

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS ÓPTICAS POR LOS EXTREMOS DEL ABSORBEDOR DE UN CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAL MEDIANTE UNA CORRELACIÓN ANALÍTICA SIMPLE

Marcos Hongn, Silvana Flores Larsen, Marcelo Gea y Martín Altamirano

INENCO (UNSa – CONICET)

Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5150 - CP 4400 - Salta, Argentina

Email: marcoshongn@gmail.com. Tel: 54-387-4255578

Recibido:30-06-15; Aceptado:27-07-15.

RESUMEN.- Los concentradores solares tipo Fresnel Lineal (LFC) de pequeña escala representan una tecnología prometedora para aplicaciones domésticas e industriales. En estos sistemas, con longitudes de hasta decenas de metros, las pérdidas ópticas por longitud no iluminada del absorbedor y su influencia en el comportamiento energético del equipo es muy importante. Para abordar este efecto, se utilizó un método analítico basado en ecuaciones que consideran la inclinación de los reflectores y la posición aparente del sol. Se propone una expresión simple, obtenida mediante el método de ajuste de cuadrados mínimos, para estimar la longitud no iluminada anual y la factor de iluminación del absorbedor para cualquier latitud entre 0° y $\pm 40^\circ$ y para un LFC con cualquier orientación. Particularmente se realizó un análisis de la variación de la longitud no iluminada de absorbedor en términos instantáneos, diarios y anuales para sistemas con orientación Norte-Sur a diferentes latitudes. Finalmente, se estudiaron las pérdidas ópticas debido a este efecto para un prototipo LFC instalado en la ciudad de Salta y se contrastó los resultados con datos experimentales, mediante análisis digital de imágenes. Se obtuvo un buen ajuste entre simulaciones y medidas, con un RMSE medio de 6%.

Palabras claves: Pérdidas ópticas anuales, concentrador Fresnel lineal de pequeña escala, longitud no iluminada.

LEAST SQUARE BASED METHOD FOR THE ESTIMATION OF THE OPTICAL END LOSS OF LINEAR FRESNEL CONCENTRATORS

ABSTRACT.- Small-scale solar concentrators based on linear Fresnel (LFC) are a promising technology for domestic and industry applications. In such small systems, optical end losses and their influence on the energy performance are crucial issues. Although ray tracing is the most used method to estimate end losses, a less detailed and less time-consuming procedure is the analytical method, based on the equations that describe the sun and mirror positions. This method was used in this paper to study the behaviour of the optical end losses with latitude and LFC geometry. A simple least square fitting expression was proposed to estimate the average annual non-illuminated length and the end loss factor for any latitude - between 0 and $\pm 40^\circ$ - and for any LFC azimuth. In particular, instantaneous, daily and annual periods at different latitudes for a North-South tracking LFC were analyzed. Finally, the instantaneous non-illuminated length on a short LFC system in Salta city, Argentina (24.7°S , 65.4°W) was experimentally determined through digital imaging analysis. A good agreement between the theoretical and the experimental values was found with average RMSE values of 6%.

Keywords: annual end loss estimation, small-scale linear Fresnel concentrator, non-illuminated length.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de concentración solar se han constituido como tecnologías competentes y no contaminantes para transformar energía solar en potencia eléctrica o térmica. Entre los colectores concentradores, el Fresnel Lineal (LFC) representa una tecnología rentable para generación de energía a gran escala, por lo que existe bibliografía extensa que abordan los diferentes tópicos relacionados a los absorbedores de gran longitud. Por otro lado, se debe considerar los prototipos en desarrollo que son sistemas de menor escala y que se pueden utilizar, además, en otras aplicaciones de menor requerimiento energético. De hecho, históricamente, la mayoría de los LFC fueron desarrollados para procesos de generación de calor de media-baja temperatura (Zhou, 2013). Por ejemplo, se han

utilizado sistemas de pequeña escala con rangos de temperatura de trabajo entre 150 y 300°C para calentamiento/enfriamiento en edificios (Bermejo *et al.*, 2010), calentamiento de agua para uso doméstico (Sultana *et al.*, 2012), generación de vapor para la minería, en industrias de índole química y textil, y también en la agroindustria (Häberle *et al.*, 2006). Debido a la variedad de aplicaciones que hacen uso de LFC de pequeña-mediana escala, es necesario un estudio a mayor profundidad para caracterizar los efectos que contribuyen a las pérdidas ópticas propias de los sistemas de concentración solar. Uno de los factores que tiene gran influencia en la eficiencia óptica del LFC es la pérdida por longitud no iluminada de absorbedor producida por el desplazamiento de los haces de luz sobre el foco en altura, por lo que existe (generalmente) una fracción de absorbedor sin ganancia directa por radiación. Debido a la

trayectoria solar aparente, la longitud no iluminada depende de la latitud del sitio (ϕ), de las características geométricas del equipo y de la orientación (azimut γ) del eje principal pudiéndose evaluar el efecto en términos instantáneos, medios diarios o mensuales. A latitudes mayores, la porción de absorbedor sin iluminar es mayor, lo que reduce considerablemente la eficiencia del sistema. Por otro lado, la orientación más conveniente del eje principal (eje de seguimiento) de un LFC corresponde a la Norte-Sur. Debido a limitaciones de superficie algunos LFC de pequeña área pueden ser instalados con orientaciones diferentes a la Norte-Sur, el análisis de las pérdidas ópticas por las secciones no iluminadas de absorbedor abarca un rango de posibles orientaciones del sistema.

El método más utilizado para estimar las pérdidas ópticas es el de traza de rayos. Debido a que es un procedimiento muy detallado, consume bastantes recursos y tiempo de cálculo, algunos autores desarrollaron métodos alternativos basados en ecuaciones matemáticas. Buie *et al.* (2002) estudió las pérdidas ópticas por los bordes del absorbedor (end loss) para un LFC con orientación Norte-Sur y durante el mediodía solar. Shaoxuan and Chaofeng (2011) derivaron una ecuación para estimar la longitud no iluminada instantánea para LFC con orientación Norte-Sur y Este-Oeste, los autores confirmaron que el efecto aumenta acorde al incremento de la distancia focal de los reflectores con el receptor analizando un prototipo con ubicación 25°01'N. Para la latitud mencionada y para características geométricas particulares, los autores muestran gráficamente la variación de la longitud no iluminada correspondiente al mediodía solar para los días medios mensuales en función de la distancia focal, verificando los resultados con simulación de traza de rayos.

Recientemente, Heimsath *et al.* (2014) propuso el uso de un factor de corrección f_{end} definido como la fracción iluminada de la longitud total del absorbedor. Este factor es aplicado al cálculo de eficiencia del colector:

$$\frac{Q_{abs}}{A_{net}G_b} = \eta_{opt,0}IAM(\theta_z, \gamma_s)f_{end} \quad (1)$$

Donde Q_{abs} es la tasa de energía solar absorbida por el receptor (W), A_{net} es el área neta de los espejos reflectores (m^2), G_b es la irradiancia directa (Wm^{-2}), $\eta_{opt,0}$ es la eficiencia óptica a incidencia normal, finalmente IAM es el modificador del ángulo de incidencia. IAM considera el efecto del coseno y los factores de pérdida óptica que dependen del ángulo de incidencia y afectan directamente la eficiencia óptica, bajo la suposición de absorbedor infinito. Estos autores calcularon de manera instantánea las pérdidas por los bordes del absorbedor utilizando una altura efectiva en cuenta de la altura nominal del receptor. Con la definición de la altura efectiva obtienen una representación del camino óptico medio que caracteriza todo el campo reflector, evitando el análisis individual para cada espejo. Ellos compararon los resultados analíticos de este factor de pérdida definido mediante la altura efectiva con simulaciones por traza de rayos y verificaron que para cálculos anuales la diferencia entre ambos resultados es pequeña, menores a 0,5% para la localidad de Abdali con latitud 30°, longitud 47,6° y para un LFC de 25 m de longitud.

Aunque las ecuaciones para describir la magnitud de energía perdida por efecto de la longitud no iluminada de absorbedor

son conocidas, no se encuentra en la bibliografía una expresión analítica que cumpliera las condiciones de ser general y simple, y tampoco se registraron datos experimentales que complementen el análisis teórico de este efecto. Es por ello, que el objetivo de este trabajo fue desarrollar una expresión simple para estimar la longitud no iluminada promedio anual y la fracción de absorbedor iluminado para cualquier latitud y orientación de un LFC rectangular. Se llevó a cabo un estudio más detallado para la situación más frecuente, que corresponde a un sistema con orientación Norte-Sur. Se definió y estudió el concepto de longitud no iluminada adimensional instantánea, diaria y anual paramétricamente con la latitud y las distancias eje-espejos. Mediante el método de ajuste por cuadrados mínimos se generó la expresión analítica mencionada con anterioridad. Finalmente, para complementar el estudio con un marco experimental, se realizaron mediciones de la distancia horizontal desplazada por los haces reflejados en un LFC de corta longitud (6m) instalado en el campus experimental del INENCO, en la ciudad de Salta (24,7°S - 65,4°W).

Es importante aclarar que, en este trabajo, existe analogía entre los términos de longitud no iluminada y desplazamiento horizontal de los haces sobre el absorbedor ya que se consideran LFC rectangulares (longitud del campo de espejos igual a receptor). Fuera de esta configuración, los términos describen diferentes efectos, como puede observarse en Hongn *et al.* (2014).

2. MÉTODO

En la actual sección se desarrolla el método para estimar de manera instantánea y en términos promedios la fracción de absorbedor iluminado de un LFC de corta longitud y orientación Norte-Sur, en función de la longitud del receptor y su altura sobre el nivel de los espejos, la distancia entre eje de espejo y eje central, y la latitud del sitio. La configuración estudiada consiste de N espejos semi-planos que siguen de manera independiente el movimiento solar para concentrar la imagen reflejada sobre el absorbedor que se encuentra en el fijado en el centro del sistema y a varios metros. Este receptor de longitud Z se encuentra ubicado a la altura H desde el plano de apertura, como se observa en la Figura 1a. La distancia horizontal entre el espejo i -ésimo al eje central del absorbedor (proyectado sobre el plano de los espejos) se simbolizó con D_i (definida positiva cuando el espejo está al oeste del eje central), F_i es la distancia focal en metros entre el eje del espejo y el centro del absorbedor.

De la Figura 1b, L_i es la longitud desplazada horizontalmente sobre el absorbedor debido al aporte del espejo i -ésimo y se estima mediante consideraciones geométricas (Apéndice A). Es evidente que cada espejo, por estar ubicados a distintas distancias focales, tiene asociado valores de L_i diferentes al resto en el mismo instante de tiempo. Para el cálculo de L_i se consideraron las siguientes simplificaciones:

- Los rayos solares incidentes son paralelos entre sí y la posición solar aparente se calculó a partir de las relaciones de Spencer, (Duffie y Beckman, 2006).
- Cada fila de espejo es una superficie especular ideal, no se consideran errores mecánicos ni constructivos.
- Las filas de espejos tienen la misma longitud y alineación que el absorbedor (configuración rectangular).
- La reflexión es considerada en el eje axial central del espejo.

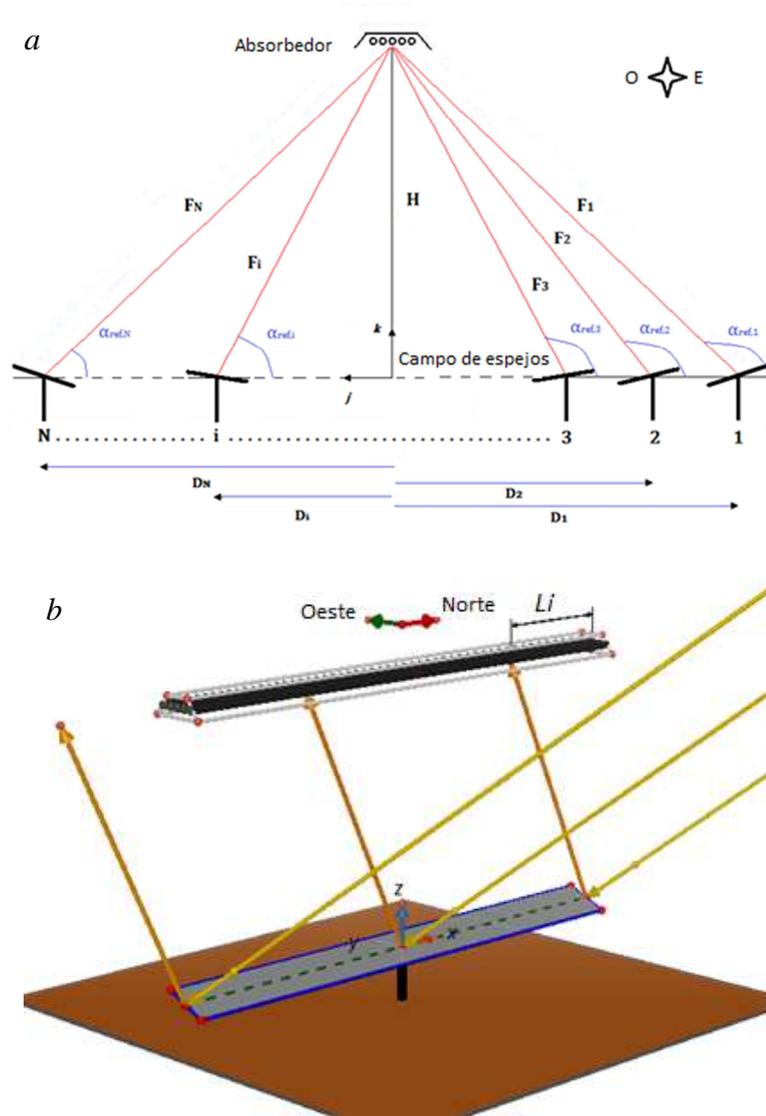


Fig. 1: a) Esquema de un LFC con orientación Norte-Sur compuesto por N espejos, b) representación de la longitud no iluminada sobre el absorbedor.

En la realidad, tanto las propiedades ópticas como las precisiones mecánicas de los componentes del colector solar afectan la eficiencia óptica y pueden ser fuentes de errores ópticos; donde están incluidos los errores por especularidad, el error por la no uniformidad en la pendiente de los espejos (superficie), el error en la posición del receptor y el error asociado al seguimiento de los reflectores. Zhou (2013) desarrolló FirstOPTIC, un método analítico basado en un modelo matemático riguroso que contempla las posibles fuentes de error asociadas al campo reflector. Las magnitudes de los errores ópticos mencionados son: error asociado a la pendiente en la superficie del espejo aproximadamente 2mrad , el error aproximado en el seguimiento solar es de 1mrad y en el caso de la posición del absorbedor el error ronda los 0.035m . Un valor de 0.8mrad es comúnmente aceptado para describir el error en la especularidad de los espejos y un error de 2.8mrad es introducido por la consideración del sol como fuente puntual (la consideración del disco solar tiene asociado el ángulo sólido para describir la radiación directa incidente). Huang y Han (2012) proponen que el error para los rayos reflejados en un LFC puede considerarse como el doble del error asociado a la pendiente no uniforme del reflector.

Finalmente, se comparó la posición solar calculada con relaciones de Spencer y un algoritmo que presenta gran exactitud, PSA (Reda and Andreas, 2008), quienes estiman el ángulo cenital y azimutal solar con una exactitud de $\pm 0,0003^\circ$. La utilización de este algoritmo da lugar a pequeñas diferencias (hasta 2% en el peor de los casos) en el cálculo de la longitud no iluminada, es por ello que se optó por la utilización de las correlaciones de Spencer para llevar a cabo el método.

Se definieron parámetros adimensionales, considerando la altura H como la longitud característica. Así, L_i/H , D_i/H , Z/H , y F_i/H son la longitud no iluminada, distancia horizontal del espejo, longitud del absorbedor y distancia focal, respectivamente, todas adimensionalizadas con la longitud característica y para el espejo i -ésimo. De esta manera, para un absorbedor con altura fija H , se pueden analizar diferentes geometrías del LFC descritas por D_i/H (o alternativamente por F_i/H) y Z/H .

2.1 Valores instantáneos de \hat{L}_i y $f_{end,i}$

Para un sistema de seguimiento con orientación Norte-Sur, la longitud no iluminada adimensional $\hat{L}_i = L_i/H$ es función de los ángulos solares y de la posición del espejo reflector i . Este desplazamiento fue obtenido a través de un análisis geométrico tridimensional basado en la intercepción entre el plano que contiene el vector solar y el vector normal del espejo i -ésimo y la recta espacial que representa al absorbedor (Ver Apéndice A). Así, \hat{L}_i no depende de la longitud del absorbedor y se calcula como:

$$\hat{L}_i = \frac{(y_s z_i - y_i z_s) \cos \gamma \left(\frac{D_i}{H} \right) - (x_i z_s - x_s z_i) \sin \gamma (D_i/H)}{(y_s z_i - y_i z_s) \sin \gamma + (x_i z_s - x_s z_i) \cos \gamma} - \frac{(x_s y_i - x_i y_s)}{(y_s z_i - y_i z_s) \sin \gamma + (x_i z_s - x_s z_i) \cos \gamma} \quad (2)$$

En la Ec. (2) la posición aparente del sol se encuentra definida por (x_s, y_s, z_s) y depende del ángulo cenital θ_z y el ángulo azimutal γ_s (ambos determinados mediante las relaciones de Spencer). La posición del espejo i -ésimo se define mediante las coordenadas (x_i, y_i, z_i) y depende su inclinación β_i y su ángulo azimutal γ_i , como se indica en el Apéndice A. \hat{L}_i puede tomar valores positivos o negativos dependiendo hacia donde se produce el desplazamiento de los rayos sobre el absorbedor, hacia el Norte (positivo) o hacia el Sur (negativo). Se debe tener en cuenta que los espejos ubicados a distancias simétricas del eje central (sobre el eje Este-Oeste) poseen el mismo comportamiento en relación a este efecto, es decir, \hat{L}_i tiene el mismo valor para dos espejos equidistantes al eje central.

El factor f_{end} representa la fracción de absorbedor que se encuentra iluminada (Heimsath *et al.*, 2014), por lo que toma valores $0 \leq f_{end} \leq 1$, queda claro que para un mayor aprovechamiento de la radiación solar reflejada este factor debe ser próximo a la unidad. Para un receptor de longitud Z , y a partir de la Ec. (2), para el espejo i -ésimo f_{end} puede ser escrito:

$$f_{end,i} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{H}{Z} \right) |\hat{L}_i| & 0 \leq |\hat{L}_i| \leq Z/H \\ 0 & |\hat{L}_i| > Z/H \end{cases} \quad (3)$$

Hasta aquí, vale la pena notar dos cuestiones importantes. La primera es que \hat{L}_i puede tomar valores mayores a Z/H . Esta situación ocurre cuando el desplazamiento de los haces es mayor a la longitud del absorbedor, por lo que $f_{end,i}$ debe ser estrictamente cero. Esta situación fue contemplada en la segunda línea de la Ec. (3). La segunda consideración de importancia es que \hat{L}_i no depende de la longitud Z , mientras que $f_{end,i}$ es inversamente dependiente de Z por lo que absorbedores más cortos sufren mayores pérdidas por desplazamiento de los haces. Tanto \hat{L}_i como $f_{end,i}$ son parámetros de gran utilidad en el diseño de sistemas LFC.

2.2 Valores medios diarios y medios anuales de \hat{L}_i y $f_{end,i}$

Las expresiones para \hat{L}_i y $f_{end,i}$, Ecs. (2)-(3) pueden ser promediadas de manera diaria, mensual o anual. Como se ha mencionado anteriormente, \hat{L}_i puede tomar valores positivos o negativos según la dirección de desplazamiento de los haces a la altura H . Para determinar el valor de \hat{L}_i en los periodos de tiempo mencionados, debe considerarse la

magnitud del desplazamiento (valor absoluto) y no la dirección donde se produce. Esto porque se utilizó un método integral, como se observa en las Ecs. (4)-(5).

$$\hat{L}_{diario,i} = \frac{1}{(\omega_{max} - \omega_{min})} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} |\hat{L}_i| d\omega \quad (4)$$

$$\hat{L}_{anual,i} = \frac{1}{2\delta_{max}(\omega_{max} - \omega_{min})} \int_{-\delta_{max}}^{\delta_{max}} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} |\hat{L}_i| d\omega d\delta \quad (5)$$

Para el cálculo medio diario y anual del factor de iluminación $f_{end,i}$ el procedimiento es análogo al descrito por las Ecs. (4)-(5) y se expresa de la siguiente manera:

$$f_{end,i}^{diario} = \frac{1}{(\omega_{max} - \omega_{min})} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} f_{end,i} d\omega \quad (6)$$

$$f_{end,i}^{anual} = \frac{1}{2\delta_{max}(\omega_{max} - \omega_{min})} \int_{-\delta_{max}}^{\delta_{max}} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} f_{end,i} d\omega d\delta \quad (7)$$

Mediante el lenguaje de programación Python (software de libre distribución) se ejecutaron las rutinas de cálculo para las Ecs. (4)-(7). Se utilizó el método propuesto por Xiao (2012) para establecer las condiciones de integración. El método propone un rango de integración diaria para valores de ω comprendidos entre las 8 y 16 horas solares, por lo que $-60^\circ \leq \omega \leq 60^\circ$. El autor explica que en la realidad el rango de integración debería ser variable en función de las condiciones constructivas y geográficas del lugar, aunque la suposición de reducir el periodo diario a 8 horas es una estimación aceptable en la mayoría de los concentradores solares. Además, la definición de un periodo de operación fijo permite simplificar los mecanismos y estrategias de seguimiento, operación y control. Para extender el cálculo a valores medios anuales, se aplicaron integrales dobles, barriendo también el rango de valores de declinación δ para todo el año, es decir, $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

Los cálculos se realizaron para diferentes latitudes y para un rango de D_i/H entre 0 (espejo debajo de absorbedor) y 2 (la distancia del espejo al centro es el doble de la altura del absorbedor). Este rango incluye, con seguridad, todas las filas de espejos reflectores de un LFC de pequeña escala. Sólo se estudió la variación de este efecto óptico para latitudes del hemisferio Sur, ya que para el hemisferio Norte el comportamiento es análogo para latitudes simétricas y para días con declinaciones opuestas. En la siguiente sección se muestran los resultados de \hat{L}_i , $\hat{L}_{diario,i}$, y $\hat{L}_{anual,i}$. Finalmente, se encontraron expresiones generales, mediante un ajuste de segundo orden, para el cálculo de $\hat{L}_{anual,i}$ y $f_{end,i}^{anual}$ válidas para un amplio rango de ϕ , D_i/H y Z/H .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 \hat{L}_i instantanea

A partir de la Ec. (2) se calculó \hat{L}_i versus D_i/H para diferentes ángulos horarios en el intervalo $-60^\circ < \omega < 60^\circ$ (8 a 16 horas solares) para los solsticios de verano e invierno (21 de Diciembre y 21 de Junio, respectivamente) y cuatro

latitudes diferentes (0°, -10°, -25° y -40°). En la Figura 2 se observan los resultados para latitudes de -10° y -25°.

Como era de esperarse, la magnitud de \hat{L}_i (en valor absoluto) incrementa acorde a D_i/H . En invierno, los haces solares reflejados son desplazados en dirección Sur sobre el absorbedor para todos los casos analizados ($\hat{L}_i < 0$) mientras que, en verano, dependiendo de la latitud y de la hora solar existen valores positivos y negativos de \hat{L}_i para un mismo día. Así, la región entre el Ecuador y el trópico, $\hat{L}_i > 0$ y para latitudes entre el trópico y el polo, $\hat{L}_i > 0$ durante la mañana y la tarde y $\hat{L}_i < 0$ cerca del mediodía solar. También se determinó que la magnitud de \hat{L}_i es más

grande a mayores latitudes y alcanza los valores máximos a las 12 horas solar (tanto en invierno como en verano). Por otra parte, para la región tropical el desplazamiento de los haces reflejados es mínimo en verano y máximo en invierno, mientras que en el Ecuador \hat{L}_i es constante durante todo el día y sólo varía con la declinación (en esta ubicación geográfica particular el trayecto solar diario se produce en un plano normal al eje de seguimiento del sistema por lo que deja de existir dependencia con ω). Para esta latitud el desplazamiento horizontal de los haces ocurre en dirección Norte en el verano y para invierno hacia el Sur.

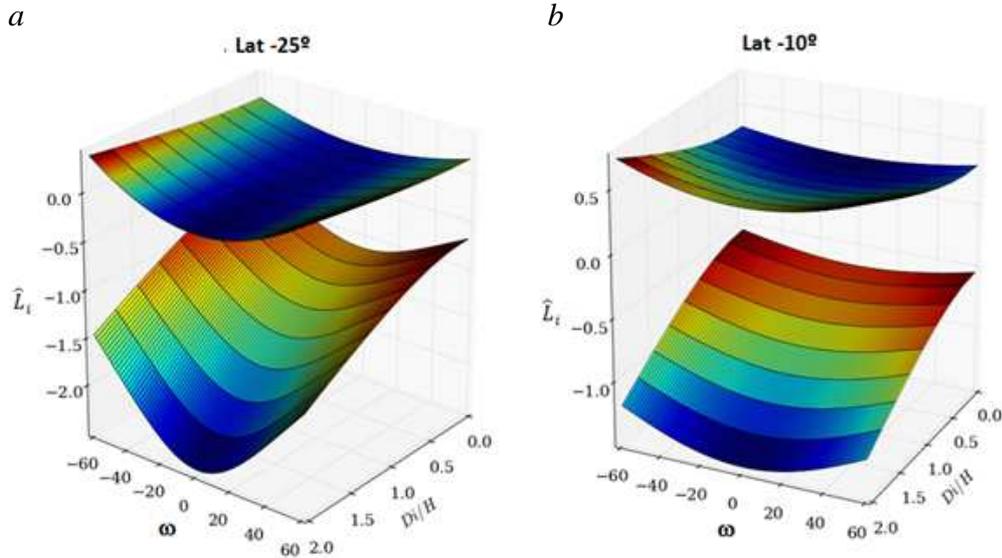


Fig. 2: \hat{L}_i instantánea vs D_i/H y la hora solar ω para los solsticios de verano (superficie superior) e invierno (superficie inferior), para latitudes de a) -25° y b) -10° para un LFC Norte-Sur.

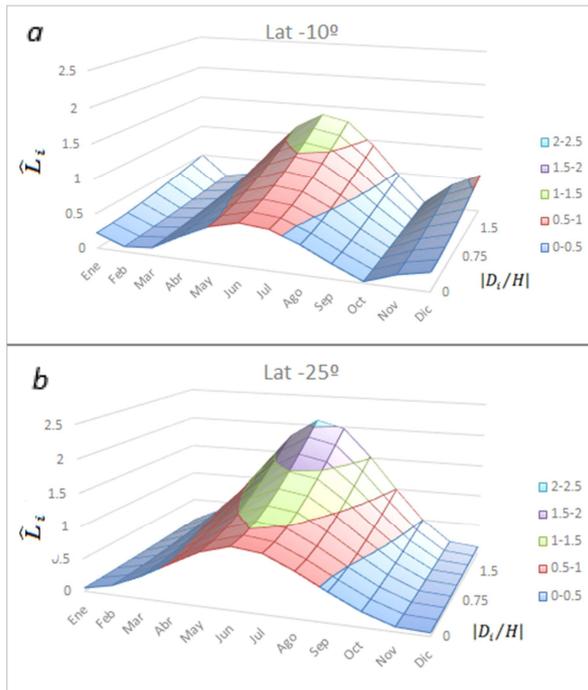


Fig. 3: $\hat{L}_{diario,i}$ versus D_i/H para el día medio de cada mes, para latitudes de a) -10° y b) -25°.

Se compararon algunos resultados obtenidos mediante este modelo contra valores que aparecen en la literatura (Shaouxuan Pu and Chaofeng Xia, 2011), para el caso de un LFC con orientación Norte-Sur y ubicado a $\phi = 25,01^\circ$, $H = 10m$ y para $0,25 < D_i/H < 2$, la diferencia entre valores fue menor a 0,02m para los equinoccios (menor a 0,2%).

3.2. Longitud no iluminada adimensional media diaria $\hat{L}_{diario,i}$

A través de la Ec. (4) se calcularon los valores diarios de la longitud no iluminada de absorbedor en función de D_i/H para los días medios de cada mes. En la Figura 3 se muestran los resultados para latitudes -25° y -10°.

La longitud no iluminada media diaria incrementa con D_i/H en todos los casos (para todo los meses del año y ubicaciones geográficas). Como se observa de la Figura 3, $\hat{L}_{diario,i}$ es mayor en los meses de invierno e incrementa su valor acorde al aumento en la latitud del lugar. Se realizaron cálculos adicionales para comparar la magnitud de la longitud no iluminada promedio mensual contra los valores calculados para los días medios de cada mes y se encontró que la máxima diferencia entre ambas situaciones es de 5% para los meses de invierno y altas latitudes. Así, $\hat{L}_{diario,i}$ estimada para el día medio del mes es una aproximación acertada para describir el efecto en lapsos mensuales, para medias y bajas latitudes.

3.3 Longitud no iluminada adimensional media anual $\hat{L}_{anual,i}$

Para analizar el efecto de la longitud no iluminada en términos anuales, se utilizó la distancia focal adimensional F_i/H en cuenta del parámetro D_i/H . Donde:

$$F_i/H = \sqrt{(D_i/H)^2 + 1} \quad (8)$$

Las Ecs. (5) y (8) se emplearon en la determinación de la razón $\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1}$ vs ϕ^2 . Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 4.

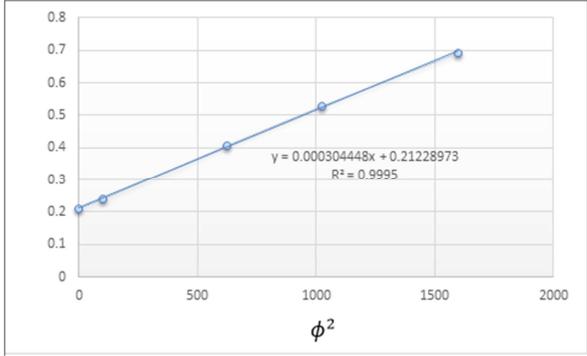


Fig. 4: $\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1}$ como función del cuadrado de la latitud.

Como se esperaba, el valor de $\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1}$ incrementa con la latitud. De esta manera, la curva puede ser ajustada de manera razonable con una función de primer orden del tipo:

$$\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1} = A\phi^2 + B \quad (9)$$

Donde $A=304,45 \times 10^{-6}$; $B=212,29 \times 10^{-3}$; y $R^2 = 0,9995$ (Figura 4).

3.4. Estimación del factor $f_{end,i}^{anual}$

Mediante un análisis similar al de la sección anterior, resulta más complicado encontrar una ecuación general para $f_{end,i}^{anual}$ debido a la dependencia de la Ec. (7) con la longitud del absorbedor. Por lo que se consideró que la Ec. (9) representa la longitud no iluminada de un absorbedor lo suficientemente largo (esto es, un receptor donde $|\hat{L}_i| < Z/H$ para todos los casos). Así, se formuló una expresión similar a la Ec. (3) que describe el factor de iluminación promedio anual:

$$f_{end,i}^{anual} = 1 - \left(\frac{H}{Z}\right) \hat{L}_{anual,i} g_{corr} \quad (10)$$

$\hat{L}_{anual,i}$ se calcula mediante Ec. (9) y g_{corr} toma el valor 1 para absorbedores con $|\hat{L}_i| < Z/H$. La función correctiva g_{corr} adquiere valores entre 0 y 1 cuando el receptor es de corta longitud ($|\hat{L}_i| > Z/H$). La introducción de g_{corr} , aplicada a $\hat{L}_{anual,i}$, permite considerar los LFC como sistemas de absorbedor finito. Como muestra la Tabla 2, g_{corr} tiene mayor influencia en los espejos más lejanos al centro para altas latitudes y equipos de muy corta longitud ($H/Z > 1$). Los valores de g_{corr} pueden ser interpolados a partir de los contenidos en Tabla 2.

Tabla 2: Factor de corrección g_{corr} para $\hat{L}_{anual,i}$.

D_i/H	$H/Z=0.25$	$H/Z=0.5$	$H/Z=1$	$H/Z=1.5$	Latitud
0	1	1	0.91	0.75	$\pm 40^\circ$
0.5	1	1	0.87	0.70	
1	1	0.98	0.78	0.60	
1.5	1	0.94	0.67	0.49	
2	1	0.87	0.57	0.41	
0	1	1	1	0.92	$\pm 25^\circ$
0.5	1	1	0.99	0.88	
1	1	1	0.94	0.77	
1.5	1	1	0.85	0.66	
2	1	0.99	0.75	0.57	
0	1	1	1	1	$\pm 10^\circ$
0.5	1	1	1	1	
1	1	1	1	0.96	
1.5	1	1	1	0.88	
2	1	1	0.94	0.80	
0	1	1	1	1	0°
0.5	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	
1.5	1	1	1	0.98	
2	1	1	1	0.91	

Ecs. (9) y (10) permiten la estimación de los parámetros $\hat{L}_{anual,i}$ y $f_{end,i}^{anual}$ promedios anuales para sistemas LFC con características geométricas cualquiera de D_i , H , y Z para cualquier latitud entre 0 y $\pm 40^\circ$. Estas expresiones fueron testeadas frente a la solución integral exacta y se encontraron diferencias entre 0,2% - 5,0%, donde la peor situación corresponde a la mayor latitud ($\phi = -40^\circ$).

Finalmente, en la Figura 5 se muestra la dependencia del factor de iluminación promedio anual con la longitud del absorbedor, para el caso del espejo central ($D_i/H=0$). Se observa un incremento brusco para Z/H menores a 1,5. El factor es mayor que 0.9 para $Z/H > 2$ (a bajas latitudes), $Z/H > 3,75$ (en los trópicos) y $Z/H > 6$ ($\phi \sim \pm 40^\circ$). Es decir, a mayor latitud, la captación de radiación reflejada por los espejos disminuye.

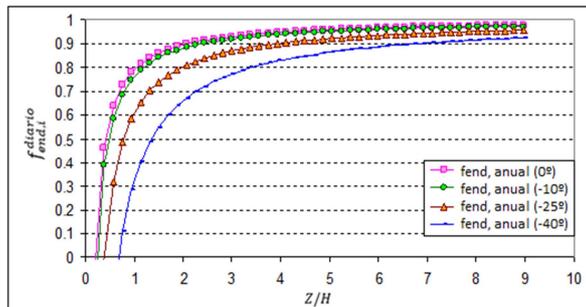


Fig. 5: Factor de iluminación promedio como función de la longitud adimensional del receptor, para el espejo central ($D_i/H=0$) y a diferentes latitudes.

3.5 Extensión a todo el campo de espejos y a cualquier orientación

3.5.1 Distancia efectiva del campo reflector

La longitud no iluminada media anual calculada mediante Ec. (9) es válida para filas individuales de espejos. Con la finalidad de describir la situación del campo reflector completo, se introdujo una distancia efectiva F_{ef} definida como la distancia focal a la cual la Ec. (9) iguala al valor medio de la longitud no iluminada para todo el campo reflector. Así, siendo W_{field} la distancia entre el eje central hasta el eje del último espejo, se tiene:

$$\hat{L}_{anual} \Big|_{F_{ef}/H} = \frac{1}{[(W_{field}/H)^2 + 1]^{0.5} - 1} \int_1^{[(W_{field}/H)^2 + 1]^{0.5}} \hat{L}_{anual} \left(\frac{F_i}{H} \right) d \left(\frac{F_i}{H} \right) \quad (11)$$

Reemplazando \hat{L}_{anual} dado por la Ec. (9) en Ec. (11) y resolviendo la integral, se obtiene:

$$F_{ef} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{W_{field}^2 + H^2} + H \right] \quad (12)$$

A partir de las Ecs. (8) y (12), se definió el parámetro D_{ef} . El comportamiento de D_{ef} con W_{field} es bastante lineal ($R^2=0,997$), por lo que se puede utilizar la siguiente expresión simplificada (para $W_{field}/H < 2$):

$$D_{ef} = 0,653W_{field} \quad (13)$$

La distancia efectiva dada por la Ec. (13) o la distancia focal efectiva de la Ec. (12) pueden ser utilizadas para predecir el comportamiento de todo el campo reflector mediante Ecs. (9) y (10). Heimsath *et al.* (2014) sugiere una altura efectiva definida entre receptor y el eje de rotación a la distancia de un cuarto del ancho del plano de apertura, esto es $D_{ef} = 0,5W_{field}$. Este valor es menor al de la Ec. (13).

3.5.2 Generalización para campos reflectores con cualquier orientación

Hasta aquí, los análisis previos han sido basados en LFC con orientación Norte-Sur, pero el enfoque puede ampliarse para considerar sistemas con diferentes orientaciones (azimut variable). El método empleado para obtener una expresión general es similar al descrito en la Sección 4. En este caso, se generaron un conjunto de valores de $\hat{L}_{anual,i}$ para diferentes latitudes (0° a -40° , con pasos de 5°) y azimuts ($90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ$ y 180°) en función de la distancia focal adimensional F_i/H . La Figura 6 muestra la variación de $\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1}$ con el cuadrado de la latitud, representado en la Ec. (14).

$$\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1} = A'(\gamma)\phi^2 + B'(\gamma) \quad (14)$$

Donde $A'(\gamma)$ y $B'(\gamma)$ se determinaron para las diferentes orientaciones γ mediante el método de ajuste de cuadrados mínimos (Tabla 1). La dependencia de A' y B' con el azimut corresponde a funciones de tercer orden ($R^2=0,9943$ y $0,9999$; respectivamente). Por lo que la ecuación resultante es:

$$\hat{L}_{anual,i} = \left[\left(\frac{D_i}{H} \right)^2 + 1 \right] [A'(\gamma)\phi^2 + B'(\gamma)] \quad (15)$$

Con $A'(\gamma) = (0,0625\gamma^3 - 27,5625\gamma^2) \times 10^{-8} + (3,5547\gamma - 112,1893) \times 10^{-5}$, y $B'(\gamma) = (-0,1299\gamma^3 + 52,8844\gamma^2) \times 10^{-5} - 0,0645\gamma + 2,6841$.

Tabla 1: Valores de ajuste para A' y B' para diferentes azimuts.

Azimut γ	A'	B'	R^2
90	3.044484E-04	0.2122897	0.9995
105	2.893766E-04	0.2376128	0.9993
120	2.504417E-04	0.3099625	0.9999
135	2.041615E-04	0.4127513	0.9991
150	1.252893E-04	0.5201816	0.9997
165	3.408650E-05	0.5988931	0.9989
180	0.000000E+00	0.6259237	1

Para el caso de un LFC cuyo eje principal tiene orientación Norte-Sur ($\gamma = 90^\circ$), la Ec. (15) es igual a Ec. (9).

La Figura 7 muestra un gráfico 3D de $\hat{L}_{anual,i} (F_i/H)^{-1}$ vs ϕ, γ . Como era de esperarse, el desplazamiento de los haces sobre el absorbedor es mínimo para un LFC con orientación Norte-Sur y emplazado con una latitud cercana a 0° . Considerando $\gamma = 90^\circ \pm 10^\circ$ el error con respecto al cálculo integral ronda el 3,4% para el peor caso.

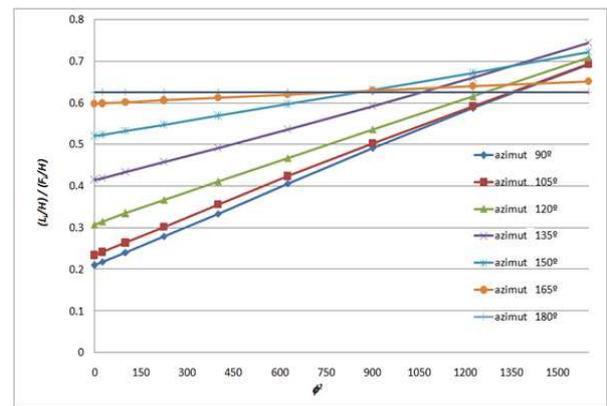


Fig. 6: $\hat{L}_{anual,i}/F_i$ vs el cuadrado de la latitud, para diferentes orientaciones del LFC. Se observa un comportamiento lineal.

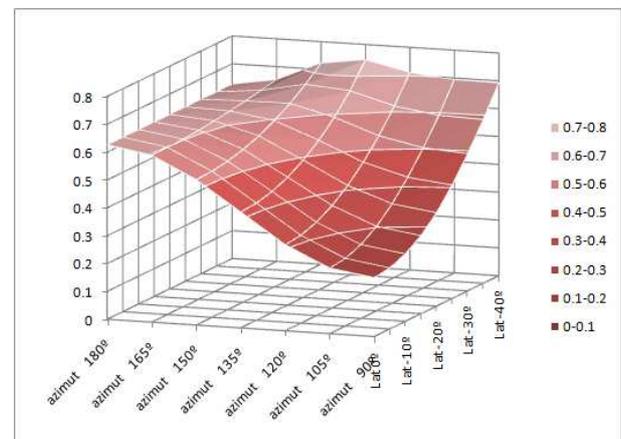


Fig. 7: $\hat{L}_{anual,i}/F_i$ vs latitud y azimut del LFC. Se observa que el efecto es mínimo para un LFC con orientación Norte-Sur y para latitudes cercanas al Ecuador.

4. MARCO EXPERIMENTAL

4.1 Mediciones y Metodología

En la literatura se encontró muy poca información en cuanto al marco experimental relacionado con la longitud no iluminada de un LFC, el cuál puede ser abordado mediante el uso de solarímetros o termografía. En este trabajo, se midió la variación de la longitud no iluminada a lo largo del día mediante análisis digital de imagen. Como se muestra en las siguientes secciones, el método experimental propuesto permite determinar la distancia sobre el absorbedor que se han desplazado los haces reflejados con un error promedio cercano a 7%.

El prototipo ensayado es un LFC con orientación Norte-Sur instalado en el campo experimental del INENCO en Salta, Argentina (24,7° latitud Sur; 65,4° longitud Oeste). Las características de este LFC se detallan en Tabla 3. El campo reflector está constituido por 9 filas de espejos y a cada una se le asignó un número desde el 1 (espejo hacia el Este, $D_1 = -4,92m$) hasta el 9 (hacia el Oeste $D_9 = 4,92m$); de esta manera el espejo N° 5 ($D_5 = 0m$). Se encuentra ubicado justo por debajo del absorbedor. La cubierta de Maylar (material plástico utilizado como cubierta) fue removida para obtener imágenes más claras de los perfiles de iluminación. En primera instancia, dos de las filas de espejos fueron independizadas del sistema de acople mecánico de manera de posicionar manualmente los reflectores para que la radiación reflejada incida en el centro del absorbedor. Luego, se toma una fotografía con una cámara digital ubicada exactamente debajo del absorbedor (mismo plano vertical) Se debe tener un cuidado especial al instante de tomar la fotografía, para evitar modificaciones automáticas en la imagen se desactivaron acciones automáticas como foco y brillo. Las fotografías se tomaron durante días claros en el periodo Diciembre/2013 a Septiembre/2014, con intervalos temporales de 20-30 minutos.

Tabla 3: Características geométricas y constructivas del prototipo LFC ensayado.

Item	Valor
Área de colección	43.2 m ²
Cantidad de espejos, N	9
Ancho de los espejos	0.80 m
Espaciamiento entre espejos (ejes)	1.23m
Altura de los espejos sobre el nivel del suelo	1.00 m
Longitud del absorbedor, Z	6.00 m
Altura de los tubos del absorbedor, H	5.36 m
Cantidad de tubos del absorbedor	5
Ancho del receptor	0.22 m
Tipo de cavidad del receptor	Trapezoidal

Se llevó a cabo un post-procesamiento de las imágenes obtenidas con la finalidad de disminuir los errores ópticos debido a la posible pendiente del absorbedor y/o la alineación no estricta de la cámara con respecto al plano del absorbedor. Cada fotografía fue analizada con PSICRO, un software para procesamiento de imágenes desarrollado en el INENCO (Hoyos, 2013). PSICRO realiza los cálculos necesarios para transformar la información desde una geometría proyectiva a geometría plana Euclidiana. El software requiere la especificación de cuatro puntos de

referencia, que se seleccionaron del plano de los tubos del absorbedor, y una coordenada central como muestra la Figura 8d. Una vez corregida la imagen, se determina la longitud no iluminada mediante un conteo de píxeles. Finalmente, la longitud encontrada es dividida por H para obtener el valor adimensional \hat{L}_i .

4.2 Resultados

De la Figura 8 se pueden observar las medidas realizadas para el primer y séptimo espejos ($D_1/H = -0,92, D_7/H = 0,46$) para los días 21 de Marzo (equinoccio) y 16 de Abril, 2014. En la figura se muestra la longitud no iluminada adimensional \hat{L}_i y en metros L_i en los ejes verticales principal y secundario, respectivamente. Como se esperaba, según lo descrito en la sección 3.1, el máximo desplazamiento de los haces ocurre al mediodía solar con una magnitud aproximada de 5m (primer espejo) y 4,1m (séptimo espejo) para el día 16 de Abril. Por lo tanto, en este momento del día, $f_{end,1} = 0,17$ y $f_{end,7} = 0,32$, es decir, que sólo el 17% del absorbedor permanece iluminado por contribución del 1er espejo, mientras que un 32% es iluminada mediante el espejo N°7. El factor de iluminación medio diario para el día 21 de Marzo fue de 0,6 para el espejo N°1 y 0,68 para el séptimo, mientras que para el 16 de Abril el factor toma los valores de 0,3 y 0,45 respectivamente.

La Figura 8 también contiene los valores calculados mediante la Ec. (1). El ajuste entre valores experimentales y calculados es aceptable, con valores de RMSE de 6,9% - 5,2% (1er espejo), y 4,1% - 2,5% (7mo espejo) para los días mencionados de Marzo y Abril, respectivamente. La mayor diferencia entre valores se aprecia cuando la altura solar es mínima (primeras horas de la mañana y últimas de la tarde). Para el espejo N°1 esta diferencia ronda los 0,35m y para el N°7 los 0,14m, lo que corresponde a errores relativos de 10% y 5% respectivamente. Debido a la mayor distancia focal del primer espejo, el mismo está influenciado en mayor medida por los errores de índole óptica. Algunas de estas fuentes de error son intrínsecas a los reflectores (inclinación, astigmatismo de la superficie espejada, no horizontalidad del receptor y/o en los ejes de los espejos) y otras propias del método de medida (incertidumbre en la determinación del punto donde comienza el perfil iluminado, errores en la definición de los puntos de referencia, relacionados con la cámara desde el punto de vista óptico o de software, etc.). Algunas de estas fuentes de error son más influyentes a medida que incrementa el recorrido óptico de los haces reflejados, en particular el astigmatismo de los espejos (Mertins, 2009). En este caso, la curvatura leve de los espejos (característica del LFC) produce la no convergencia de los haces reflejados en un foco estrictamente lineal (sin formación de imagen) y sí lo hacen en la zona delimitada por la catacústica de la parábola. Esta zona de convergencia varía de forma y posición durante el día.

El análisis cuantitativo de los errores ópticos y la eficiencia óptica total del LFC están fuera del alcance de este trabajo. Vale la pena señalar que no se cuenta con mediciones para los días de invierno, donde se podría esperar un incremento en los errores ópticos mencionados.

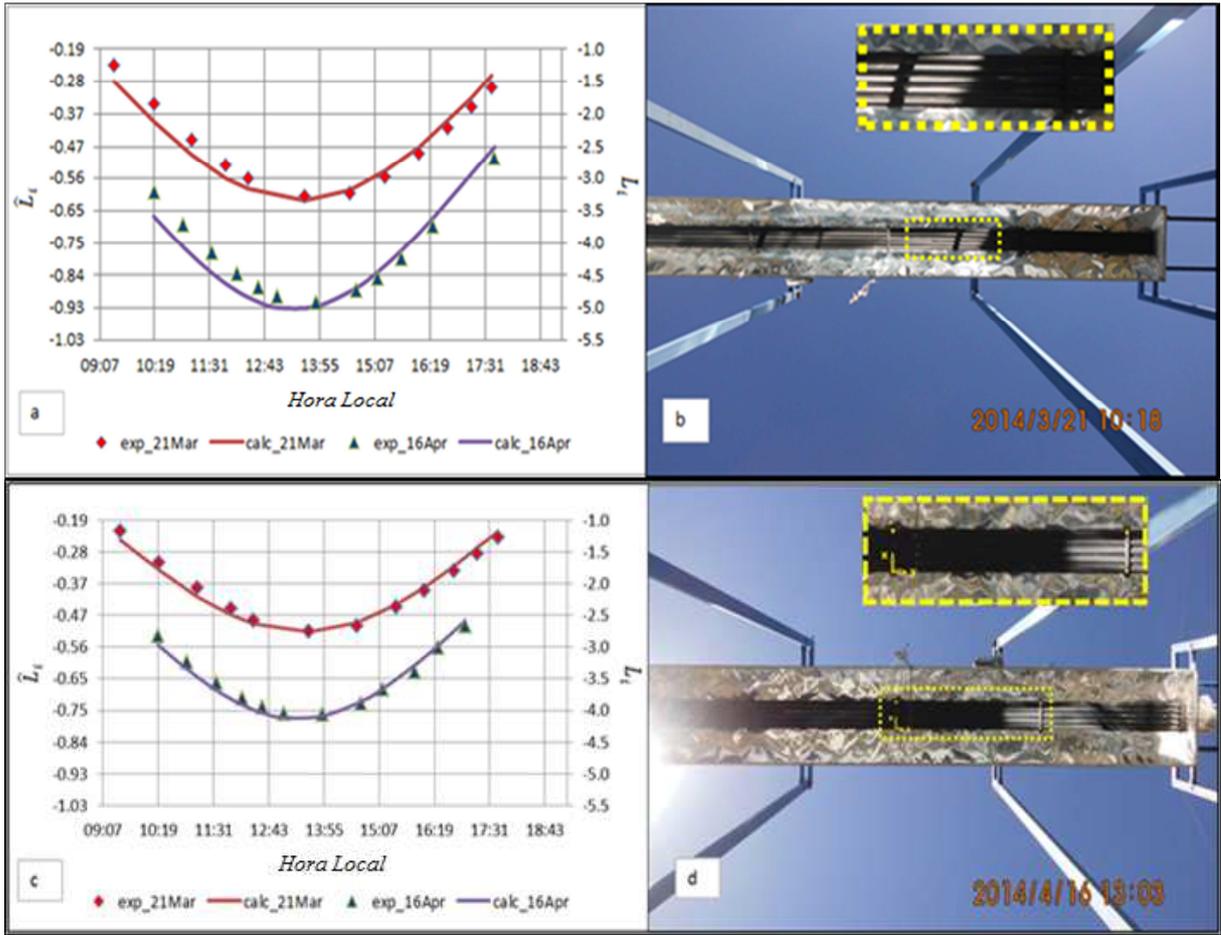


Fig. 8: \hat{L}_i instantáneo, experimental y teórico, para el primer espejo $D_1/H = -0,92m$ (a-b) y para el séptimo espejo $D_7/H = 0,46$ (c-d). Las medidas se realizaron en los días 21 de Marzo y 16 de Abril, 2014.

4.3 Estimación del factor de iluminación promedio diario y anual

Mediante las Ecs. (3) y (6) se calcularon, en términos medios diarios, las pérdidas ópticas debidas al efecto en estudio para el LFC instalado en el campo experimental del INENCO. La Figura 9 muestra los resultados para los días medios de cada mes del año. Las características geométricas de este prototipo (Tabla 3) son: $Z/H = 1,12, |D_i/H| \leq 0,92$. Se observa concordancia para los valores calculados para Marzo y Abril con respecto a los medidos, considerando el primer y séptimo espejo. De los resultados puede determinarse que las pérdidas alcanzan mayor intensidad en el mes de Junio, donde, por ejemplo, el absorbedor recibe sólo el 18% de la energía reflejada por el espejo central. Contrariamente, para los días de Diciembre, el absorbedor intercepta entre el 92% y 95% de la energía reflejada considerando todos los espejos del campo, lo que resulta altamente favorable al funcionamiento del prototipo.

La estimación de $f_{end,i}$ promedio anual se llevó a cabo mediante la Ec. (10), considerando las correcciones de la Tabla 2. Los resultados para cada espejo se muestran en la Tabla 4. Los valores del factor de iluminación anual varían entre 0,57 y 0,65. Como era de esperarse los menores valores están asociados a los espejos con mayor distancia focal. La corta longitud del receptor da lugar a que el 39% (en promedio) de la energía captada por el campo reflector se pierda por los extremos del absorbedor. Se trata de un

porcentaje de pérdida de energía muy considerable, por lo que se debe buscar estrategias que mitiguen el problema.

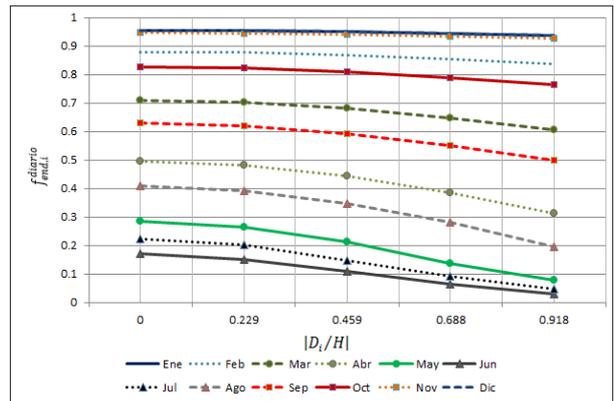


Fig. 9: $f_{end,i}^{diario}$ vs $|D_i/H|$ para los días medios de cada mes en Salta ($\phi = -24,73^\circ$).

Algunos autores han propuesto diferentes acciones: aumentar la longitud del absorbedor, inclinar el plano de los espejos fuera de la posición horizontal, agregar una superficie reflectora secundaria en el extremo del absorbedor, prolongar la longitud del campo reflector. En este LFC de pequeña escala (diseñado para aplicaciones con vapor de agua), donde el absorbedor y el campo reflector poseen la misma longitud, se montó la cavidad receptora

sobre un sistema de rieles que permite un desplazamiento de hasta 4 metros en dirección Sur (para mitigar el efecto en los meses de invierno y primavera/otoño).

Tabla 3: Estimación del factor de iluminación promedio anual asociado a cada espejo del LFC ensayado.

Número de espejo (i)	D/H	f _{anual}
1	0.92	0.57
2	0.69	0.59
3	0.46	0.61
4	0.23	0.63
5	0	0.65
6	0.23	0.63
7	0.46	0.61
8	0.69	0.59
9	0.92	0.57

5. CONCLUSIONES

Las pérdidas ópticas por los extremos del absorbedor se deben a dos cuestiones básicamente, la geometría del LFC y la ubicación geográfica del equipo. Para LFC de corta longitud, este efecto implica gran cantidad de energía captada por los espejos que no intercepta al absorbedor, siendo desaprovechada. Para sitios de alta latitud las pérdidas son mayores y se podría tener un absorbedor completamente sin iluminar para días de invierno. Así, para configuraciones rectangulares, donde las longitudes de absorbedor y del campo reflector son iguales, el absorbedor debe ser más largo que la longitud crítica para asegurar la captación de una cantidad razonable de radiación solar para cada día a lo largo del año.

La contribución de este trabajo fue proporcionar una expresión general para estimar el factor de iluminación y los metros que se desplazan los haces reflejados sobre el absorbedor en términos medios anuales para un LFC de configuración rectangular, lo que resulta más simple que el uso de técnicas de traza de rayos. Estas ecuaciones son válidas para cualquier latitud entre 0° y ±40° y cualquier azimut del LFC, con un error entre la relación propuesta y la solución de la integral exacta de 0,2% a 5%. El modelo muestra una buena concordancia entre valores calculados y experimentales, los últimos mediante la medida de \tilde{L}_i de un LFC con orientación Norte-Sur instalado en el campo experimental del INENCO. Se estudiarán algunas mejoras para este sistema como la optimización del espacio ocupado por el campo reflector y modificaciones en la curvatura de los espejos.

Para LFC no rectangulares, las pérdidas ópticas debidas a este efecto pueden ser reducidas mediante la prolongación del largo del campo reflector manteniendo fija la longitud de absorbedor o caso contrario donde la longitud prolongada corresponde al receptor, de hecho esta última configuración se ha adoptado en un LFC de 173m² instalado y desarrollado por el INENCO en la localidad de San Carlos, Salta. Actualmente se está estudiando este prototipo y las ventajas del nuevo diseño frente a la configuración rectangular. Como trabajo futuro se estudiarán con detalle los efectos de pérdida para esta nueva configuración y otras posibles, dependiendo del balance costo-beneficio para determinar la

situación más conveniente y manteniendo el objetivo de minimizar costos y maximizar el aprovechamiento de energía de un LFC de pequeña escala.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco de los proyectos del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación (PFIP 2008), CONICET y CIUNSA 2019/1 (Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta).

Apéndice A. Derivación de la longitud no iluminada \tilde{L}_i .

La posición aparente del sol (en coordenadas polares) se determina mediante los ángulos cenital y azimutal (θ_z, γ_s) y son calculados según la relación de Spencer como se observa en Duffie y Beckman (2006). Estos ángulos dependen de la latitud ϕ , la declinación δ y el ángulo horario solar ω .

La posición del sol, relativa al eje de rotación de los elementos del LFC es determinada mediante el ángulo del perfil solar α_p (Duffie y Beckman, 2006).

$$\tan \alpha_p = \frac{\tan(90 - \theta_z)}{\cos(\gamma_s - \gamma)} \quad (A.1)$$

Donde el ángulo azimutal del campo reflector γ varía entre 90° y 180° ($\gamma = 90^\circ$ para LFC Norte-Sur).

Para mantener la convención de signos propuesta en Duffie y Beckman (2006), se definieron los siguientes ángulos:

$$\alpha'_p = \begin{cases} -\alpha_p & , \alpha_p < 0^\circ \\ 180^\circ - \alpha_p & , \alpha_p \geq 0^\circ \end{cases} \quad (A.2)$$

Debido a la trayectoria solar, cada espejo debe ser posicionado a un ángulo β'_i (variación instantánea) para reflejar la radiación solar sobre los tubos del absorbedor. β'_i es positivo cuando la normal del espejo apunta hacia el oeste y se define mediante la Ec. (A.3).

$$\beta'_i = \frac{\alpha'_p - \text{atan}\left(\frac{D_i}{H}\right)}{2} - 45^\circ \quad (A.3)$$

De esta manera, en coordenadas esféricas, la posición del espejo en el espacio queda definida por la inclinación β_i y el azimut γ_i .

$$\gamma_i = \text{sign}(\beta'_i) * 90^\circ \quad (A.4)$$

$$\beta_i = |\beta'_i| \quad (A.5)$$

Bajo la suposición que la interacción de los haces de luz y el espejo ocurre en el eje central del mismo, como se muestra en la Figura A.1, donde los tres puntos espaciales considerados para el cálculo son: el origen (0,0,0) ubicado en el centro del espejo, la normal del espejo $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ y la dirección del haz incidente descrita por (θ_z, γ_s) , o en coordenadas Cartesianas mediante $P_s = (x_s, y_s, z_s)$. El método requiere todas las coordenadas según ejes Cartesianos, por lo que:

$$x_s = -\sin \theta_z \cos \gamma_s \quad (A.6)$$

$$y_s = \sin \theta_z \sin \gamma_s \quad (A.7)$$

$$z_s = \cos \theta_z \quad (A.8)$$

$$x_i = -\sin \beta_i \cos \gamma_i \quad (A.9)$$

$$y_i = \sin \beta_i \sin \gamma_i \quad (A.10)$$

$$z_i = \cos \beta_i \quad (A.11)$$

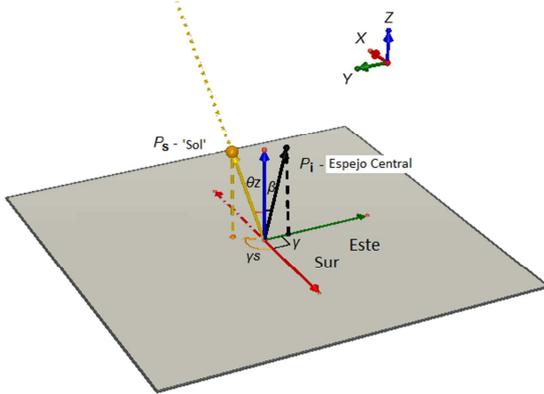


Fig. A.1: Posición aparente del sol (P_s) y normal del espejo i -ésimo (P_i) para un sistema de seguimiento Norte-Sur ($\gamma_s = \pm 90^\circ$). El origen del Sistema es el centro del espejo.

La ley de reflexión especular establece que los rayos solares incidentes y los reflejados permanecen en un mismo plano, el mismo contiene tres puntos del espacio P_s, P_i y el $(0,0,0)$:

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ x_s & y_s & z_s \\ x_i & y_i & z_i \end{vmatrix} = 0 \quad (A.12)$$

El resultado de este determinante, por algebra, determina la ecuación del plano que contiene ambos rayos (incidente y reflejado):

$$(y_s z_i - y_i z_s)x + (x_i z_s - x_s z_i)y + (x_s y_i - x_i y_s)z = 0 \quad (A.13)$$

El absorbedor puede ser representado como una recta en \mathbb{R}^3 , cuya ecuación paramétrica es:

$$\begin{cases} X_{\text{abs}} = X_0 + \lambda u_x \\ Y_{\text{abs}} = Y_0 + \lambda u_y \\ Z_{\text{abs}} = Z_0 + \lambda u_z \end{cases} \quad (A.14)$$

Donde (X_0, Y_0, Z_0) es el punto central del absorbedor y (u_x, u_y, u_z) es el vector unidad en la dirección del receptor. Así, si el absorbedor se encuentra a una distancia D_i hacia el este del espejo i -ésimo (en este caso la referencia es el eje del espejo) a una altura H sobre el plano de los espejos (definida por el ángulo γ), entonces:

$$\begin{cases} X_0 = D_i \cos \gamma \\ Y_0 = -D_i \sin \gamma \\ Z_0 = H \end{cases} \quad (A.15)$$

$$\begin{cases} u_x = \sin \gamma \\ u_y = \cos \gamma \\ u_z = 0 \end{cases} \quad (A.16)$$

λ se obtiene reemplazando la Ec. (A.14) en (A.13).

$$\lambda = \frac{-(y_s z_i - y_i z_s)u_y D_i + (x_i z_s - x_s z_i)u_x D_i}{(y_s z_i - y_i z_s)u_x + (x_i z_s - x_s z_i)u_y + (x_s y_i - x_i y_s)u_z} - \frac{(x_s y_i - x_i y_s)H}{(y_s z_i - y_i z_s)u_x + (x_i z_s - x_s z_i)u_y + (x_s y_i - x_i y_s)u_z} \quad (A.17)$$

λ es la longitud no iluminada L_i en metros, por lo que la longitud no iluminada adimensional es:

$$\hat{L}_i = \frac{L_i}{H} = \frac{-(y_s z_i - y_i z_s) \cos \gamma \left(\frac{D_i}{H}\right) + (x_i z_s - x_s z_i) \sin \gamma \left(\frac{D_i}{H}\right)}{(y_s z_i - y_i z_s) \sin \gamma + (x_i z_s - x_s z_i) \cos \gamma} - \frac{(x_s y_i - x_i y_s)}{(y_s z_i - y_i z_s) \sin \gamma + (x_i z_s - x_s z_i) \cos \gamma} \quad (A.18)$$

El valor de L_i puede ser positivo o negativo dependiendo de la dirección hacia donde se desplazan los haces reflejados. Así, $L_i > 0$ si los rayos se desplazan hacia el Norte y $L_i < 0$ en caso de hacerlo hacia el Sur. Esta convención es válida para un LFC con cualquier orientación, excepto Este-Oeste. Para este caso particular, donde $\gamma = 180^\circ$, $L_i > 0$ si los haces reflejados se desplazan hacia el Oeste y lo contrario para el otro caso.

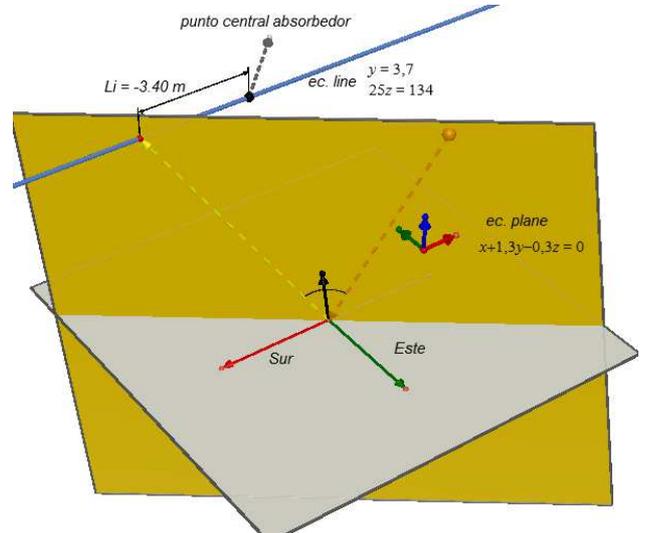


Fig. A.2: Esquema de la longitud no iluminada para el 15 de Septiembre (11:25 AM_{solar}) para una ubicación geográfica de $-24,7S$. El espejo considerado se ubica a $D_i = -3,69m$, el absorbedor tiene una altura de $5,36m$ resultando $L_i = -3,40m$.

La Figura A.2 muestra el esquema del efecto de desplazamiento de los haces reflejados sobre el absorbedor para el 15 de Septiembre (11:25AM_{solar}), para una latitud de

24,7° S. El espejo se ubica a $D_i = -3,69m$ y la altura del absorbedor es $H = 5,36m$. A través de las Ec. (A.1)-(A.18) junto con el cálculo de (θ_z, γ_s) se determinó que la longitud no iluminada, Ec. (A.17), es de -3,40m (el signo negativo indica que los haces se desplazaron hacia el Sur del absorbedor).

REFERENCIAS

- Bermejo, P., Pino, F.J., Rosa, F., (2010). Solar absorption cooling plant in Seville. *Solar Energy* 84, 8, 1503–1512.
- Buie, D., Dey, C.J., Mills, D., (2002). Optical considerations in line focus Fresnel concentrators. En *11th International Solar Paces Conference*, 197–203, Zürich, Switzerland.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, Third Ed., pp. 14. John Wiley & Sons, New York.
- Häberle, A., Berger, M., Luginsland, F., Zahler, C., Baitsch, M., Henning, H., Rommel, M., (2006). Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications. *Solar Paces*. En *13th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Sevilla, España.
- Heimsath, A., Bern, G., van Rooyen, D., Nitz, P., (2014). Quantifying optical loss factors of small linear concentrating collectors for process heat application. *Energy Procedia*, **48**, 77–86.
- Hongn M., Flores Larsen S., Altamirano M., Gea M., Bárcena H., (2014). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **18**, 08.19-08.26.
- Hoyos, D., De Paul, I., (2013). Sistema de estereografía digital de bajo costo. En *XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, pp. 08.163-08.170, Argentina.
- Huang, W., Han, Z., (2012). Theoretical analysis of error transfer from the surface slope to the reflected ray and their application in the solar concentrated collector. *Solar Energy* **86**, 2592–2599.
- Mertins, M., (2009). Technische und wirtschaftliche Analyse von horizontalen Fresnel-Kollektoren. Ph.D. thesis, Universita't Karlsruhe. Rawlins, J., Ashcroft, M., 2013. Report: small scale concentrated solar power – a review of current activity and potential to accelerate employment, carbon trust. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/191058/small_scale_concentrated_solar_power_carbon_trust.pdf>. Python, Disponible en: www.python.org, último acceso: 30.08.15.
- Reda, I., Andreas, A., (2008). Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *NREL/TP-560-34302*. Disponible en: <<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>> (último acceso: 28.07.14).
- Shaoxuan, Pu, Chaofeng, Xia, (2011). End-effect of linear Fresnel collectors. En *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 25–28, Asia–Pacific.
- Sultana, T., Morrison, G.L., Rosengarten, G., (2012). Thermal performance of a novel rooftop solar micro-concentrating collector. *Solar Energy* 86, 7, 1992–2000.
- Xiao, Gang, (2012). Tilting mirror strips in a linear Fresnel collector. University of Nice, France. Disponible en: <<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/67/52/22/PDF/tilt.pdf>>, p. 4.
- Zhu, G., (2013). Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors. *Solar Energy* **94**, 240–252.