

## **ASPECTOS ÓPTICO GEOMÉTRICOS DE UN CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAL PARA APLICACIONES TÉRMICAS\***

**M. Gea, L. Saravia, M. Altamirano, C. Placco, H. Bárcena y M. Hongn**  
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta  
e-mail: [marcelogea@gmail.com](mailto:marcelogea@gmail.com)

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan los aspectos óptico geométricos necesarios para el estudio de la radiación recibida por un concentrador Fresnel lineal, aplicados a un prototipo de 43 m<sup>2</sup>. Se elaboró un modelo que permite calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre los espejos, el ángulo de inclinación de cada espejo y la velocidad de rotación de éstos en función del tiempo. Se determinó el corrimiento sobre el eje del absorbedor de la radiación reflejada. Se aplicó el modelo para cálculos de estimación de la radiación directa necesarios para la modelización del sistema completo y se realizó una comparación de la radiación calculada con medidas experimentales. Se evaluó una novedosa propuesta de configuración geométrica para mejorar la eficiencia óptica.

**Palabras clave:** energía solar, concentrador Fresnel lineal, geometría solar, estimación de la radiación solar.

### **INTRODUCCIÓN**

En el Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO) se está estudiando desde hace unos años la tecnología de concentración Fresnel lineal (CFL). En 2007 se construyó un prototipo de 8 m<sup>2</sup> para la generación directa de vapor de agua. La realización del trabajo permitió adquirir una importante experiencia y generar las bases para el desarrollo de sistemas en escalas superiores. (Gea et al., 2007)

Durante 2008 ha sido ensayado un prototipo de 24 m<sup>2</sup> de espejos lineales, poniendo a punto sus partes. Este equipo mostró un funcionamiento correcto produciendo vapor a 140°C y una presión de 7 kg/cm<sup>2</sup>. En el absorbedor se obtuvieron temperaturas de hasta 200° C (Saravia, et al., 2008).

Desde 2009 se está ensayando un equipo de 43 m<sup>2</sup> formado por 9 filas de espejos (figura 1). Con él se probaron las distintas componentes del sistema: absorbedor, sistema de seguimiento y acumulador.



*Figura 1- Vista del concentrador Fresnel lineal de 43 m<sup>2</sup>*

### *Estudio geométrico*

Un estudio detallado de la óptica geométrica de un CFL permite encarar los distintos aspectos involucrados en el diseño y dimensionado del sistema: la razón de concentración, el aprovechamiento del área de suelo, la construcción de un sistema de seguimiento solar, etc. El análisis de la geometría solar es necesario también para elaborar un modelo de estimación de la

\*Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

radiación que recibe cada espejo en función del tiempo, teniendo en cuenta que éstos giran alrededor de un eje que no es paralelo al de la tierra, a una velocidad variable durante el día, y variable también en el transcurso del año.

Anteriormente se realizaron avances sobre el estudio geométrico de los prototipos de CFL desarrollados en el INENCO utilizando la ecuación de la elástica de los espejos y la marcha de rayos que concentran en el absorbedor (Gea et al., 2007). También se propuso un algoritmo simplificado para la determinación de las coordenadas del haz y del ángulo de rotación de los espejos (Salazar y Cadena, 2009).

En este trabajo se presenta el conjunto de aspectos óptico geométricos necesarios para el estudio completo de un CFL, tanto para el cálculo de la inclinación de los espejos como para el diseño geométrico global del sistema, aplicados al prototipo de 43 m<sup>2</sup>. Se determinaron las separaciones mínimas que deben existir entre los espejos. Se encontró la expresión para determinar la variación diaria del área no iluminada del absorbedor. Se desarrolló un soft que incluye el modelo de Hottel para estimar la radiación y se compararon los resultados del cálculo con medidas experimentales. Se evaluó una novedosa propuesta de configuración geométrica del CFL para mejorar la eficiencia óptica.

## RELACIONES GEOMÉTRICAS ENTRE LA POSICIÓN SOLAR Y EL PLANO DE LOS ESPEJOS

### Relaciones básicas y definición de los ángulos

La relación que vincula la dirección de la radiación directa con la inclinación del plano y demás ángulos es la siguiente (Duffie y Beckman, 2006):

$$\cos \Theta = \cos \Theta_z \cos b + \sin \Theta_z \sin b \cos(\sigma_s - \sigma) \quad (1)$$

$\Theta$  ángulo de incidencia, es el ángulo que forman la radiación directa que llega al plano y la normal al plano.

$\Theta_z$  ángulo cenital, es el ángulo que forman la radiación directa y la vertical del lugar.

$b$  inclinación del plano, es el ángulo que forma el plano del espejo con la horizontal.

$\sigma_p$  azimut del plano, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la normal al plano con el meridiano del lugar.

$\sigma$  azimut solar, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la radiación directa con el meridiano del lugar.

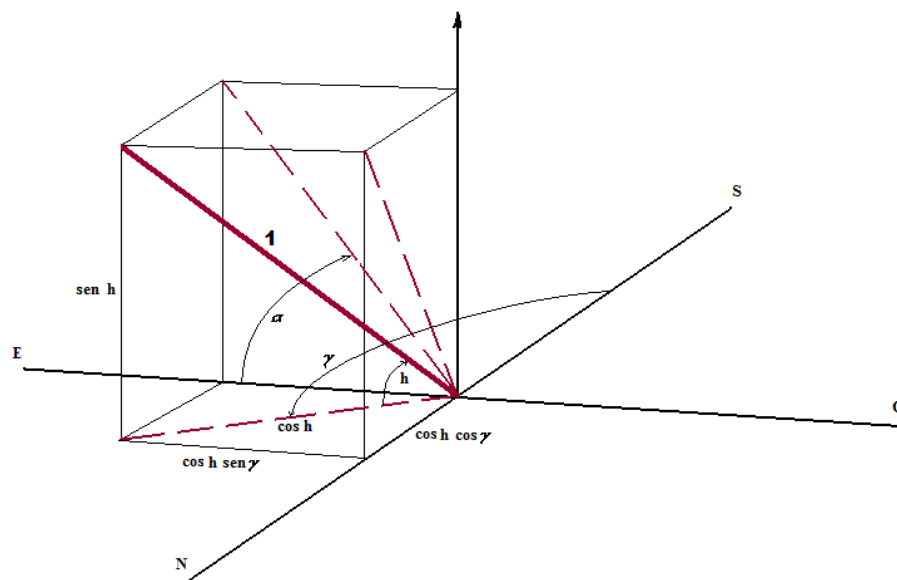


Figura 2: ángulos y proyecciones de un segmento de longitud unitaria de dirección igual a la radiación directa

En la figura 2 se representan con línea de trazos las proyecciones de la radiación directa en el plano horizontal y en los planos verticales Norte – Sur y Este – Oeste. Un segmento de longitud unitaria con dirección de la radiación directa tiene las siguientes coordenadas cartesianas:  $(\cos h \sin \sigma, \cos h \cos \sigma, \sin h)$ , donde  $h$  es la altura solar, igual a  $90 - \Theta$ .

Resulta de interés realizar el cálculo de los valores que debe tomar en cada instante ángulo de inclinación  $b$  de cada espejo para reflejar la radiación solar a un punto fijo (absorbedor) durante la rotación alrededor de su eje durante las horas de sol.

Como los ejes son horizontales y tienen una orientación Norte – Sur, el cálculo de  $b$  puede realizarse analizando las proyecciones de los rayos sobre el plano vertical Este – Oeste, que se representa en la figura 3.

Siendo  $\alpha$  el ángulo que forma la proyección de la radiación directa sobre el plano vertical EO (figura 2), éste se puede calcular como:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sen} h / (\cos h \operatorname{sen} \sigma) \quad ; \quad \alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{tg} h / \operatorname{sen} \sigma) \quad (2)$$

Durante el movimiento aparente del sol, los espejos deben inclinarse un ángulo  $b$  tal que los rayos reflejados de la radiación directa se mantengan en una dirección fija  $\alpha_{\text{refl}}$ , conocida para cada espejo. Con esta condición, y teniendo en cuenta que el ángulo de incidencia respecto a la normal debe ser igual al ángulo de reflexión, se puede calcular  $b$  a partir de la ecuación (3). Esta ecuación se obtiene analizando la marcha de rayos en la figura 3.

$$b = 90 - (\alpha_{\text{refl}} - \alpha) / 2 + \alpha \quad (3)$$

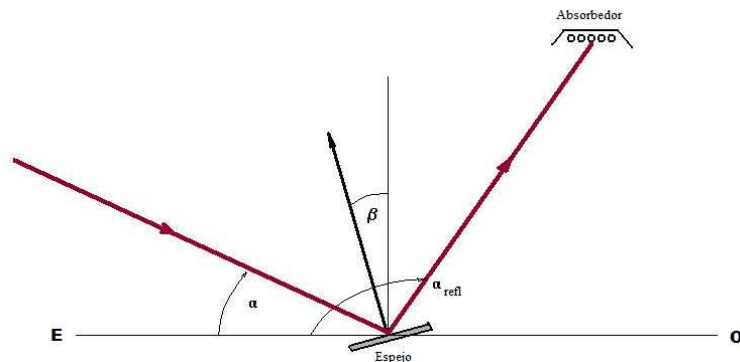


Figura 3: Proyección sobre el plano vertical EO de la radiación directa recibida y reflejada.

#### Determinación de la inclinación $b$ de cada plano

Con las ecuaciones (1), (2) y (3), se puede modelar la inclinación  $b$  de cada uno de los espejos en su movimiento de seguimiento al sol durante el día, para cualquier época del año. La secuencia de cálculo es la siguiente:

- a) Cálculo del ángulo de declinación solar para un día del año dado:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} (360 (284 + n) / 365) \quad (4)$$

$n$  = número de día del año

- b) Cálculo del ángulo cenital  $\Theta_z$  una vez definidos  $n$ , la latitud del lugar y el momento del día:

$$\Theta_z = \operatorname{arc} \cos (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta) \quad (5)$$

$\varphi$  = latitud del lugar

$\omega$  = ángulo horario (desplazamiento angular del sol debido a la rotación de la tierra)

- c) Cálculo del azimut solar  $\sigma$ :

$$\sigma = \operatorname{sign} (\omega) \operatorname{arc} \cos (\cos \Theta_z \operatorname{sen} \varphi - \operatorname{sen} \delta) / \operatorname{sen} \Theta_z \cos \varphi \quad (6)$$

- d) Cálculo de la proyección de la radiación directa sobre el plano vertical EO usando la ecuación (2)

- e) Cálculo de la inclinación  $b$  de cada plano para cualquier instante utilizando la ecuación (3).

Conociendo el valor de  $b$  para cada instante es posible calcular la dirección con la que llega la radiación solar a cada espejo del sistema. La simulación global del CFL está siendo realizada con el programa SIMUSOL (Alia et ál., inédito), el cual fue desarrollado especialmente para simplificar la simulación de sistemas solares térmicos. Para que pueda incorporarse a esta simulación el cálculo de la radiación incidente se codificó la secuencia de cálculo de  $b$  en una subrutina en lenguaje Fortran.

## DISEÑO GEOMETRICO GLOBAL DEL SISEMA

### Área de espejos

Para el diseño geométrico de un sistema Fresnel lineal es necesario definir cuál es la potencia térmica que se desea generar y cuál será la temperatura de trabajo del fluido. La potencia térmica es proporcional al área total de los espejos. La temperatura máxima de trabajo vendrá dada por la razón de concentración del sistema.

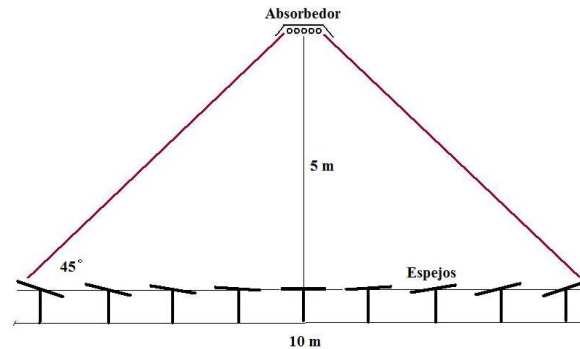


Figura 4: Esquema general del equipo. Los rayos reflejados de los extremos forman un ángulo de  $45^\circ$ .

En el caso del prototipo en estudio, el área de espejos es de  $43 \text{ m}^2$ . Este es un módulo replicable a mayores escalas cuyas dimensiones surgen principalmente de utilizar medidas comerciales de hierros de manera de minimizar los recortes. Por ello, cada espejo tiene 6 m de largo. Para la altura del absorbedor se toman también 6 m por la longitud comercial de los hierros y porque es una altura que no complica en demasía su instalación y mantenimiento. Teniendo en cuenta que la altura del absorbedor respecto a los espejos es de 5 m y proponiendo que los rayos que llegan al absorbedor no superen los 45 grados, el ancho disponible del equipo es de 10 m (ver figura 4).

### Separación entre espejos

Otro parámetro geométrico que debe considerarse para definir la configuración del sistema es la separación entre los espejos. De esta separación depende que los espejos no generen sombras entre ellos. La situación más desfavorable ocurre cuando las inclinaciones son grandes, en correspondencia con las posiciones del sol más alejadas del mediodía solar. A partir del modelo geométrico del sistema es posible calcular la inclinación de los espejos para cualquier instante. En la Figura 5 se muestra un esquema simplificado con la proyección sobre el plano vertical EO de la marcha de los rayos en dos espejos contiguos. Para ello se utilizó el soft de geometría Cabri II Plus, alimentado con los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  calculados con las ecuaciones (2) y (3).

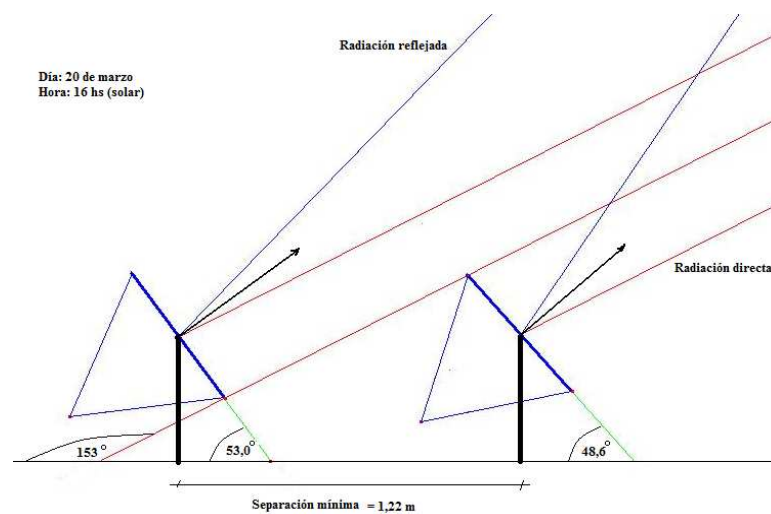


Figura 5: Separación mínima para que no se obstaculice la radiación directa entre dos espejos extremos

La elección de la separación de los espejos en el diseño debe considerar distintos factores. Separaciones grandes aseguran ausencia de sombreado, pero implican mayores costos por el uso de áreas de suelo más grandes y mayor altura del absorbedor

para una misma área de espejos. Esto significa que la separación óptima de los espejos debe surgir de una evaluación económica que contemple los factores mencionados.

En la figura 5 se presenta la posición de los dos últimos espejos del sistema con una inclinación correspondiente al 20 de marzo, a 4 horas del mediodía solar. Eligiendo, por ejemplo, una separación mínima que evite el sombreado a esa hora se garantizan 8 horas diarias de aprovechamiento completo del área de los espejos. Con este diseño, sólo entre el 20 de marzo y el 20 de setiembre los espejos extremos se obstaculizarán entre sí durante las primeras y últimas horas del día.

#### Razón de concentración

Para el diseño del equipo se consideró una temperatura de trabajo de aproximadamente 300 C. Para alcanzar esta temperatura, para eficiencias de colectores concentradores entre 40 % y 60 %, es necesaria una razón de concentración mínima  $C = 30$  (Duffie y Beckman, 2006). Como el absorbedor tiene un área por metro de largo de  $0,239 \text{ m}^2$ , el área total de espejos debe ser de  $30 \times 0,239 \text{ m}^2 = 7,17 \text{ m}^2$  por metro de longitud.

Los espejos con los que se construyeron los concentradores (Gea, et ál., 2008) son de 2 mm de espesor y éstos se venden en unidades de 1,6 m x 2,25 m. Para aprovechar el corte y para obtener dimensiones manejables con sencillez se definió que las líneas de espejos tuvieran un ancho de 0,80 m. El sistema de espejos quedó entonces definido con nueve filas (ver figura 1), lo que genera un área por unidad de longitud de  $0,8 \text{ m}^2 \times 9 = 7,2 \text{ m}^2$ . La razón de concentración es igual a  $7,2 \text{ m}^2 / 0,239 \text{ m}^2 = 30,1$ .

### VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LOS ESPEJOS

La velocidad angular de los espejos durante el seguimiento solar para el enfoque de la radiación reflejada en el absorbedor es una variable fundamental en el funcionamiento del equipo, resultando clave en la optimización de la eficiencia. Requiere de un estudio detallado ya que, al girar los espejos alrededor de un eje que no es paralelo al de la tierra, éstos deben rotar a una velocidad variable durante el día, y variable también en el transcurso del año.

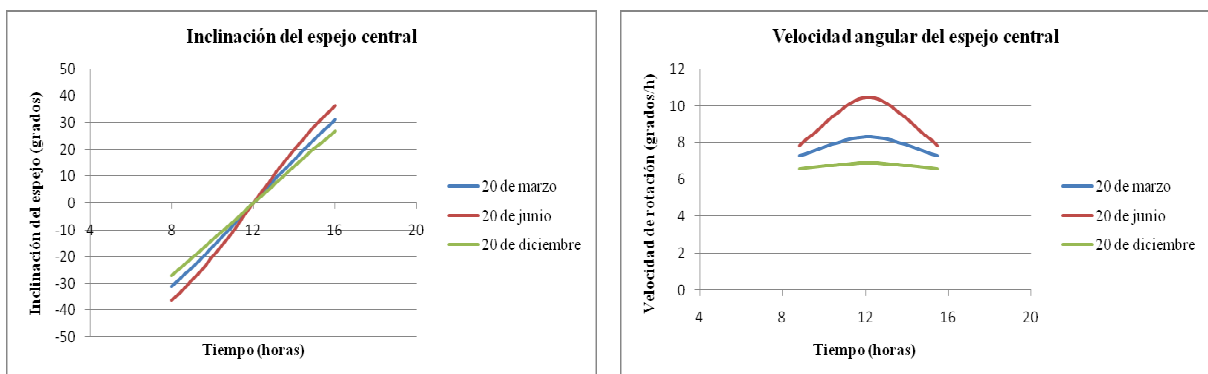


Figura 6: Inclinación  $\beta$  y velocidad angular del espejo central para distintos días del año.

Esta velocidad puede calcularse mediante el modelo programado en SIMUSOL, dividiendo el incremento de  $\beta$  en el tiempo para cada paso de cálculo del programa. Definiendo los datos de entrada, latitud de la localización y día del año, es posible calcular la curva de la velocidad angular de cada espejo en función del tiempo para un día, en distintas épocas del año.

En la figura 6 se observan, como ejemplos, comparaciones entre las gráficas de la posición angular y de la velocidad angular del espejo central del equipo instalado en Salta, durante 8 horas diarias, para distintas épocas del año. El análisis de estas curvas permite observar cuánto cambia la velocidad de los espejos durante el día y cómo este cambio se acentúa en el invierno, cuando la altura solar es menor. También permite concluir que no es posible utilizar un sistema de seguimiento de velocidad constante.

### PROYECCIÓN DE LA REFLEXIÓN DE LA RADIACIÓN EN EL PLANO VERTICAL DEL ABSORBEDOR

Se estudió la proyección de rayos reflejados sobre el plano vertical Este – Oeste. La inclinación de éstos varía en el transcurso del día y también durante el año. Esta variación es importante para definir la longitud del absorbedor y para decidir si es necesario un diseño con apoyos móviles para que éste se pueda desplazar. Si el absorbedor se instalara de manera que coincidan sus extremos con los de los espejos, como se observa en el esquema de la figura 7, se tendría un área del absorbedor no iluminada de longitud  $y_4$ .

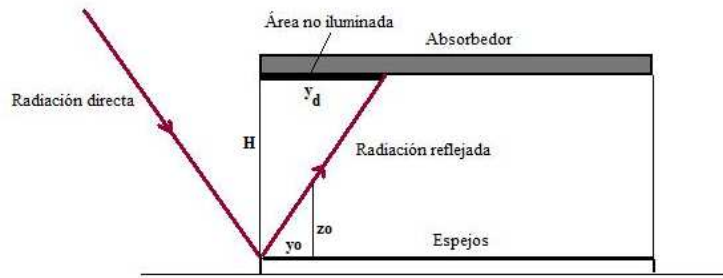


Figura 7: Proyección de la radiación directa y reflejada sobre el plano vertical Norte – Sur sobre el eje del sistema

Esta longitud  $y_d$  puede calcularse a partir de la consideración de que el ángulo de reflexión tomado con respecto a la normal al plano es igual al ángulo de incidencia de la radiación directa. Éste ángulo fue denominado  $\Theta$ , y puede determinarse a partir de la ecuación (1). La figura 8 muestra un sistema de ejes donde el eje  $z'$  coincide con la normal al plano del espejo, el eje  $y'$  coincide con el eje de rotación del espejo y el eje  $x'$  es perpendicular a ambos formando un ángulo  $b$  con la horizontal.

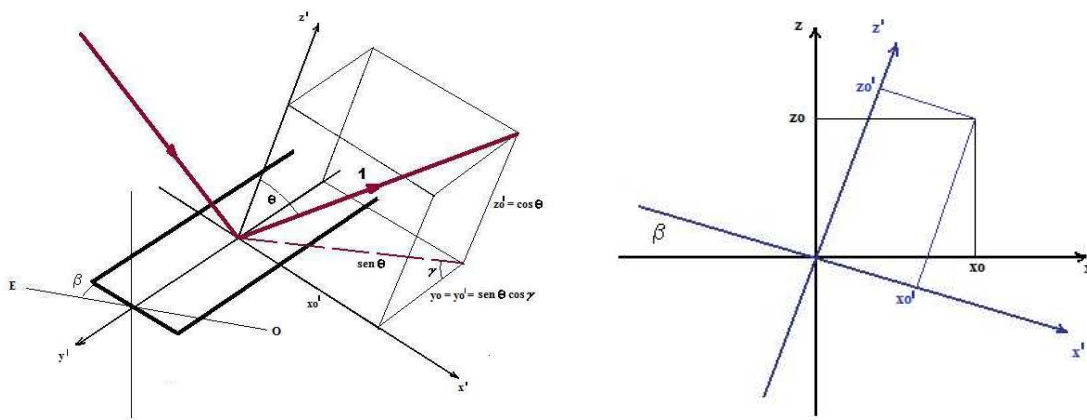


Figura 8: Ejes cartesianos rotados un ángulo  $b$  alrededor del eje  $y'$  (N-S)

Considerando un vector de longitud unitaria en la dirección del rayo incidente, es posible definir sus coordenadas en función del ángulo de reflexión  $\Theta$  y del azimut del sol  $\gamma$ . Utilizando la transformación de coordenadas correspondiente a una rotación de ejes igual a  $b$ , ecuación (8), se obtiene la altura  $z_o$  respecto al eje  $x$  (figura 8).

$$x_o' = (\text{sen}^2 \Theta - \text{sen}^2 \Theta \cos^2 \gamma)^{1/2} \quad y_o' = y = \text{sen} \Theta \cos \gamma \quad z_o' = \cos \Theta \quad (7)$$

$$z_o = z_o' \cos b - x_o' \text{sen} b \quad (8)$$

$$y_d = y_o H / z_o \quad (9)$$

Considerando la semejanza de los triángulos que forma la proyección de la radiación reflejada sobre el plano vertical NS (Figura 7) se obtiene la expresión (9) para la longitud  $y_d$  de la zona no iluminada del absorbedor para las horas de funcionamiento, en cualquier día del año, para cada espejo. Como ejemplo se muestra la curva de variación diaria de  $y_d$  para el prototipo estudiado para distintos días del año (figura 9).

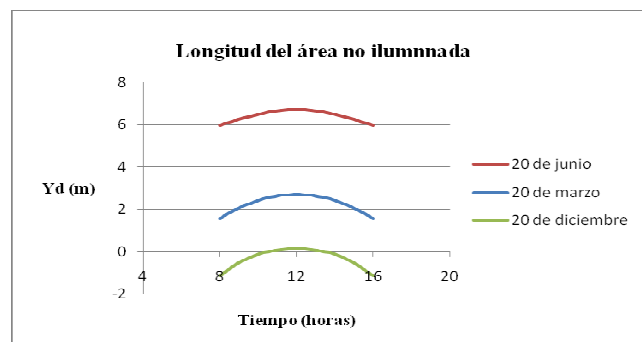


Figura 9: Variación diaria de la longitud del área no iluminada durante distintos días del año



Se observa que el valor de  $y_d$  llega a tomar valores mayores que la longitud de los espejos (6 m). Se concluye que para evitar pérdidas de eficiencia por efecto del área del absorbedor no iluminada, en equipos cortos como el estudiado, el absorbedor debe tener la posibilidad de desplazarse en la dirección NS a fin de que durante todo el año ingrese al absorbedor toda la radiación reflejada. En el caso de sistemas con absorbedor y espejos largos puede evitarse la complicación que significa mover el absorbedor mediante un diseño en el cual el absorbedor tenga una longitud mayor que la de los espejos. También puede ocurrir en sistemas largos que se considere despreciable la longitud del área no iluminada frente a la longitud total del absorbedor.

### ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN DIRECTA MEDIANTE EL MÉTODO DE DÍA CLARO HOTTEL

El programa desarrollado provee los valores de radiación a la simulación global del sistema Fresnel lineal. A partir de las rutinas que permiten calcular la inclinación de los espejos  $\beta$  y los ángulos de incidencia  $\Theta$  es posible estimar la radiación diaria en cualquier día del año utilizando un modelo de atenuación atmosférica.

El modelo utilizado en este caso para la estimación de la irradiancia solar directa sobre una superficie normal al haz usa la ecuación empírica de Hottel, válida hasta los 2.500 m de altura. La ecuación de Hottel permite calcular la transmitancia para atmósferas claras en función del ángulo cenital incluyendo tres coeficientes cuyos valores dependen de la altitud del lugar. El valor standart calculado, que corresponde a una visibilidad de 23 km, se afecta luego por factores de corrección correspondientes a cuatro tipos de clima distintos (Duffie y Beckman, 2006).

El modelo de Hottel fue incorporado al código de SIMUSOL para poder estimar la radiación directa recibida en el equipo CFL cuando no se poseen datos medidos. El programa permite calcular la radiación que recibe cada espejo en cada instante, durante su movimiento de seguimiento al sol. En la Figura 10 se muestra un ejemplo del cálculo de la radiación directa durante todo el día y se superponen datos medidos de radiación directa sobre el plano de uno de los espejos. Se observa para este caso que el modelo estima valores de radiación mayores que los reales.

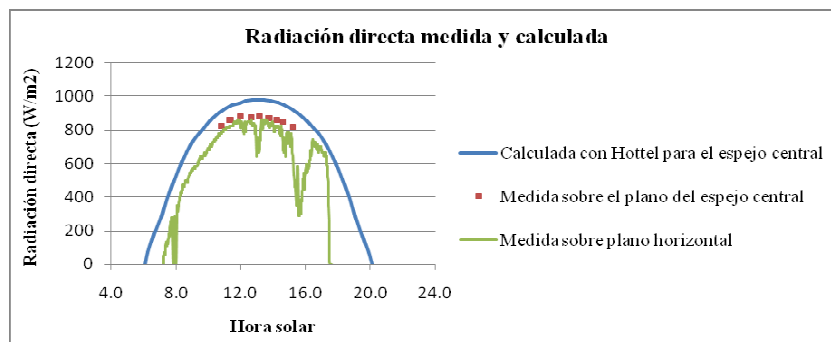


Figura 10: Datos de radiación directa medida y calculada con el método de Hottel

### CONFIGURACIÓN ALTERNATIVA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ÓPTICA

La radiación que recibe cada espejo inclinado es  $G_{bT} = G_{bn} \cos \Theta$ , donde  $G_{bn}$  es la radiación directa. De esta expresión se desprende que se puede mejorar la eficiencia de un sistema Fresnel lineal con una configuración en la cual se aumenten los valores de  $\cos \Theta$ , aproximando la dirección de la normal de los espejos a la dirección de la radiación directa. Esto se puede lograr con un sistema en el cual cada conjunto de espejos esté asociado a dos absorbedores en los extremos (figura 10) en lugar de uno solo en la línea central (figura 4). Con esta configuración, se plantea que durante las horas anteriores al mediodía solar los espejos reflejen la radiación sobre el absorbedor ubicado al este y durante las horas posteriores al mediodía solar la reflejen hacia el absorbedor ubicado al oeste.

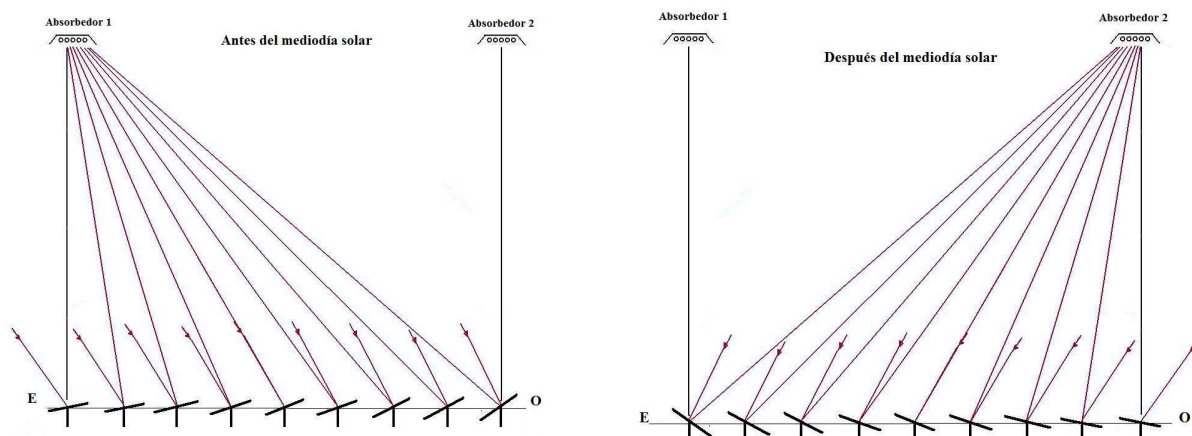


Figura 11: Los rayos son reflejados antes del mediodía hacia el este y después del mediodía hacia el oeste

Utilizando el soft que se presenta en este artículo se realizó el cálculo de cuánto mejora la eficiencia con el sistema de 2 absorbedores respecto al de 1 absorbedor. Se presenta en la figura 12 los resultados para dos días representativos. Para el día 20 de junio se obtiene un mejoramiento de la captación de la radiación del 9,5 % y para el 20 de diciembre un mejoramiento del 7,9 %. La nueva configuración implica un aumento de los costos del sistema y una modificación en el sistema de seguimiento. Pero en sistemas de gran escala una mejora en la eficiencia óptica como la obtenida resulta muy interesante.

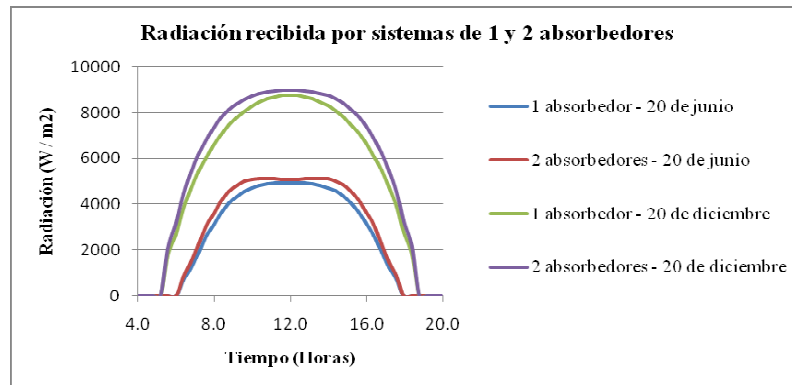


Figura 12: Comparación de la radiación directa recibida por configuraciones con 1 y 2 absorbedores

## CONCLUSIONES

Se estudiaron los distintos aspectos óptico geométricos que permiten definir el diseño de un concentrador Fresnel lineal. Con ellos pueden determinarse las dimensiones del sistema de acuerdo a la energía que se desee captar y la temperatura de trabajo elegida.

Se elaboró un programa de cálculo para SIMUSOL que se acopla al resto de los componentes que constituyen la simulación global del sistema. Con él se puede realizar el cálculo de la energía solar captada a partir de datos medidos de radiación directa sobre plano horizontal, o mediante un modelo de estimación de la radiación directa.

El programa desarrollado permite también calcular la fracción de área no iluminada para un absorbedor fijo y la distancia que se debe desplazar un absorbedor móvil para recibir la radiación reflejada durante todo el año. También permite determinar la velocidad de rotación de los espejos para cualquier momento, como aporte al desarrollo de un sistema de seguimiento.

Utilizando los modelos propuestos, se realizó una comparación de la energía captada por un CFL convencional de 1 absorbedor con otro de 2 absorbedores. Se comprobó que mediante este último se consiguen ángulos de incidencia menores de la radiación directa sobre el plano de los espejos con un consiguiente aumento de la eficiencia óptica. De este resultado se concluye que sería importante profundizar el estudio y desarrollo de un CFL con esta configuración alternativa.

## REFERENCIAS

- Alia D. y Saravia L. . Programa Simusol. Simulación de Sistemas Solares. Inédito.  
 Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes, 3ª edición. Wiley Interscience, New York.  
 Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R. y Echazú R. (2007). Concentrador lineal Fresnel para la generación directa de vapor de agua. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 11.  
 Salazar G., Cadena C. (2009) Algoritmo para el cálculo de ángulos de radiación solar directa, incidente y reflejada, en un sistema de concentradores Fresnel simplificado. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 13.  
 Saravia L., Gea M., Fernández C., Caso R., Hoyos D. y Salvo N. (2008) Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel de 24 m<sup>2</sup> de área. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11.

## ABSTRACT

This paper presents a set of geometrical optical aspects necessary for the study of radiation received by a linear Fresnel concentrator (CFL), applied to a prototype of 43 m<sup>2</sup>. A software that calculates the angle of incidence of direct radiation on the mirrors, its rotation velocity and the shift of the reflection of radiation in the direction of the absorber were developed. It also allows the calculations to estimate the direct radiation on the system requirements for modeling the entire system. A comparison of radiation calculated with experimental measurements. A new CFL geometric configuration proposed to improve optical efficiency was evaluated.

**Keywords:** solar energy, linear Fresnel concentrator, solar geometry, estimation of solar radiation.