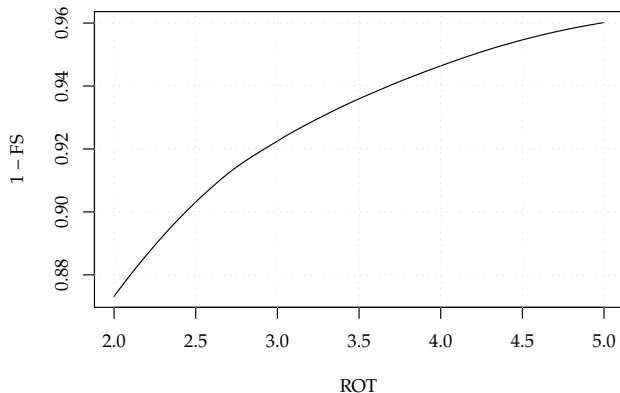
Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Separación de Seguidores Horizontal N-S



SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

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**.

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Backtracking

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

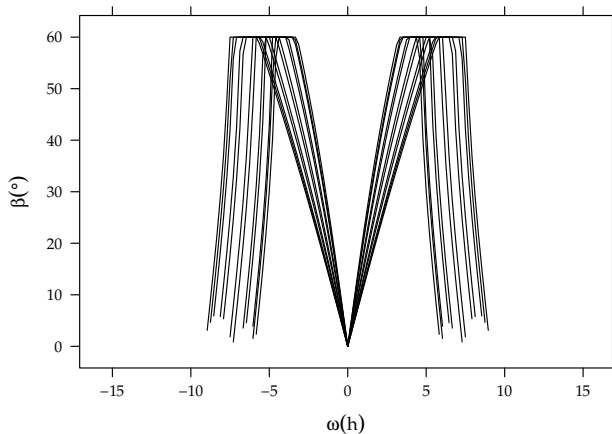
Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

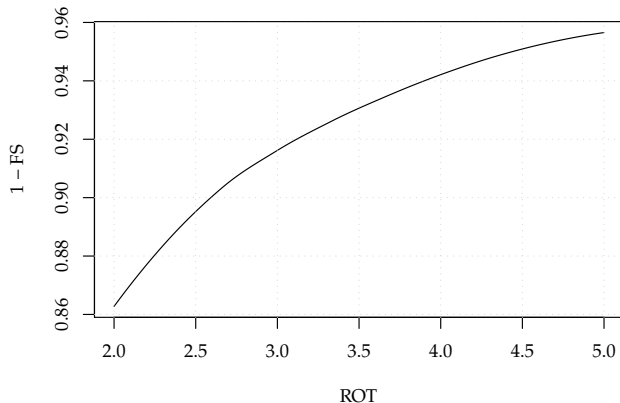
Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen



Separación con backtracking



SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

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

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

- Sombras Lejanas

- Sombras Cercanas: sistemas estáticos

- Sombras Cercanas: sistemas de seguimiento

- Seguidores de eje horizontal NS

- Elección de separaciones

Resumen

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).

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Elección de separaciones

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

- ▶ 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.)

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

ROT y Coste de la energía producida

► Coste Energía

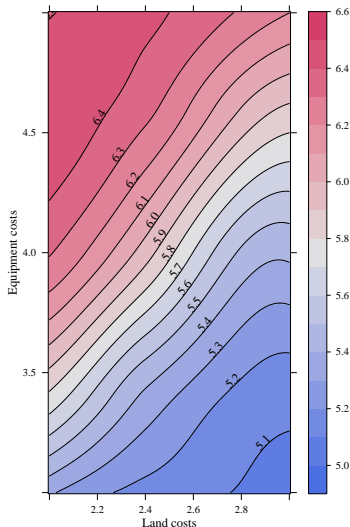
$$C_E = \frac{C_P}{E_{AC}}$$

► 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€/m² y 4€/m²



SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Sombras Lejanas

Sombras Cercanas: sistema
estáticos

Sombras Cercanas: sistemas
de seguimiento

Seguidores de eje horizontal
NS

Elección de separaciones

Resumen

Energía Producida por un SFCR

Sombras y ocupación de terreno

Resumen

Ocupación de terreno y productividad

SFCR:
Productividad y
Sombras

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

Energía Producida
por un SFCR

Sombras y
ocupación de
terreno

Resumen

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