

# Capítulo 4

## Modelo óptico del captador Fresnel

En este capítulo se explica el modelo óptico empleado para obtener el coeficiente de Factor de Sombra que llega a la planta en un momento determinado y que englobará tres factores:

- Sombras propias entre espejos.
- Pérdidas ópticas.
- Longitud del tramo del tubo receptor en sombra.

El Factor de Sombra en la planta será empleado como parámetro en el modelo de parámetros distribuidos del captador solar para conocer la temperatura de salida del fluido.

El modelo óptico que se describe, ha sido aplicado al captador situado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, pero podría aplicarse a cualquier sistema de captación de este tipo. Todo **el desarrollo del modelo se ha implementado en EcosimPro® mediante el componente *Espejos*** que contiene diversas funciones encargadas de los cálculos que se explican a continuación, y serán estudiadas en profundidad en el capítulo 6.

Se requerirán como datos de entrada:

- Fecha completa: día, mes y año
- Hora local en decimal
- Orientación de la planta: longitud y latitud en grados
- Orientación del eje del captador con respecto al sur

Para la realización del modelo, los espejos primarios se van a suponer planos por tener un radio de curvatura elevado, y el diseño se va a realizar a partir del punto central, como se explicará más adelante.

Este modelo óptico es el resultado de la combinación de dos modelos: uno en dos dimensiones y otro en tres dimensiones, y permitirá calcular una serie de magnitudes que servirán de paso intermedio para la obtención del Factor de Sombra final.

### 4.1. Sistema de referencia

En primer lugar se va a definir el sistema de referencia adoptado y su posición respecto a los ejes geográficos. El campo solar está situado paralelo a la fachada Sur de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, pero esta fachada no está orientada puramente al Sur sino que tiene una desviación de  $12^{\circ} 3' 1''$  hacia el Oeste.

Los ejes de referencia adoptados para resolver el modelo óptico así como su origen se muestran en la Ilustración 11. En ella se tiene también la nomenclatura de cada fila y se observa también la desviación del campo solar respecto al Sur comentada anteriormente.

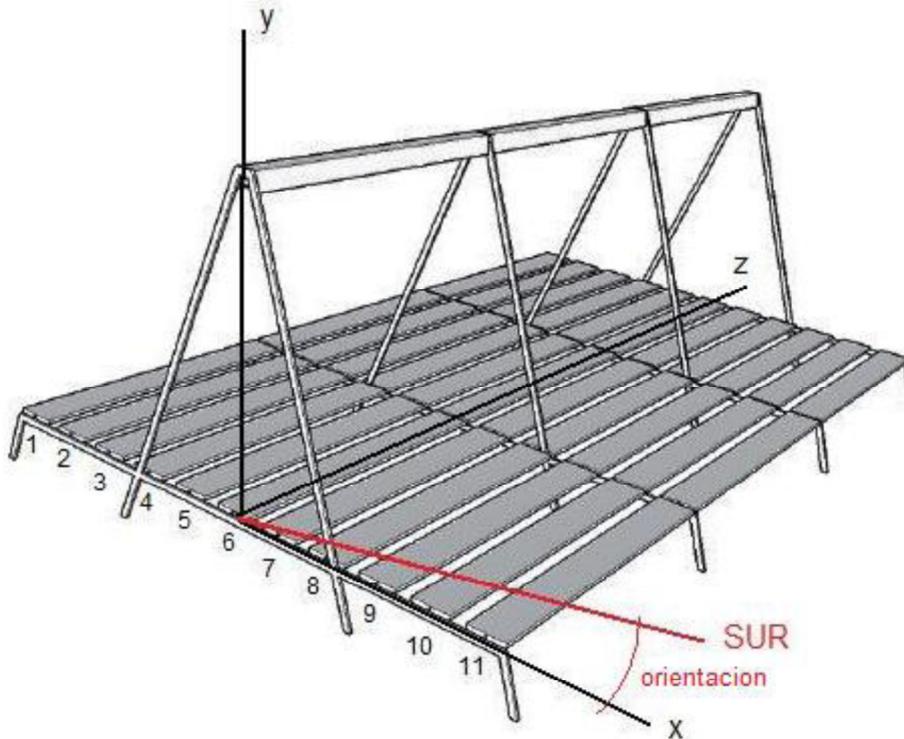


Ilustración 11. Sistema de referencia, numeración de filas de espejos y orientación del campo solar

Cada fila mide 0,5 metros de ancho y están separadas unas de otras por una distancia de 0,2 metros. El eje X es paralelo a la dirección del lado corto de los espejos por lo que el largo de los espejos corresponde con la dirección del eje Z. La altura se cuantificará con el eje Y. El tubo absorbedor está situado 4 metros por encima de los espejos. El origen de coordenadas se ha situado en el centro de la fila número 6 (fila central), por lo que el tubo es paralelo al eje Z, y en el extremo Oeste del sistema de captación.

En la ilustración 12, se representa de forma esquemática uno de los espejos con los parámetros solares necesarios para los cálculos que se van a realizar, así como los ejes de referencia, los ejes geográficos y la inclinación del espejo. El ángulo “O” se corresponde con la orientación del eje X respecto al Sur.

Se definen el vector incidencia solar  $\vec{l}$ , y los ángulos azimut solar, elevación solar y el ángulo de inclinación de espejo (que será igual para toda la fila correspondiente). El azimut solar, es la distancia angular entre el Sur y la proyección del Sol sobre el horizonte, mientras que la elevación solar es la distancia angular entre el horizonte y la posición del Sol.

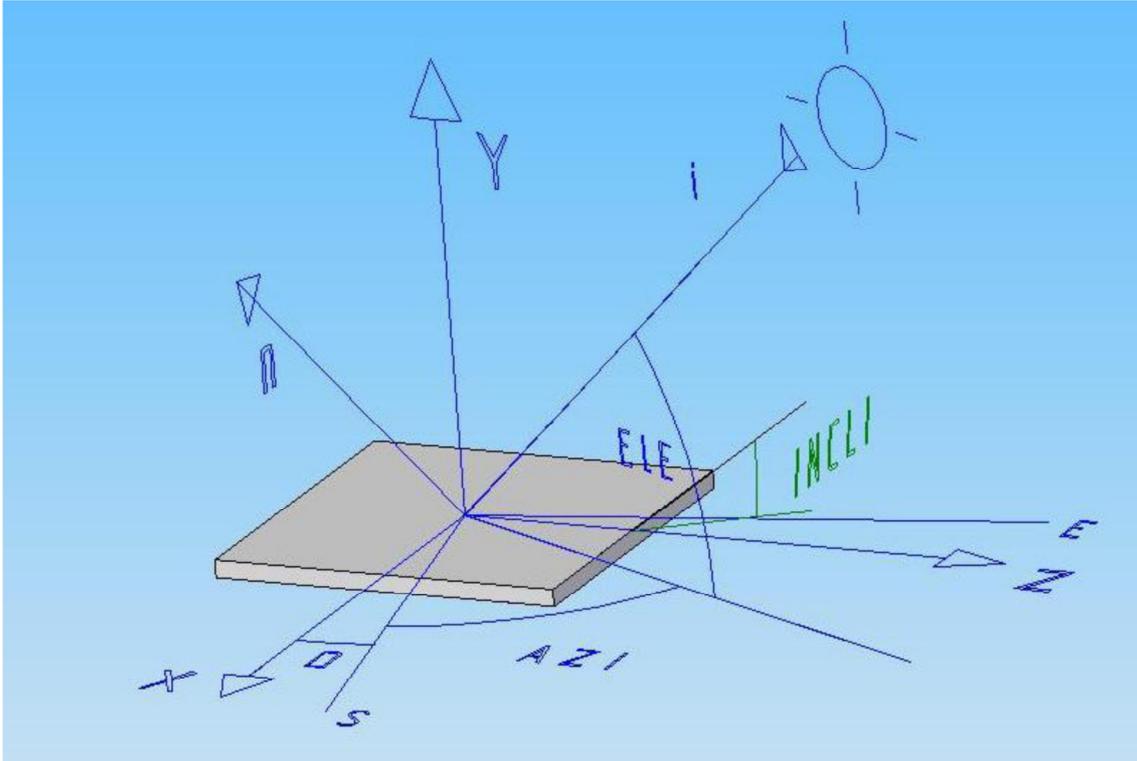


Ilustración 12. Parámetros solares

## 4.2. Cálculos del modelo

Una vez definido el sistema de referencia en base al cual se obtendrán los parámetros solares necesarios, procedemos a explicar el cálculo de los mismos.

En primer lugar, se realizará el cálculo de una serie de parámetros intermedios, para después poder calcular los tres factores principales que integran el Factor de Sombra y que representan las sombras entre espejos, sombra en tubo receptor y las pérdidas de radiación solar o pérdidas ópticas.

### 4.2.1. Cálculo de parámetros solares previos

Ángulo diario (radianes): Es el arco del ecuador celeste comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro.

$$A_{dia} = \frac{2\pi \cdot (Día - 1)}{365}$$

La variable *Día* es el día juliano para el año correspondiente en el que nos encontramos. Por tanto, es un número entre 1 y 365 en año normal, o entre 1 y 366 si es año bisiesto.

Ecuación del tiempo: Expresa la diferencia existente entre la longitud del día terrestre, constante, y la longitud del día solar, variable, a lo largo del año.

$$E_t = 229,18. (0,000075 + 0,001868. \cos(A_{dia}) - 0,032077. \sen(A_{dia}) - 0,014615. \cos(2. A_{dia}) - 0,04089. \sen(2. A_{dia}))$$

Hora solar: También denominada hora aparente local u hora solar verdadera.

$$H_{sol} = H_{loc} - H_{luz} + 4. (L_{est} - L_{loc}) + E_t$$

Donde:

- $H_{loc}$ : Hora local, también llamada hora media local.
- $H_{luz}$ : Corrección de la hora solar debida tanto al ahorro de luz de día mediante desfase horario, como el cambio de hora local respecto al meridiano estándar. Tiene el valor de 2 desde abril hasta octubre y el valor 1 desde noviembre hasta marzo.
- $L_{est}$ : Longitud del meridiano estándar, Este (+) u Oeste (-) respecto a Greenwich. En Sevilla su valor es de 0 grados.
- $L_{loc}$ : Longitud local, en Sevilla 6 grados.
- $E_t$ : ecuación del tiempo, definida anteriormente.

Declinación solar (radianes): Es el ángulo formado por el vector Tierra – Sol y el plano ecuatorial celeste, variando desde  $-23$  grados 27 minutos en el Solsticio de invierno (Sol situado al Sur) a 23 grados 27 minutos en el Solsticio de verano (Sol situado al Norte), pasando por un valor nulo en los Equinoccios.

$$Dec = 57,2958. (0,006918 - 0,399912. \cos(A_{dia}) + 0,070257. \sen(A_{dia}) - 0,006758. \cos(2. A_{dia}) + 0,000907. \sen(2. A_{dia}) - 0,002697. \cos(3. A_{dia}) + 0,00148. \sen(3. A_{dia}))$$

Ángulo horario (grados sexagesimales): Expresión en grados de la hora solar. Cada hora equivale a 15 grados, con el origen en el mediodía y tomando valores positivos antes del mediodía y negativos después.

$$A_{hor} = (12 - H_{sol}).15$$

Elevación solar (grados sexagesimales): Es la distancia angular entre el horizonte y la posición del Sol. Este ángulo toma valores entre 0 y 90 grados.

$$Ele = \text{arc sen}(\sen(Dec) \cdot \sen(Lat) + \cos(Dec) \cdot \cos(Lat) \cdot \cos(A_{hor}))$$

El término  $Lat$  corresponde a la latitud local en grados, que para Sevilla tiene un valor de 37,41 grados.

Azimet solar (radianes): Es la distancia angular entre el Sur y la proyección del Sol sobre el horizonte. Este ángulo toma valores entre  $-180$  y  $180$  grados, siendo positivo en dirección S-E-N, negativo en dirección S-O-N y nulo al coincidir la proyección con el Sur. El Azimet solar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Azi = \text{arc cos} \left( \frac{\sen(Ele) \cdot \sen(Lat) - \sen(Dec)}{\cos(Ele) \cdot \cos(Lat)} \right)$$

Hay que efectuar una corrección en función del ángulo horario: Si  $A_{hor} > 0$  entonces  $A_{zi} = -A_{zi}$ .

## 4.2.2. Cálculo del Factor de Sombra

Como hemos comentado anteriormente, **en el cálculo final del factor de sombra intervienen tres factores diferentes: sombras entre espejos, pérdidas ópticas y porcentaje del tubo captador en sombra.** Los dos primeros se calcularán mediante un modelo geométrico de dos dimensiones, mientras que para calcular la sombra en el tubo hará falta realizar los cálculos en un modelo de tres dimensiones. Pasamos a explicar a continuación ambos modelos.

### 4.2.2.1. Modelo 2D

En este modelo emplearemos únicamente los ejes X e Y del sistema de referencia definido en las ilustraciones 11 y 12. En primer lugar se va a calcular la inclinación de cada una de las 11 filas de espejos, para después calcular las sombras entre ellos y las pérdidas ópticas producidas.

Inclinación de las filas de espejos: posición de las 11 filas de espejos en un instante y día determinados. Como los espejos tienen un sistema de seguimiento según el eje Z, con el objetivo de variar su inclinación según la Elevación solar, se proyecta los vectores de incidencia y reflexión solar en los ejes X e Y. En la siguiente figura se muestra un esquema de las magnitudes asociadas a un captador Fresnel necesarias para el cálculo del ángulo de inclinación.

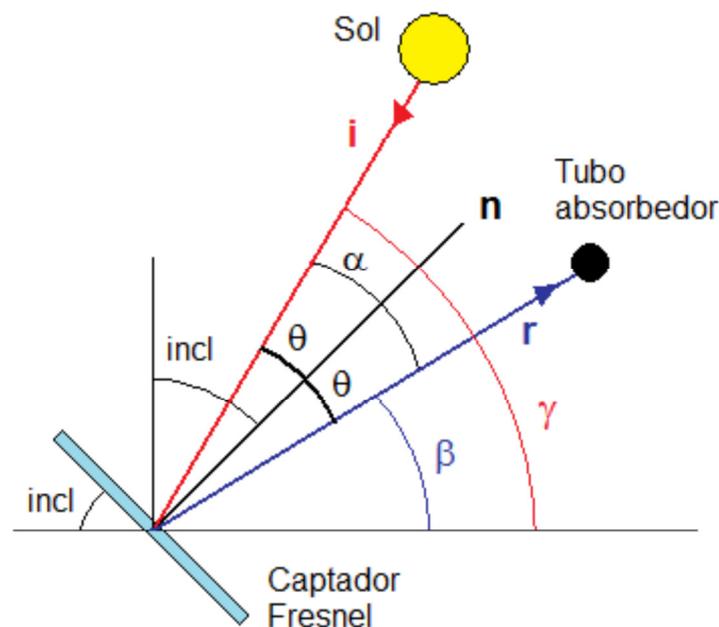


Ilustración 13. Esquema en dos dimensiones de un captador Fresnel y las magnitudes asociadas

Atendiendo a la ilustración 12, el valor que toma el vector de incidencia solar  $\vec{i}$  en dos dimensiones, va a depender del valor que tome el azimut solar a lo largo del día, distinguiéndose entre 3 casos:

1)  $Azi \leq 0$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientación) \\ \sin(Ele) \end{bmatrix}$$

2)  $0 < Azi < Orientación$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(Orientación - Azi) \\ \sin(Ele) \end{bmatrix}$$

3)  $Azi > Orientación$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientación) \\ \sin(Ele) \end{bmatrix}$$

El ángulo  $\gamma$  es el ángulo que forma el vector  $\vec{i}_{2D}$  con respecto a la horizontal (Eje X).

Una vez calculado el vector incidencia, se impone que el vector con el que se refleja la radiación solar en los espejos lleve la dirección desde el espejo al tubo absorbedor. Según el origen de coordenadas, en el modelo 2D el tubo absorbedor se encuentra en el punto  $(X_t, Y_t) = (0, 4)$ , ya que está situado 4 metros por encima de los espejos y tiene coordenada  $X=0$  por estar situado en el origen del eje X. Haciendo el cálculo para el punto medio de los espejos, cada fila tendrá la posición  $(X_E, Y_E) = (X_E, 0)$ . El valor de  $X_E$  para cada fila se muestra en la siguiente tabla.

Fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$X_E$ (metros)	-3,5	-2,8	-2,1	-1,4	-0,7	0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5

Tabla 5. Posiciones de los centros de las filas de espejos en el eje X

Así, el vector del reflejo de la radiación solar se calcula de la siguiente forma:

$$\vec{r}_{2D} = \begin{bmatrix} r_{2Dx} \\ r_{2Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_t - X_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2}} \\ \frac{Y_t - Y_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2}} \end{bmatrix}$$

Se ha definido como un vector unitario y se calcula como destino menos origen dividido por el módulo de la distancia.

El ángulo que forma el vector reflejo con la horizontal es el ángulo  $\beta$  y se calcula como sigue:

$$\beta = \arctan\left(\frac{r_{2Dy}}{\text{abs}(r_{2Dx})}\right)$$

Para calcular el ángulo  $\alpha$ , ángulo entre el vector solar incidente y el vector reflejado, sabemos que el producto escalar de dos vectores es igual al módulo del primero por el módulo del segundo por el coseno del ángulo que forman ambos vectores. Tomando como vectores  $\vec{l}_{2D}$  y  $\vec{r}_{2D}$  y teniendo en cuenta que este último es unitario, obtenemos el valor de  $\alpha$  como:

$$\vec{l}_{2D} \cdot \vec{r}_{2D} = |\vec{l}_{2D}| \cdot |\vec{r}_{2D}| \cdot \cos(\alpha) \rightarrow \alpha = \arccos\left(\frac{\vec{l}_{2D} \cdot \vec{r}_{2D}}{|\vec{l}_{2D}|}\right)$$

Por la ley de la reflexión en un espejo, el ángulo con el que incide el rayo es el mismo que con el que se refleja. Por lo tanto el ángulo de reflexión será la mitad del calculado anteriormente (mirar Ilustración 13).

$$\theta = \frac{\alpha}{2}$$

Una vez calculados los ángulos anteriores, podemos pasar ya a calcular la inclinación de cada espejo por trigonometría. Se deben distinguir varios casos:

1)  $X_E < 0$  (Filas 1-5)

a)  $\gamma \geq \beta \rightarrow incl = \frac{\pi}{2} - \beta - \theta$

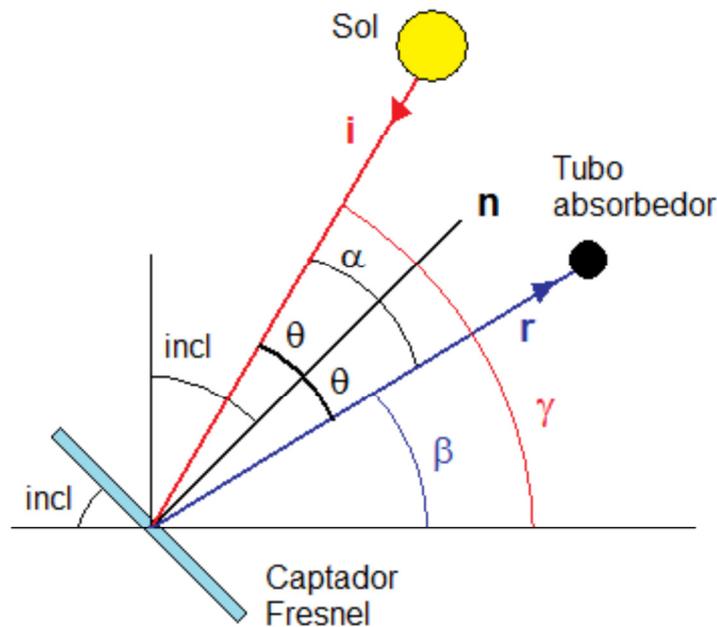


Ilustración 14. Inclinación: caso  $X_E < 0$  y  $\gamma \geq \beta$

b)  $\gamma < \beta \rightarrow incl = \frac{\pi}{2} - \beta + \theta$

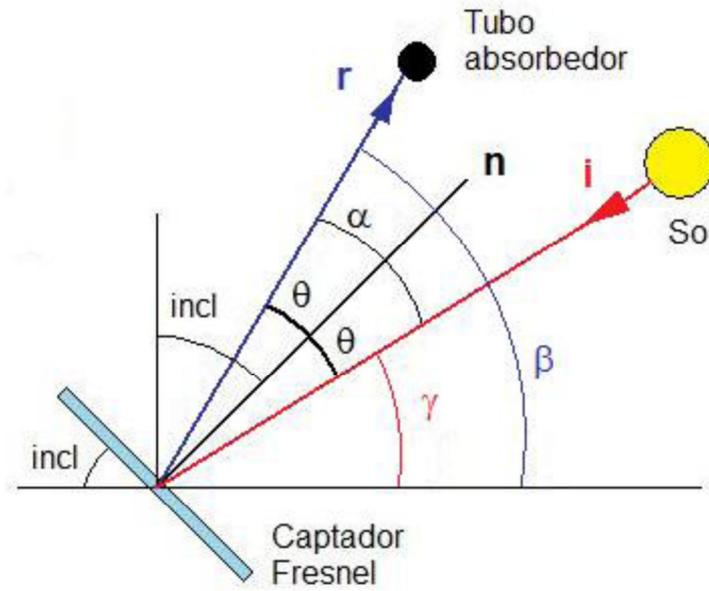


Ilustración 15. Inclinación: caso  $X_E < 0$  y  $\gamma < \beta$

2)  $X_E = 0$  (Fila 6)  $\rightarrow incl = \theta$

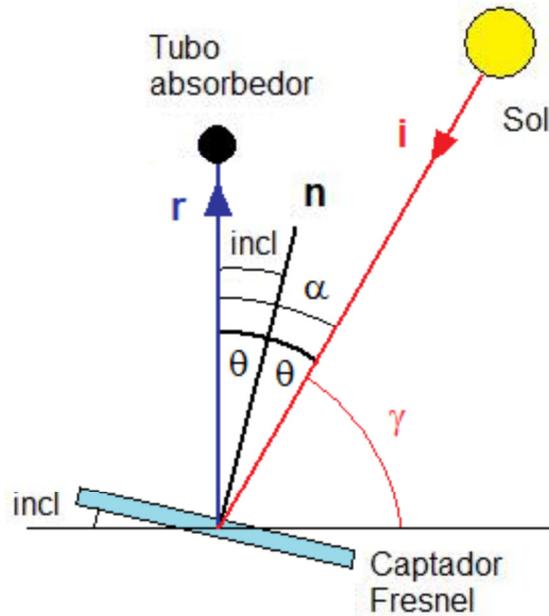


Ilustración 16. Inclinación: caso  $X_E = 0$

En este caso, el vector reflejo es perpendicular a la horizontal porque el tubo absorbedor está justo encima del centro del espejo.

$$3) \text{ XE} > 0 \text{ (Filas 7-11)} \rightarrow \text{incl} = \beta + \theta - \frac{\pi}{2}$$

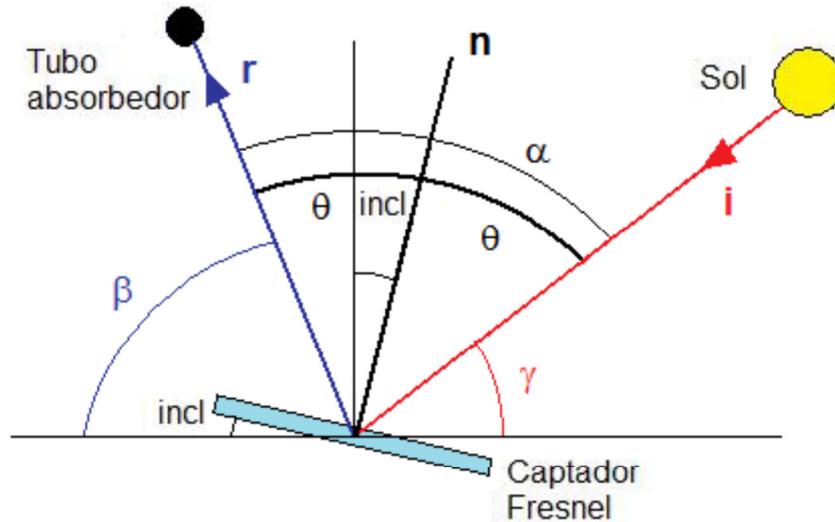


Ilustración 17. Inclinación: caso  $X_E > 0$

Tras estos cálculos se conoce el ángulo de inclinación para cada fila de espejos, para cualquier día y a cualquier hora. **Los valores positivos para la inclinación se han definido en el sentido de Norte a Sur según las agujas del reloj si miramos el captador desde el lado Oeste de la planta donde se encuentra el origen del sistema de referencia.**

Sombras propias entre espejos: una vez conocidas las inclinaciones de las filas de espejos a lo largo del día, con el modelo en dos dimensiones se van a calcular también las sombras propias entre las filas de espejos, es decir, las sombras que pueden producir unos espejos sobre otros.

Una vez conocida el área sombreada, se dividirá entre la superficie reflectora total obteniéndose así un factor al que se denominará *factor de sombras propias* ( $f_{\text{sombra}}$ ). Este cálculo se realiza en dos dimensiones porque la componente azimutal del Sol sólo afectará a los espejos situados en los extremos, es decir, si el azimut es menor que cero, sólo afectará a los espejos situados en el extremo Este. Como cada módulo reflector mide 4 metros de largo, y teniendo en cuenta que hay 16 módulos por cada fila (64 metros), se van a despreciar los efectos de borde en el primer espejo de los extremos. Así mismo se va a suponer en estos cálculos que los espejos son prácticamente planos, ya que tienen un radio de curvatura muy elevado. Se calculará para cada fila la posible sombra que le produce la fila inmediatamente siguiente en número, es decir, la siguiente fila hacia el Sur, debido a la posición solar.

Para estos cálculos debemos distinguir varios casos según si los espejos tienen inclinación positiva o si tienen inclinación negativa.

- **CASO 1:** Fila con inclinación positiva y fila siguiente con inclinación positiva.

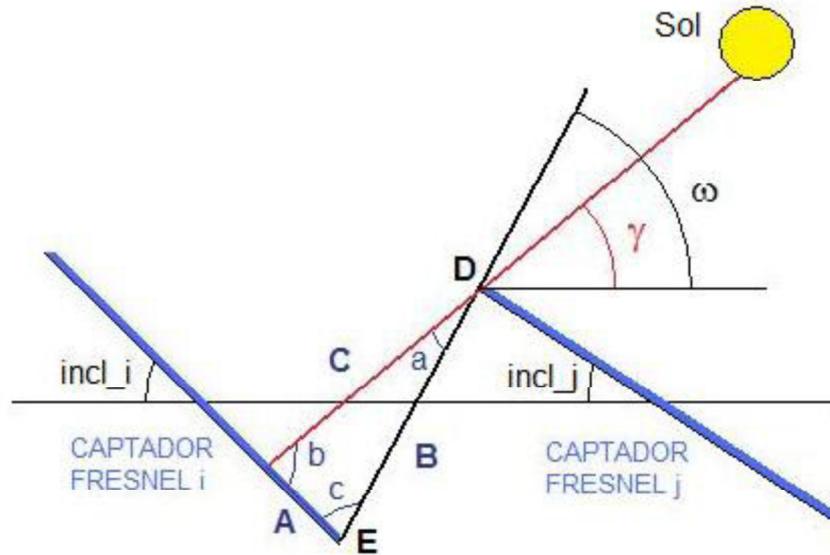


Ilustración 18. Sombras propias: ambas filas con inclinación positiva

Como puede observarse en la figura, se definen los puntos de los extremos de los espejos que son conocidos, en este caso los puntos D y E:

$$E = \begin{pmatrix} X_E(i) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_i) \\ -\frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(\text{incl}_i) \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} X_E(j) - \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_j) \\ \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(\text{incl}_j) \end{pmatrix}$$

Donde *ancho* es el ancho del espejo con un valor de 0,5 metros. A continuación se construye el vector  $\overrightarrow{ED}$  restando al punto final (D) el punto inicial (E):  $\overrightarrow{ED} = E - D$ . Calculando el módulo de dicho vector  $\overrightarrow{ED}$  se conoce la distancia del punto E al punto D, y por tanto se conoce el lado B del triángulo formado por dicho lado, A y C (mirar Ilustración 18), en el que el lado A corresponde al área sombreada sobre la fila i debido a la fila j.

El vector  $\overrightarrow{ED}$  forma un ángulo  $\omega$  con la horizontal, que se calcula como el arco tangente del cociente entre la componente 'y' y la componente 'x' del vector  $\overrightarrow{ED}$ . Si el ángulo  $\gamma$  que forma el vector incidencia solar en 2D es menor que el ángulo  $\omega$  habrá sombra. En caso contrario, no se producirá sombra de la fila j sobre la fila i.

En el caso en que se produzca sombra, se aplicará el Teorema del seno para calcularla. En la figura se han nombrado los ángulos  $\hat{a}$  y  $\hat{b}$ , ambos conocidos ya que  $\hat{a} = \omega - \gamma$  y  $\hat{b} = \text{incl} - \gamma$ . El Teorema del Seno para el triángulo ABC es el siguiente:

$$\frac{A}{\text{sen}(\hat{a})} = \frac{B}{\text{sen}(\hat{b})} = \frac{C}{\text{sen}(\hat{c})}$$

Por lo tanto, el lado A del área sombreada se calcula despejando:

$$A = \frac{\text{sen}(\hat{a})}{\text{sen}(\hat{b})} \cdot B$$

Para obtener el área sombreada de cada fila  $i$ , multiplicamos A por el largo del módulo reflector (4 metros) y por el número de módulos reflectores para cada fila (16).

- **CASO 2:** Fila con inclinación positiva y fila siguiente con inclinación negativa.

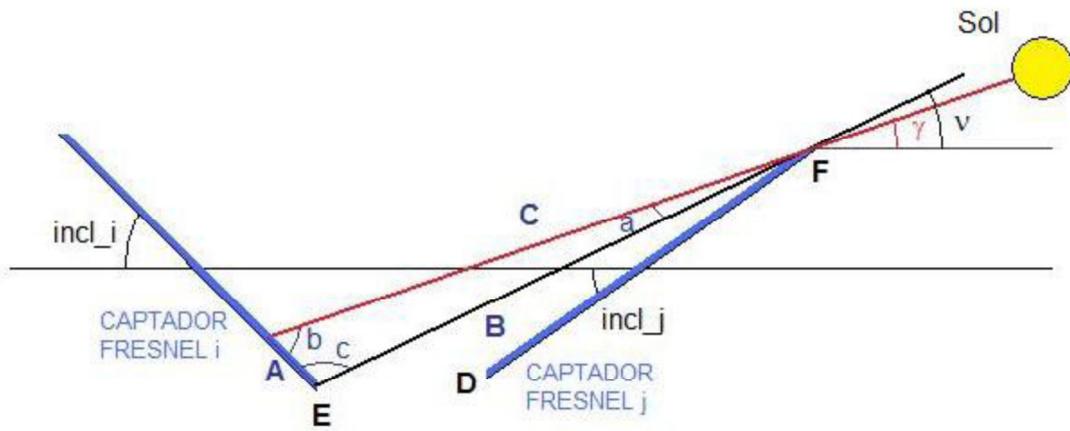


Ilustración 19. Sombras propias: una fila con inclinación positiva y la siguiente con inclinación negativa

En este caso se van a definir los puntos E (igual que anteriormente) y F:

$$E = \begin{pmatrix} X_E(i) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_i) \\ -\frac{\text{ancho}}{2} \cdot \cos(\text{incl}_i) \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} X_E(j) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_j) \\ \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \cos(\text{incl}_j) \end{pmatrix}$$

Ahora se calcula el vector  $\overrightarrow{EF}$ , su módulo (lado B del triángulo) y el ángulo que forma con la horizontal, denominado  $\nu$ , de forma similar a como se hizo en el caso anterior con el vector  $\overrightarrow{ED}$ . Según la nueva nomenclatura, se producirá sombra si  $\gamma$  es menor que  $\nu$ . Ahora el ángulo  $\hat{a}$  se calcula de la siguiente forma:  $\hat{a} = \nu - \gamma$ . El resto de los cálculos son iguales que los que se hicieron en el caso anterior.

- **CASO 3:** Fila con inclinación negativa y fila siguiente con inclinación negativa.

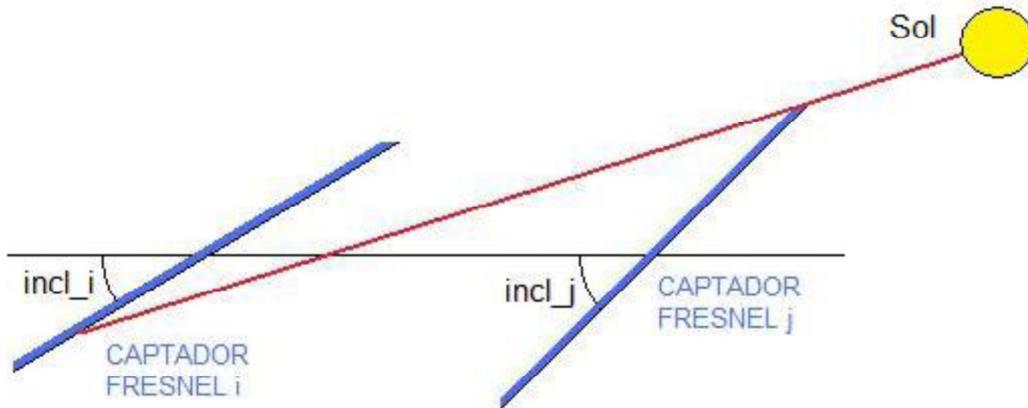


Ilustración 20. Sombras propias: ambas filas con inclinación negativa

Como puede observarse en la figura, en este caso no se produce sombra de una fila a otra, luego  $A=0$ .

Llevando a cabo este procedimiento para las filas de la 1 a la 10, (en la fila 11 no se producen sombras debido a que es la última fila), se obtiene el área sombreada total, y dividiéndola por el área reflectora total (352 m<sup>2</sup>) se obtiene la proporción de sombra en tanto por 1. Como esta proporción de sombra influirá directamente sobre la radiación total que llegue al tubo absorbedor, una vez calculada la radiación teórica habrá que multiplicarla por varios factores, entre ellos un factor de sombras propias.

$$\text{proporción de sombra} = \frac{\text{área sombreada}}{\text{área total}}$$

$$f_{\text{sombra}} = 1 - \text{proporción de sombra}$$

Pérdidas ópticas: Para calcular la radiación real que llega al tubo absorbedor desde los espejos hay que tener en cuenta también las pérdidas ópticas. La radiación solar incidente podría ser totalmente aprovechada si ésta llegara a los espejos en dirección perpendicular a los mismos, sin embargo, esto realmente no va a ser así porque los espejos se colocan de manera que la radiación reflejada vaya al tubo absorbedor. Por lo tanto se produce una pérdida de radiación directa que será cuantificada mediante el ángulo  $\delta$ , que es el ángulo que forma el espejo con la normal al vector incidencia solar. El factor de pérdidas ópticas será el coseno del ángulo  $\delta$ .

Habrá que distinguir dos casos, según el espejo tenga inclinación positiva o negativa.

- **CASO 1:** Inclinación positiva. Como puede observarse en la Ilustración 21, el ángulo  $\delta$  puede calcularse según la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \gamma - \text{incl}$$

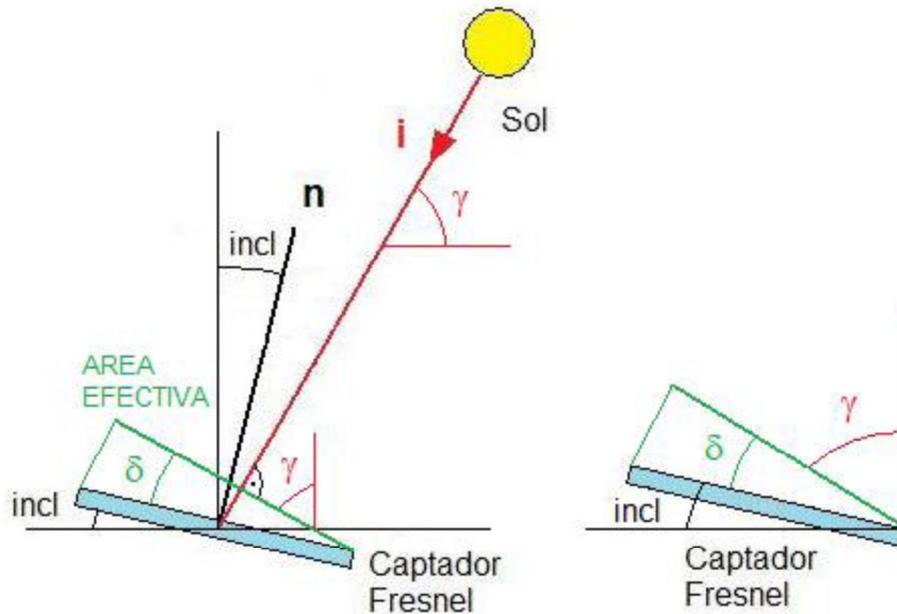


Ilustración 21. Ángulo  $\delta$  necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación positiva

- **CASO 2:** Inclinación negativa. Esta situación se muestra en la Ilustración 22, obteniéndose un valor para  $\delta$  de:

$$\delta = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - incl\right) - \gamma = \frac{\pi}{2} + incl - \gamma$$

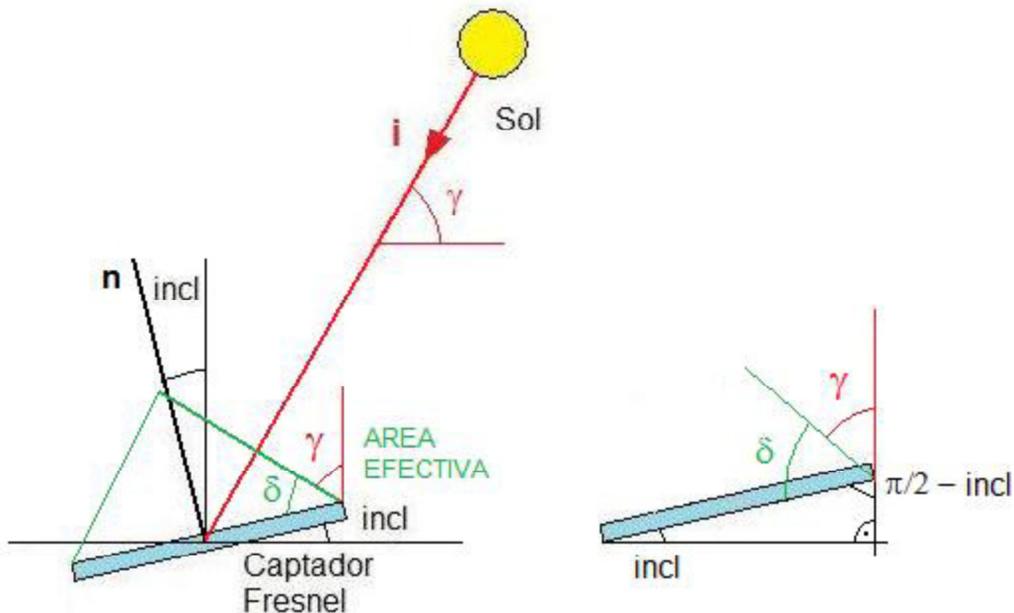


Ilustración 22. Ángulo  $\delta$  necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación negativa

Realizando los cálculos anteriores para las 11 filas del campo, obtendremos 11 factores de pérdidas ópticas diferentes. Como valor de referencia para calcular el Factor de Sombra, escogeremos el de mayor valor de los 11, es decir, el correspondiente a la fila en la cual las pérdidas ópticas sean menores.

### 4.2.2.2. Modelo 3D

En el modelo 2D hemos calculado la inclinación de cada fila de espejos, que nos servirá para calcular la longitud de tubo absorbedor que no está iluminado debido a la componente azimutal solar en cada instante de tiempo, ya que esto afectará a la radiación incidente sobre el tubo. Para ello hay que realizar un modelo en tres dimensiones, ya que ahora hay que tener en cuenta también la componente azimutal del Sol.

Los ejes de coordenadas para este modelo 3D se mostraban en la Ilustración 11. El eje Z varía de 0 a 64 metros que es la longitud total del tubo absorbedor y por tanto del campo solar.

En primer lugar, es necesario calcular las 3 componentes del vector incidencia solar y del vector reflejado.

Teniendo en cuenta la Ilustración 12, el vector incidencia solar  $\vec{l}_{3D}$  para los distintos casos según el valor que tenga el Azimut solar es:

1)  $Azi \leq 0$

$$\vec{l}_{3D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientación) \\ \sin(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \sin(-Azi + Orientación) \end{bmatrix}$$

2)  $0 < Azi < Orientación$

$$\vec{l}_{3D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(Orientación - Azi) \\ \sin(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \sin(Orientación - Azi) \end{bmatrix}$$

3)  $Azi > Orientación$

$$\vec{l}_{3D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(Orientación - Azi) \\ \sin(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \sin(Orientación - Azi) \end{bmatrix}$$

El vector  $\vec{r}_{3D}$  es el reflejo del rayo solar con dirección desde el espejo hasta el tubo absorbedor, y se calcula como la diferencia entre el destino y el origen dividido todo por el módulo de la distancia, siendo así un vector unitario. Se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{r}_{3D} = \begin{bmatrix} \frac{X_t - X_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \\ \frac{Y_t - Y_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \\ \frac{Z_t - Z_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \end{bmatrix}$$

$X_E$ ,  $Y_E$  y  $Z_E$  son las coordenadas X, Y, Z del espejo (la coordenada Y de todos los espejos es nula).  $X_E$  tiene los valores mostrados en la Tabla 5 y para  $Z_E$  se van a tomar sólo dos valores correspondientes al extremo Este ( $Z_E= 64$ ) y al Oeste ( $Z_E= 0$ ), que son los que van a definir la sombra existente en el tubo absorbedor antes y después del mediodía solar respectivamente.  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $Z_t$  son las coordenadas del punto del tubo absorbedor donde llega el vector reflejo, las coordenadas en X e Y son conocidas ( $X_t=0$ ,  $Y_t=4$ ), pero no se conoce la coordenada en Z, que es la coordenada que va a definir la sombra sobre el tubo absorbedor.

Según el sistema de coordenadas definido, el vector normal a cada espejo es:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \text{sen}(incl) \\ \text{cos}(incl) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Por la ley de reflexión en los espejos, el ángulo con el que incide el rayo solar es el mismo con el que debe reflejarse. Por lo tanto debe cumplirse la siguiente igualdad de productos vectoriales:

$$\vec{r}_{3D} \times \vec{n} = \vec{n} \times \vec{r}_{3D}$$

Imponiendo la igualdad de productos vectoriales se obtiene un valor de  $Z_t$ , a partir del cual se calcula la sombra, a la que llamaremos *tramo no iluminado*, de la siguiente forma para cada fila:

- Cuando la sombra se produce por el lado Este ( $Z_E= 64$ ):

$$\text{Tramo no iluminado}_{\text{fila}} = \text{Longitud total} - Z_t$$

- Cuando la sombra se produce por el lado Oeste ( $Z_E= 0$ ):

$$\text{Tramo no iluminado}_{\text{fila}} = Z_t$$

La longitud total corresponde a la longitud total del tubo absorbedor, y tiene un valor de 64 metros. En ambos casos se están calculando 11 valores de la sombra (uno para cada fila de espejos) que variarán muy poco entre ellos. Para poder proporcionar un valor aproximado del tramo de tubo no iluminado y el porcentaje de tubo iluminado de utilizará el *valor medio* de las 11 filas.

Una vez calculada la longitud media de tubo no iluminado, se calcula el factor de corrección por tubo no iluminado,  $f_{tni}$ , restándole a la longitud total del tubo absorbedor el tramo de tubo no iluminado, y dividiendo todo por la longitud total del tubo absorbedor.

$$f_{tni} = \frac{\text{Longitud total} - \text{tramo no iluminado}}{\text{Longitud total}}$$

### 4.2.2.3. Factor de Sombra

El Factor de Sombra final a tener en cuenta en el modelo de parámetros distribuidos, será el producto de los tres factores calculados anteriormente que se corresponden con las sombras propias entre espejos ( $f_{sombra}$ ), el factor de pérdidas ópticas ( $\max(\cos(\delta_i))$ ), y el factor de corrección por tubo no iluminado ( $f_{mi}$ ).

$$\text{Factor de sombra} = f_{sombra} \cdot \max(\cos(\delta_i)) \cdot f_{mi}$$

Señalar que en el cálculo de este factor, no se han tenido en cuenta las sombras que proyectan los obstáculos situados en torno al campo solar ni la sombra que el propio tubo receptor proyecta sobre los espejos primarios, por lo tanto su valor será algo mayor que el que existirá realmente.

**El Factor de Sombra, junto con otros factores de eficiencia y el porcentaje de espejos enfocados determinarán la radiación solar real que llegará al tubo absorbedor** procedente del campo de espejos.