IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Análisis de la distancia focal en un concentrador solar de disco parabólico utilizando trazado de rayos

Analysis of focal length in a parabolic dish solar concentrator using ray tracing

D. Rojas-Valdez[1], M. Sánchez-Pozos[1] *, M. D. Durán-García[1], I. G. Martínez-Cienfuegos[1], M. F. Mohedano-Castillo[2]
(*msanchezpo@uaemex.mx)

Recibido: 16 de junio de 2026 Aceptado: 04 de agosto de 2026

Resumen

Este estudio investiga la influencia de la longitud focal en el rendimiento de un concentrador solar de disco parabólico (CDP) mediante el método de trazado de rayos. Se utilizaron el software SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB para analizar cómo varía la energía concentrada en el receptor al modificar la longitud focal del paraboloide. Los concentradores solares parabólicos son fundamentales para aplicaciones de energía solar de alta temperatura, como la generación de electricidad, donde la eficiencia del sistema depende en gran medida de la correcta focalización de la energía solar. La investigación se centra en el análisis de la distribución del flujo de energía en el receptor para tres configuraciones correspondientes a distancias focales de 2.0 m, 2.2 m y 2.4 m, utilizando el método Monte Carlo para simular el comportamiento de los rayos solares. Los resultados muestran que existe una longitud focal óptima que maximiza la concentración de energía en el receptor, mejorando así la eficiencia del sistema. Además, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con SolTrace, Tonatiuh y MATLAB, identificando diferencias mínimas en la uniformidad y la distribución de la energía concentrada. El estudio concluye que la correcta selección de la longitud focal es crucial para optimizar el rendimiento de los concentradores solares parabólicos. Estos hallazgos son de gran importancia tanto para el diseño de sistemas solares más eficientes como para la implementación de tecnologías de concentración solar en aplicaciones industriales. Este trabajo contribuye significativamente al campo de la energía solar, ofreciendo un enfoque metodológico para la optimización del rendimiento

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), Toluca, Estado de México.
[2]Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), Toluca, Estado de México.

de concentradores solares parabólicos.

Palabras clave: Trazado de rayos, energía, concentración solar, paraboloide

ABSTRACT

This study investigates the influence of focal length on the performance of a parabolic dish concentrator (PDC) using ray tracing methods. The analysis was conducted using SolTrace, Tonatiuh, and a MATLAB-based program to examine how the concentrated energy at the receiver varies with changes in the paraboloid's focal length. Parabolic solar concentrators are essential for high-temperature solar energy applications, such as electricity generation, where system efficiency heavily relies on the accurate focusing of solar energy. The research focuses on analyzing the energy flux distribution on the receiver for various focal lengths, employing the Monte Carlo method to simulate the behavior of solar rays. The results indicate that there is an optimal focal length that maximizes energy concentration at the receiver, thereby enhancing system efficiency. Additionally, a comparative analysis between the outputs from SolTrace, Tonatiuh, and MATLAB was conducted, revealing minimal differences in the uniformity and distribution of concentrated energy. The study concludes that selecting the appropriate focal length is crucial for optimizing the performance of parabolic solar concentrators. These findings are highly relevant for the design of more efficient solar systems and the implementation of solar concentration technologies in industrial applications. This work significantly contributes to the field of solar energy by providing a methodological approach for performance optimizing parabolic concentrators.

Keywords: Ray tracing, energy, solar concentration, paraboloid

INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha posicionado como una de las alternativas renovables más importantes gracias a su amplia disponibilidad y carácter sustentable. Dentro de las tecnologías desarrolladas para aprovechar este recurso, los concentradores solares parabólicos sobresalen por su capacidad para concentrar la radiación solar y alcanzar elevadas temperaturas de operación con altos niveles de eficiencia, lo que favorece su implementación en sistemas de generación eléctrica y procesos industriales que demandan energía térmica de alta temperatura [1]. Los concentradores solares parabólicos concentran la radiación solar sobre un receptor focal, permitiendo su aprovechamiento en forma de energía térmica o eléctrica [2].

La eficiencia de estos sistemas depende de diversos factores, siendo uno de los más críticos la longitud focal del paraboloide, que define la distancia entre el reflector y el receptor. Esta longitud focal influye significativamente en la concentración y distribución del flujo de calor en el receptor, afectando

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

la eficiencia global del sistema. Un ajuste preciso de la longitud focal es esencial para maximizar la concentración de energía y minimizar las pérdidas ópticas y térmicas.

El trazado de rayos es una técnica efectiva para optimizar la geometría de los concentradores solares [3]. Esta técnica permite simular el comportamiento de los rayos solares al interactuar con las superficies reflectantes del concentrador y predecir la distribución del flujo de calor en el receptor. En este estudio, se utiliza SolTrace, Tonatiuh y un código generado en Matlab para llevar a cabo el trazado de rayos, esto con la finalidad de analizar cómo varía la energía concentrada en el receptor en función de la longitud focal del concentrador parabólico.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la influencia de la longitud focal sobre la distribución del flujo energético y el desempeño óptico de un CDP mediante técnicas de trazado de rayos. Al comparar los resultados obtenidos con SolTrace y el programa desarrollado con MATLAB, buscamos validar nuestros modelos y obtener información valiosa para el diseño y la optimización de estos sistemas. Este análisis no solo contribuirá al conocimiento académico, sino que también tendrá aplicaciones prácticas en el desarrollo de tecnologías solares más eficientes y económicas.

En la literatura, varios estudios han investigado la optimización de la longitud focal en concentradores solares parabólicos. Klepp (2025) [4] evaluó el desempeño de un sistema Dish Stirling para aplicaciones de multi generación energética mediante simulaciones realizadas con SAM. El sistema alcanzó una eficiencia eléctrica del 25 % y una eficiencia total del 78 %, demostrando el potencial de esta tecnología para la producción simultánea de energía térmica y eléctrica a partir de energía solar concentrada. Banitia et al., (2024) [5] realizaron un análisis óptico de un concentrador solar de disco parabólico empleando trazado de rayos Monte Carlo para optimizar el diseño de sus componentes ópticos. Los autores identificaron configuraciones geométricas que permitieron mejorar la concentración de energía sobre el receptor, evidenciando la importancia del diseño óptico en el desempeño de los concentradores solares parabólicos. Martins et al., (2026) [6] investigaron la influencia de diversos parámetros geométricos y ópticos en el desempeño de concentradores solares de disco parabólico utilizando trazado de rayos Monte Carlo. Los resultados mostraron que la longitud focal, el ángulo de borde y los errores de alineación afectan directamente la distribución del flujo energético sobre el receptor y la eficiencia óptica del sistema. Farhat et al., (2024) [7] analizaron el desempeño energético de un concentrador solar de disco parabólico mediante evaluaciones experimentales y numéricas. Los autores demostraron que la geometría del receptor y la reducción de pérdidas ópticas y térmicas influyen significativamente en la eficiencia global del sistema, resaltando la importancia de optimizar el diseño de los componentes receptores. Rahbari et al., (2025) [8] evaluaron experimentalmente un receptor de cavidad cónico incorporando un reflector secundario en un concentrador solar de disco parabólico. Los resultados mostraron que el uso del reflector incrementó la eficiencia térmica en 5.47 %, alcanzando una eficiencia

máxima del 46.95 % y reduciendo significativamente las pérdidas térmicas en el receptor. Además, se reportó una mejora en la eficiencia energética y una reducción del 21.5 % en las emisiones equivalentes de CO_2, demostrando el potencial de esta estrategia para optimizar el desempeño de los concentradores solares parabólicos.

Mitchell et al., (2025) [9] compararon las herramientas de trazado de rayos SolTrace, Solstice y TieSOL para modelar la distribución del flujo solar en sistemas de concentración de potencia. Los resultados evidenciaron pequeñas discrepancias entre las simulaciones y destacaron la necesidad de validar cuidadosamente estas herramientas para garantizar la precisión de los análisis ópticos y del diseño de receptores. Jadhav et al., (2022) [10] utilizaron el software SolTrace para analizar la distribución del flujo solar concentrado y optimizar la geometría de un receptor central en un sistema heliostático. Los resultados mostraron que el trazado de rayos es una herramienta eficaz para determinar el tamaño y la posición del receptor, mejorando la captación de energía y la distribución del flujo incidente. Richter & Hövelmann, (2022) [11] demostraron que SolTrace y Tonatiuh son ampliamente utilizados para modelar sistemas de receptor central, donde SolTrace es valorado por su capacidad para manejar sistemas ópticos complejos, mientras que Tonatiuh es preferido por su enfoque de código abierto y su flexibilidad en el diseño de experimentos

Este trabajo busca no solo contribuir al cuerpo de conocimiento existente, sino también proporcionar datos valiosos para ingenieros y diseñadores en el campo de la energía solar, facilitando el desarrollo de tecnologías más avanzadas y eficientes. Los resultados de este estudio podrán servir de base para futuras investigaciones y desarrollos en la optimización de concentradores solares y otros sistemas de energía renovable. Recientemente, Li et al., (2024) [12] propusieron una metodología de optimización para concentradores solares parabólicos empleando algoritmos evolutivos y herramientas de trazado de rayos, demostrando que pequeñas modificaciones geométricas pueden incrementar significativamente la eficiencia de concentración solar. Estos resultados resaltan la importancia de analizar parámetros geométricos específicos, como la longitud focal, para mejorar el desempeño óptico del sistema.

Materiales y métodos

La metodología de este estudio se centra en la simulación del comportamiento de la energía concentrada por un CDP mediante trazado de rayos. Se utilizó el software de trazado de rayos SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB para analizar como varía la energía concentrada en el receptor en función de la longitud focal del paraboloide. En la Figura 1, se describe detalladamente el proceso seguido mediante un diagrama de flujo. Cabe destacar que el trazado de rayos se realizó para tres distancias focales diferentes empleando SolTrace, Tonatiuh y el código de Matlab.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

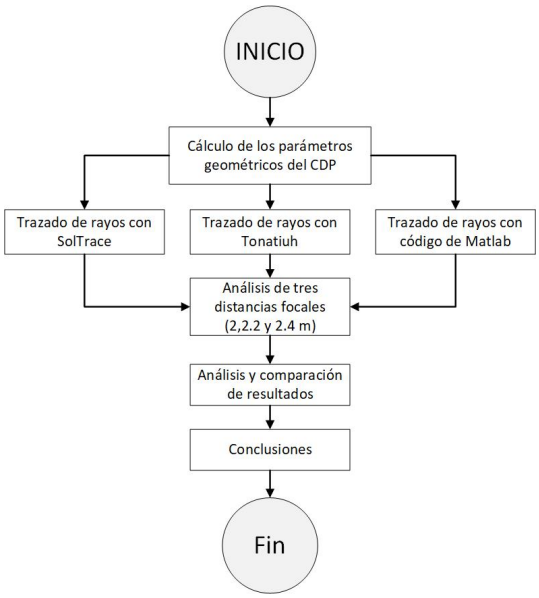


FIGURA 1. Diagrama de flujo del método empleado

En función de los alcances de esta investigación es importante considerar los parámetros geométricos para el dimensionamiento y diseño del CDP. Por este motivo, en la siguiente sección se describen estos parámetros.

Descripción de los Parámetros Geométricos del Disco

La concentración en el contexto de un concentrador solar se refiere a la relación entre el área de la apertura del concentrador y el área del receptor. Matemáticamente, se puede expresar como la Ec. (1):

$$C = \frac{A_{ap}}{A_r} \tag{1}$$

donde A_{ap} corresponde al área de apertura del concentrador solar y A_r al área del receptor. La Figura 2 describe este parámetro. Esta relación de concentración indica cuántas veces la energía solar es concentrada en el receptor en comparación con la energía captada directamente por la apertura del concentrador.

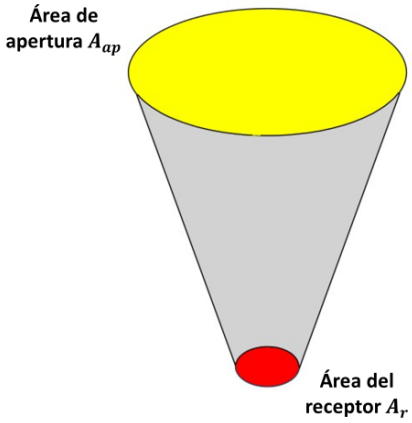


FIGURA 2. Principio de la concentración solar

En este sentido la relación de concentración para un concentrador de disco parabólico con absorbedor plano se puede calcular en función del área de apertura que corresponde a una sección circular y el área del receptor que se considera de igual manera una circunferencia, por lo tanto, la expresión que permite calcular dicha expresión es la Ec. (2):

$$C_{CDP} = \left(\frac{r_{ap}}{r_r}\right)^2 - 1 \tag{2}$$

Asimismo, el CDP empleado en este estudio se caracteriza por varios parámetros geométricos clave que determinan su capacidad para concentrar la luz solar hacia el receptor. Estos parámetros geométricos y sus relaciones de diseño han sido reportados previamente por Kumar et al., (2023) [13] y El-Gamal et al., (2022) [14]. Las ecuaciones empleadas para determinar la longitud focal, la altura del CDP y el diámetro del receptor corresponden a relaciones geométricas derivadas de la geometría del paraboloide de revolución y han sido ampliamente utilizadas en el diseño de concentradores solares de disco parabólico [13,14]. A continuación, se describen los parámetros antes mencionados:

Diámetro de apertura (D_a): Es el diámetro del área de apertura del CDP, como se visualiza en la Figura 3, que corresponde un círculo, cuyas dimensiones están sujetas a la magnitud de la concentración solar requerida.

Ángulo de Borde (θ_r): Es el ángulo subtendido por el reflector desde el vértice de la parábola. Este ángulo define la forma y el tamaño del paraboloide, y afecta la distribución de los rayos solares reflejados.

Longitud Focal (f): Es la distancia desde el vértice de la parábola hasta el punto focal (Ver Figura 3), donde se concentra la luz solar. La longitud focal es crucial para determinar la eficiencia de

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

la concentración de la energía solar. Con base en lo anterior, la longitud focal se establece a partir de la Ec. (3) [14]:

$$f = \frac{D_{ap}}{4\tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right)} \tag{3}$$

Altura del CDP (*h*): Es la distancia desde el borde del reflector hasta el vértice de la parábola. Esta profundidad influye en el ángulo de concentración y la distribución del flujo de energía. La altura del concentrador se puede obtener a partir de la Ec. (4) [14]:

$$h = \frac{1}{4f}\left(\frac{D_{ap}}{2}\right)^2 \tag{4}$$

Diámetro del receptor (D_r): Es el diámetro que debe de tener el receptor para que la radiación solar reflejada por el CDP se concentre sobre la superficie del receptor. Este diámetro se calcula en la Ec. (5) [13]:

$$D_r = 2\left(\frac{\left(\frac{2f}{1+\cos(\theta_r)}\right) sen(\theta_0)}{sen(\pi - \left(\theta_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right)\right)}\right) \tag{5}$$

El análisis de estos parámetros geométricos es esencial para diseñar un concentrador eficiente. Los estudios previos han demostrado que la geometría del paraboloide juega un papel crucial en la eficiencia del sistema de concentración solar. Investigaciones recientes han confirmado que la geometría del concentrador solar influye de manera significativa en parámetros ópticos como la relación de concentración, la distribución de la irradiancia y las aberraciones ópticas presentes en el sistema. Al- Arab et al., (2024) [15] compararon las características ópticas de concentradores solares parabólicos y esféricos, encontrando que la configuración parabólica presenta relaciones de concentración considerablemente superiores, lo que la convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones de alta concentración solar. Del mismo modo, la relación de concentración para el CDP se puede calcular en función de θ_r y θ_s, este último corresponde al ángulo de aceptación que se considera como $\theta_s = 0{,}2666\ ^\circ$ [14], este valor se encuentra asociado con la ventana angular solar proveniente del Sol. Por ello, considerando la Ec. (6), la relación de concentración se calcula como [13]:

$$C_{CDP} = \left(\frac{\tan(\theta_r)}{[tan(\theta_r + \theta_s) - \tan(\theta_r)]\ \cos(\theta_s)}\right)^2 \tag{6}$$

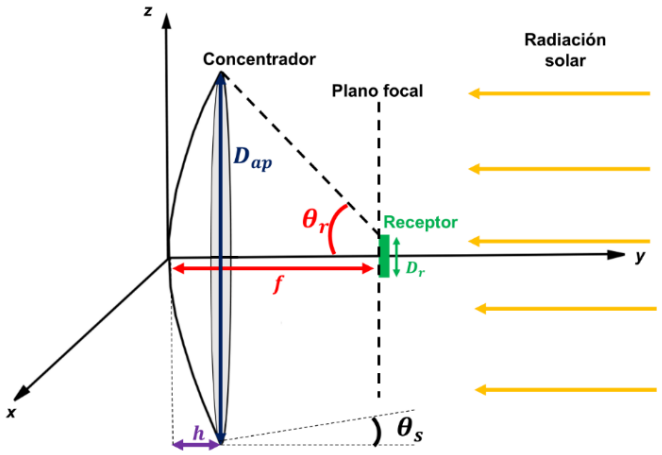


FIGURA 3. Parámetros geométricos del CDP

Parámetros Ópticos y Geométricos para el trazado de rayos

Para la simulación del trazado de rayos, se han seleccionado los siguientes parámetros ópticos y geométricos (Ver Tabla 1):

Tabla 1. Parámetros ópticos y geométricos del CDP.

Parámetro	Valor
Diámetro del Disco (D_a)	1.4 m
Ángulo de borde (θ_r)	18°
Altura del Paraboloide (h)	5.54 cm
Longitud Focal (f)	2.21 m
Reflectividad del Disco (ρ)	0.95
DNI (Irradiancia Directa Normal)	1000 W/m^2
Diámetro del Receptor (D_r)	0.021 m
Relación de concentración (C)	3970 soles

Estos parámetros se han seleccionado para representar un sistema de concentración solar típico y para estudiar el efecto de la variación de la longitud focal en la distribución del flujo de energía en el receptor.

Modelo Monte Carlo para el trazado de rayos

El modelo estadístico de Monte Carlo es ampliamente utilizado en simulaciones de trazado de rayos para estudiar la óptica y la concentración de energía en sistemas solares, como los concentradores

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

solares de disco parabólico [3]. Recientemente, Banitia et al., (2025) [16] emplearon la metodología de trazado de rayos Monte Carlo para analizar el comportamiento óptico y térmico de un concentrador solar parabólico, demostrando la capacidad de esta técnica para optimizar la distribución energética sobre el receptor y evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Tanto SolTrace como Tonatiuh utilizan este método para modelar la propagación de los rayos solares y analizar cómo interactúan con los componentes del sistema. Por esta razón en la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo donde se describen las etapas que son empleadas en trazado de rayos empleando este modelo. Por tal motivo, con base en lo descrito en el diagrama de flujo de la Figura 4 a continuación se describen las etapas [17] [18] [19] [20].



FIGURA 4. Diagrama de flujo del modelo Monte Carlo

Con base en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4, a continuación, se describen las expresiones y ecuaciones empleadas en las etapas para llevar a cabo el trazado de rayos [21]. En la primera etapa, se generan los rayos que representan la luz solar incidente. Estos rayos son emitidos desde una fuente o una distribución que representa la luz solar. En aplicaciones solares, los rayos suelen ser paralelos y se distribuyen uniformemente sobre el área de apertura del concentrador. Para ello es necesario determinar la posición y la dirección inicial del rayo. Por lo tanto, la posición inicial del rayo se expresa con la Ec. (7):

$$r_0 = (x_0, y_0, z_0) \tag{7}$$

La posición inicial del rayo en el plano de apertura se puede determinar de manera aleatoria dentro del área de apertura A_{ap} utilizando una distribución uniforme. Por su parte, la dirección inicial del rayo se determinar mediante la Ec. (8):

$$d_0 = (cos\theta cos\phi, cos\theta sen\phi, sen\phi) \tag{8}$$

donde, θ es el ángulo de inclinación respecto al eje normal a la apertura, y ϕ es el ángulo azimutal. Estos ángulos pueden generarse utilizando una distribución angular, a menudo representada por una función de distribución de irradiancia.

En la etapa donde los rayos generados interactúan con las superficies es necesario resolver la ecuación paramétrica de la línea del rayo, expresada en la Ec. (9):

$$r(t) = r_0 + t \bullet d_0 \tag{9}$$

donde *r(t)* es la posición del rayo en función del parámetro *t*, r_0 es la posición inicial, y es la d_0 es la dirección del rayo. A partir de ello, si la superficie es descrita por una ecuación *f(r)=0*, se encuentra el parámetro *t* que satisface (ver Ec. (10) [22]:

$$f\left(r_0 + t \bullet d_0\right) = 0 \tag{10}$$

En la tercera etapa la reflexión y refracción del rayo se pueden modelar empleando las leyes de reflexión y refracción [22]. La ley de reflexión se denota por la Ec. (11):

$$d_{ref} = d - 2(d \bullet n) \tag{11}$$

Donde d_{ref} es la dirección del rayo reflejado, *d* es la dirección del rayo incidente y *n* es el vector normal a la superficie. Del mismo modo, la ley de Snell (refracción) [22] se expresa en la Ec. (12):

$$\frac{sen\ \theta_i}{sen\ \theta_r} = \frac{n_2}{n_1} \tag{12}$$

de aquí se tiene que θ_i es el ángulo de incidencia del rayo, θ_r es el ángulo de refracción y n_1 y n_2, son los índices de refracción de los dos medios. Con base en lo anterior, La dirección del rayo refractado d_{refr} se puede calcular usando la Ec. (13):

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

$$d_{refr} = \frac{n_1}{n_2} d + \left(\frac{n_1}{n_2} (d \bullet n) - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (1 - (d \bullet n)^2)} \right) \tag{13}$$

Es de suma importancia mencionar que el modelo Monte Carlo acumula la energía en el receptor con base en la cantidad de rayos que llegan a él. Por esta razón, la cuarta etapa del diagrama de flujo (Figura 4) correspondiente al cálculo de la energía concentrada en el receptor emplea la Ec. (14):

$$E_r = \sum_{i=1}^{N} w_i \tag{14}$$

donde w_i es la energía asociada a cada rayo que llega al receptor, y N es el número total de rayos que impactan el receptor. Además, se calcula el factor de concentración que se define como la relación entre la energía concentrada en el receptor y la energía total incidente en la apertura representada en la Ec. (15):

$$FC = \frac{E_r}{E_{inc}} \tag{15}$$

donde E_{inc} es la energía total incidente en el área de apertura, y E_r es la energía total que llega al receptor. Una vez calculados los parámetros anteriores, es importante determinar la probabilidad de que un rayo sea reflejado, absorbido o transmitido, basándose principalmente en las propiedades ópticas de los materiales. Por ello, se calcula la probabilidad de reflexión (P_{ref}) a partir de la Ec. (16):

$$P_{ref} = R(d, n) \tag{16}$$

en donde $R(d, n)$ es la reflectancia de la superficie del concentrador. Con ello, se calcula la también la probabilidad de absorción (P_{abs}) empleando la Ec. (17):

$$P_{abs} = 1 - R(d, n) - T(d, n) \tag{17}$$

en esta expresión $T(d, n)$ es la transmitancia del material. Estas ecuaciones y expresiones forman la base del modelo Monte Carlo en trazado de rayos, permitiendo simular con precisión la propagación de la luz y el comportamiento de los sistemas ópticos en aplicaciones solares [3].

Simulación del Trazado de Rayos con SolTrace, Tonatiuh y código de Matlab

De acuerdo con el objetivo de esta investigación se llevará a cabo la simulación del trazado de rayos del CDP con los parámetros geométricos descritos previamente con el software SolTrace, Tonatiuh y con el código programado en Matlab. La finalidad de simularlo con tres diferentes softwares es validar los

resultados del trazado de rayos como se describe a continuación. Cabe destacar, que los tres trazadores de rayos, emplean las mismas etapas durante el proceso, tal como se muestra en el diagrama de flujo descrito en la Figura 5.



FIGURA 5. Diagrama de flujo de las etapas del trazado de rayos con SolTrace, Tonatiuh y código de Matlab

Debido a que el presente trabajo corresponde a una etapa preliminar de análisis y diseño óptico del concentrador solar de disco parabólico, no se realizó una validación experimental directa mediante un prototipo físico. En su lugar, la validación de los resultados se llevó a cabo mediante una comparación cruzada entre tres herramientas independientes de trazado de rayos: SolTrace, Tonatiuh y un código desarrollado en MATLAB. La concordancia observada en la distribución espacial del flujo energético y en la determinación de la longitud focal óptima permitió verificar la consistencia de los resultados obtenidos. Como trabajo futuro se contempla la construcción del prototipo experimental para realizar la validación física de los resultados numéricos obtenidos.

Simulación con SolTrace

SolTrace es una herramienta de trazado de rayos desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). Permite modelar sistemas ópticos complejos y evaluar su rendimiento mediante simulaciones detalladas. En este estudio, se utiliza SolTrace para simular la concentración de rayos solares en el receptor para diferentes longitudes focales del CDP. El uso de SolTrace es ampliamente reconocido en la comunidad científica debido a su capacidad para simular con precisión sistemas de concentración solar complejos (Figura 6). Estudios previos han demostrado que SolTrace es una herramienta eficaz para predecir y optimizar el rendimiento de concentradores solares parabólicos [23].

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

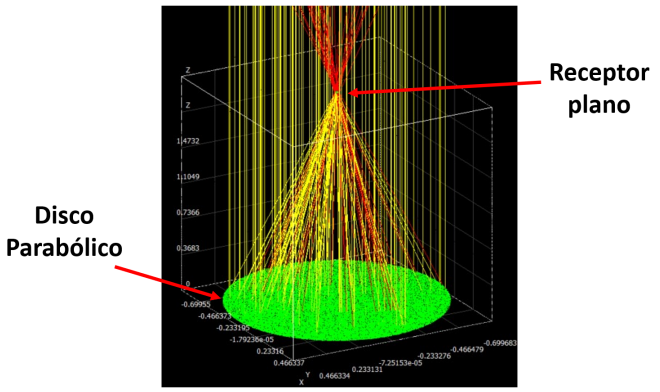


FIGURA 6. Trazado de rayos con SolTrace

Simulación con Tonatiuh

Tonatiuh es un software de código abierto especializado en la simulación de sistemas de concentración solar, desarrollado por la Agencia Española de Energía Renovable (CIEMAT). Se utiliza para modelar y analizar el comportamiento óptico de concentradores solares mediante técnicas de trazado de rayos Monte Carlo [24]. A continuación, se describe el proceso de simulación con Tonatiuh:

El uso de Tonatiuh es bien conocido en la comunidad científica debido a su capacidad para simular sistemas de concentración solar complejos con alta precisión. Estudios previos han demostrado que Tonatiuh es una herramienta eficaz para el diseño y optimización de concentradores solares parabólicos y otros sistemas de concentración óptica [25].

Simulación con MATLAB

Además de SolTrace y Tonatiuh, se desarrolló un programa de MATLAB para realizar el trazado de rayos y obtener la distribución del flujo de energía en el receptor. El desarrollo del código tuvo como objetivo proporcionar una herramienta independiente para verificar la consistencia de los resultados obtenidos mediante ambos softwares de trazado de rayos. Asimismo, MATLAB ofrece una mayor flexibilidad para modificar parámetros geométricos y ópticos, implementar condiciones particulares de simulación y desarrollar futuras estrategias de optimización del concentrador solar. De esta manera, el código desarrollado no pretende sustituir a SolTrace o Tonatiuh, sino complementar el análisis mediante una metodología independiente que permita comparar tendencias, identificar posibles discrepancias y aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

RESULTADOS

De acuerdo con el objetivo de este estudio, se simuló el trazado de rayos de un CDP con tres

distintas longitudes focales; 2, 2.4 y 2.2 metros, esta última corresponde a la longitud focal calculada geométricamente, en donde se afirma que se tiene la energía concentrada con los valores máximos para este CDP.

Longitud focal de 2.20 m

Con base en la Figura 7, se muestra una alta concentración de flujo en el centro del receptor, alcanzando valores máximos de aproximadamente 6 MW/m^2 que disminuyen radialmente hacia los bordes. Esta distribución indica una alta eficiencia en la concentración de energía en el punto focal, esencial para maximizar la absorción en aplicaciones de energía solar. En la Figura 7a se presenta el mapa de energía generado por SolTrace, en él se observa un patrón similar de alta concentración central con valores máximos alrededor de 7 MW/m^2, pero con una distribución más uniforme en comparación con Tonatiuh (Figura 7b). La uniformidad observada en SolTrace puede ser indicativa de una mejor dispersión de los rayos solares, lo que puede resultar en un calentamiento más homogéneo del receptor. El gráfico generado por el código en Matlab, en la Figura 7c, se aprecia una distribución de flujo de calor más difusa con valores máximos en torno a 6 MW/m^2. Los valores en Matlab son significativamente menores, lo cual puede deberse a diferentes parámetros de simulación o a la metodología utilizada para el trazado de rayos. No obstante, el patrón general sigue mostrando una concentración mayor en el centro y una disminución hacia los bordes, coherente con los resultados obtenidos por Tonatiuh y SolTrace.

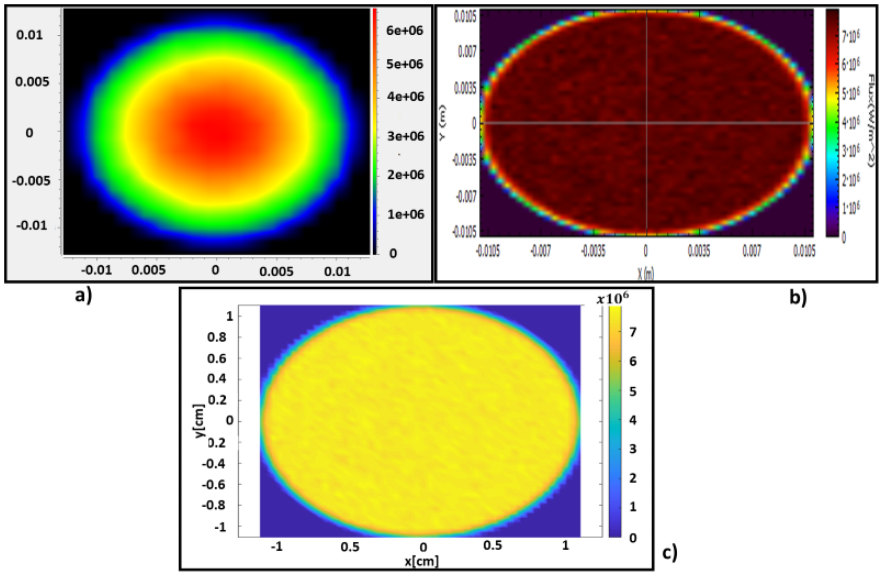


FIGURA 7. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2.20 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

Asimismo, la Figura 8 muestra el perfil radial del flujo de energía en receptor, considerando el

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

comportamiento mostrado en la Figura 7. Se puede observar que la tendencia de la energía distribuida en el receptor es gaussiana. Por ello, se observa que el máximo valor de energía en el receptor se localiza en el centro, por otra parte, la energía disminuye hacia los alrededores del receptor plano.

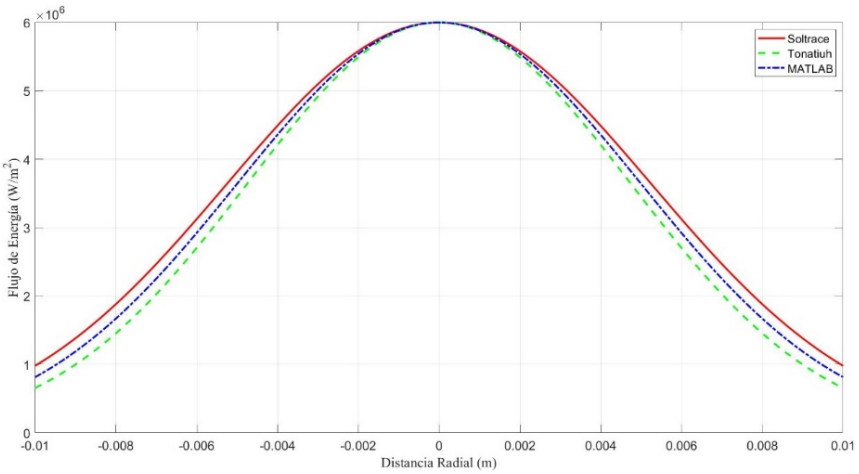


FIGURA 8. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2.2 m

Los resultados obtenidos para la distancia focal de 2.2 m muestran un comportamiento consistente con la teoría óptica de concentradores solares parabólicos. Debido a que esta distancia corresponde a la posición focal calculada geométricamente, los rayos reflejados convergen sobre una región reducida del receptor, generando los valores máximos de flujo energético observados. Este comportamiento coincide con lo reportado por Pavlovic et al., [6] y Bellos et al., [8], quienes identificaron que la localización precisa del receptor favorece un incremento significativo de la densidad energética concentrada.

Longitud focal de 2 m

La imagen que se muestra en la Figura 9 describe el análisis del flujo de calor en el receptor de un concentrador parabólico utilizando Tonatiuh, SolTrace y Matlab. En Tonatiuh (Figura 9b), el flujo de energía alcanza un máximo de 120 kW/m^2, concentrándose en el centro del receptor y disminuyendo hacia los bordes, indicando alta eficiencia en la concentración. SolTrace (Figura 9a) presenta una distribución similar, con valores máximos alrededor de 120 kW/m^2 y una mayor uniformidad, posiblemente debido a un trazado de rayos más preciso.

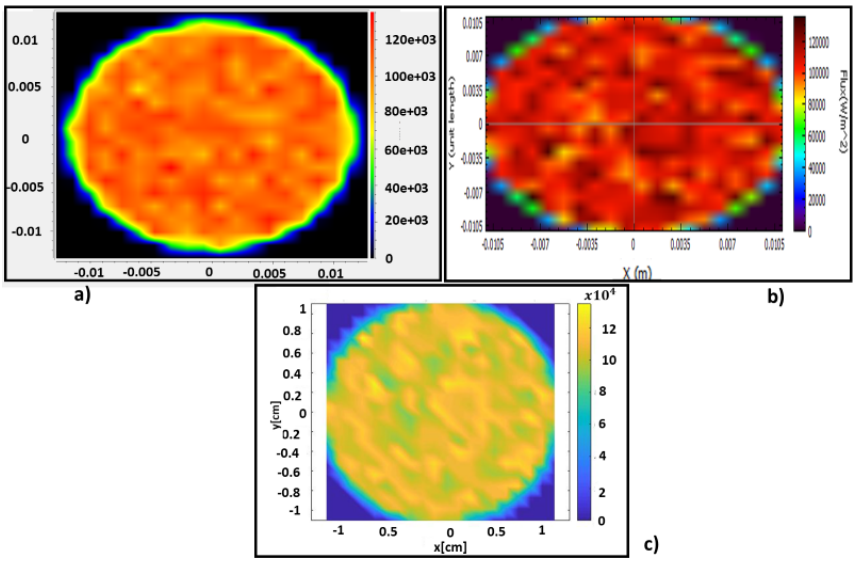


FIGURA 9. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

Del mismo modo, el comportamiento gaussiano se presenta en la distribución de energía en el receptor plano. La Figura 10 describe este comportamiento, afirmando lo que la literatura determina para el flujo de energía en el receptor.

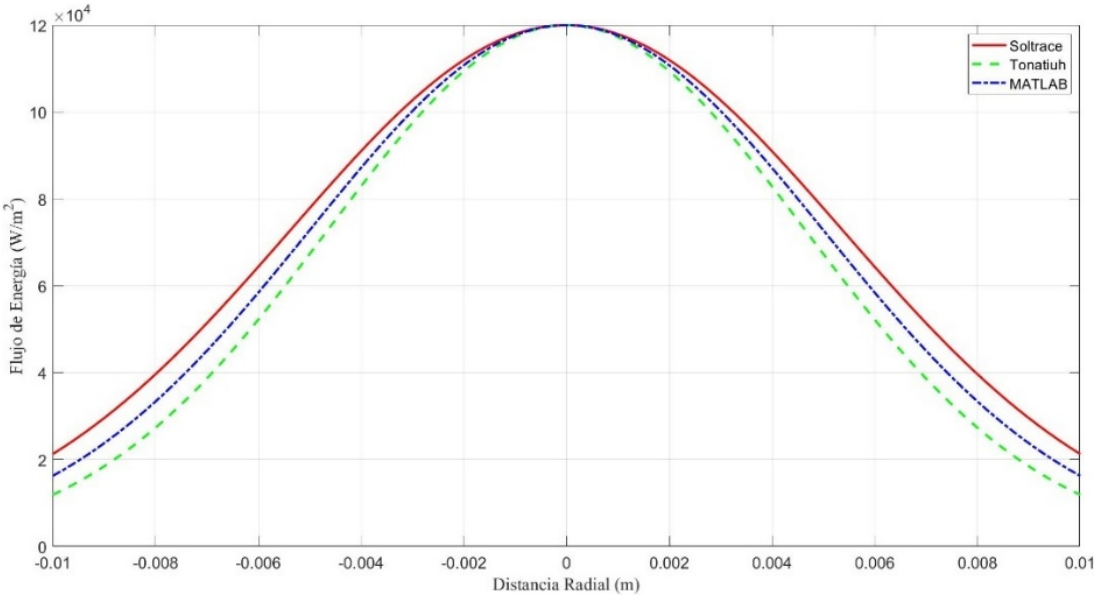


FIGURA 10. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2 m

Cuando el receptor se encuentra a una distancia menor que la longitud focal calculada

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

geométricamente, los rayos reflejados aún no alcanzan su máxima convergencia sobre la superficie receptora. Como consecuencia, la energía se distribuye sobre un área más amplia y el flujo energético disminuye considerablemente. Este efecto de desenfoque óptico ha sido reportado previamente en la literatura para sistemas de concentración solar de disco parabólico y representa una de las principales fuentes de reducción en la eficiencia óptica del sistema [6], [7].

Longitud focal de 2.4 m

En la Figura 11, las intensidades de flujo varían entre 0 y 150 kW/m^2, con concentraciones máximas (>100 kW/m^2) en rojo y mínimas (<50 kW/m^2) en azul, con coordenadas en metros (-0.015 a 0.015 m). Con Tonatiuh (Figura 11b), con coordenadas en centímetros (-1.0 a 1.0 cm), muestra intensidades de flujo entre 0 y 14 kW/m^2, destacando las áreas amarillas como las de mayor concentración. Empleando el código de Matlab (Figura 11c), con coordenadas en metros (-0.0105 a 0.0105 m), presenta intensidades de flujo entre 25 y 148 kW/m^2, con las áreas rojas indicando las mayores concentraciones de energía. Estos mapas visualizan la distribución del flujo energético en el receptor, información crucial para optimizar el diseño de concentradores solares parabólicos.

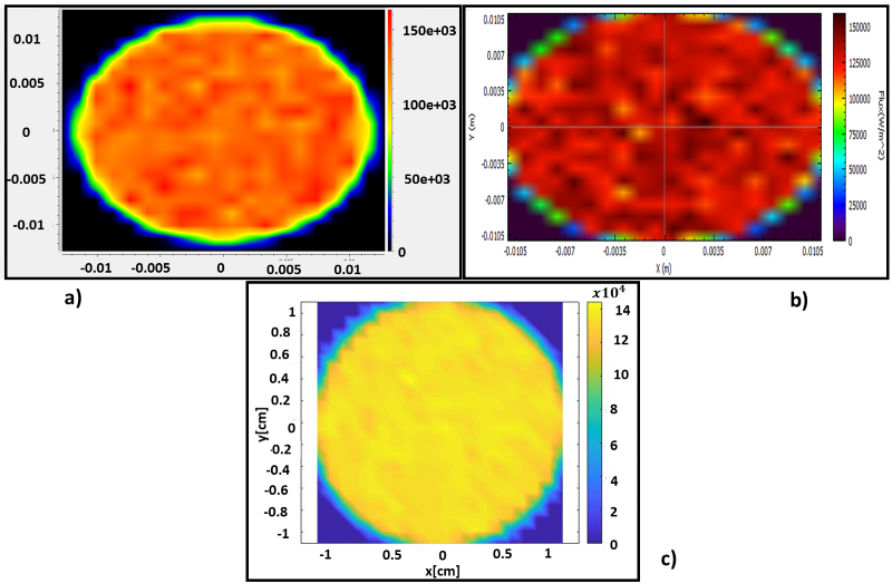


FIGURA 11. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2.4 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

El perfil radial de la energía concentrada en el receptor cuando éste se encuentra en una longitud focal de 2.4 metros, se muestra en la Figura 12. Con ello, se aprecia que cuando el receptor se encuentra a una distancia mayor que la longitud focal la energía concentrada incrementa. Esto se puede comparar con la

energía que tiene el receptor cuando la distancia a la que se encuentra el receptor en el eje focal es menor que la distancia focal, aquí se muestra que la energía es menor.

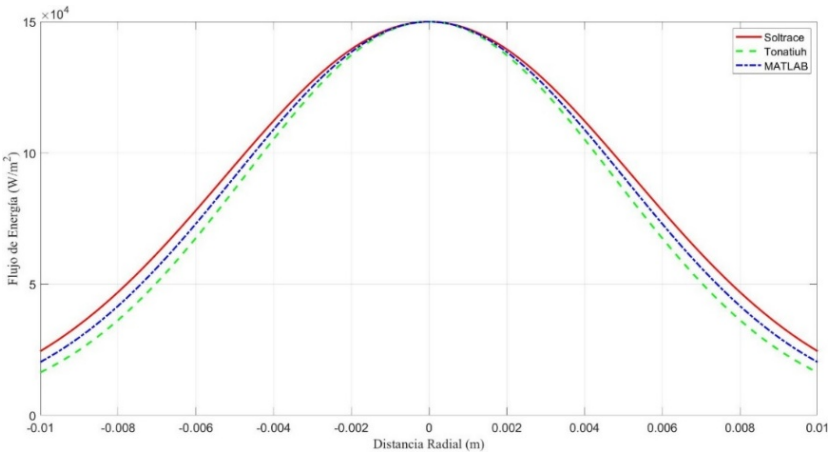


FIGURA 12. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2.4 m

Para una distancia de 2.4 m se observa que el receptor se encuentra más allá del punto focal geométrico, produciendo nuevamente una dispersión parcial del haz reflejado. Aunque los valores de flujo energético son superiores a los obtenidos para 2.0 m, el sistema no alcanza los niveles máximos observados en la configuración focal óptima. Este comportamiento confirma la elevada sensibilidad de los concentradores solares parabólicos a pequeñas variaciones en la posición del receptor.

Finalmente, la Figura 13 describe el comportamiento de la concentración de energía en el receptor simulada con SolTrace. En la gráfica se puede observar cómo la variación de la longitud focal tiene un efecto significativo en la energía concentrada por el CDP. Con base en estos resultados se puede determinar que la longitud focal de 2.2 m, calculada geométricamente es la óptima para localizar el receptor plano. Sin embargo, al analizar la distancia focal de 2 y 2.4 metros, esta última presenta valores mayores de energía concentrada. Esto se debe a que mayor número de rayos inciden sobre la superficie del receptor a una longitud focal de 2.4 m comparado con una distancia de 2 m. Del mismo modo, la Tabla 2 contiene los valores de energía concentrada por el CDP con el uso de SolTrace, en tres puntos (distancias radiales) diferentes del receptor considerando el plano xy, empleando los tres trazadores de rayos.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

Tabla 2. Energía concentrada por cada longitud focal en tres puntos del perfil radial del receptor.

Longitud focal	Distancia radial x =0 m	Distancia radial x =0.0025 m	Distancia radial x =0.01 m
2 m	120 kW/m^2	95 kW/m^2	50 kw/m^2
2.2 m	7 MW/m^2	6 MW/m^2	1 MW/m^2
2.4 m	150 kW/m^2	125 kW/m^2	75 kW/m^2

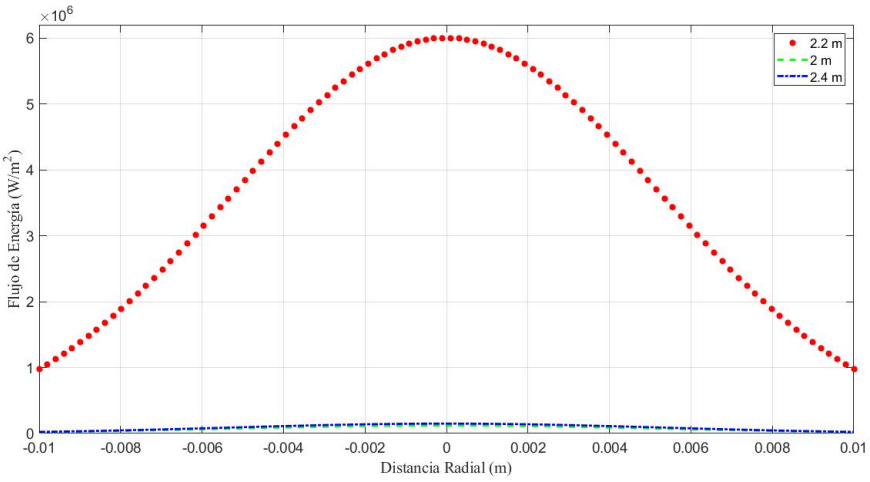


FIGURA 13. Perfil radial de energía en el receptor empleando SolTrace

La diferencia observada entre los valores máximos de flujo energético obtenidos para las distintas posiciones del receptor se atribuye principalmente al grado de convergencia de los rayos reflejados sobre la superficie receptora. Cuando el receptor se localiza exactamente en la distancia focal calculada geométricamente (2.2 m), la mayor parte de los rayos reflejados converge sobre una región reducida, produciendo una elevada densidad de flujo energético que alcanza valores del orden de MW/m^2. Por el contrario, cuando el receptor se desplaza por delante o por detrás de la posición focal (2.0 m y 2.4 m), el haz reflejado presenta un efecto de desenfoque, distribuyendo la energía sobre una superficie mayor y reduciendo considerablemente la densidad de energía concentrada. Este comportamiento es consistente con la teoría de concentración solar y con estudios previos reportados para concentradores de disco parabólico, donde pequeñas variaciones respecto a la posición focal generan diferencias significativas en la distribución del flujo energético sobre el receptor.

En términos generales, los resultados obtenidos mediante SolTrace, Tonatiuh y MATLAB muestran

tendencias similares respecto al efecto de la longitud focal sobre la distribución del flujo energético. Aunque existen diferencias en la magnitud absoluta reportada por cada herramienta de simulación, todas coinciden en identificar la distancia focal de 2.2 m como la configuración óptima para maximizar la concentración energética. Esta concordancia proporciona confianza en los resultados y confirma la validez de la metodología empleada.

Conclusiones y líneas abiertas

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la correcta selección de la longitud focal es esencial para optimizar el rendimiento de los concentradores solares parabólicos. Al ajustar la longitud focal, se puede maximizar la concentración de energía en el receptor, lo que mejora significativamente la eficiencia del sistema. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas con SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB muestran que, aunque existen diferencias en la magnitud absoluta de la energía concentrada reportada por cada herramienta, todas muestran tendencias consistentes respecto a la localización de la distancia focal óptima y no afectan el uso de estos programas para analizar el desempeño del sistema.

Asimismo, el análisis reveló que los valores de energía concentrada en el receptor variaron en función de las diferentes longitudes focales utilizadas en las simulaciones. A medida que la distancia del receptor se incrementa respecto a la longitud focal, la energía concentrada tiende a distribuirse de manera más uniforme sobre el receptor, lo que puede reducir los picos de alta intensidad y minimizar las pérdidas por sobrecalentamiento. Sin embargo, ubicar el receptor a una distancia mayor a la longitud focal disminuirá considerablemente la concentración máxima alcanzable, comprometiendo la eficiencia total del sistema. Por otro lado, si el receptor se sitúa a una distancia menor respecto a la longitud focal (2 m), la energía concentrada disminuye de forma considerable incluso comparando con los valores obtenidos con la distancia focal de 2.4 m. A partir de ello, se concluye que la longitud focal calculada geométricamente es la óptima para garantizar la mayor concentración de energía en el sistema.

Este análisis subraya la importancia de utilizar un enfoque metodológico adecuado para la optimización de concentradores solares parabólicos, lo que tiene implicaciones prácticas tanto en el diseño de sistemas solares más eficientes como en la implementación de tecnologías de concentración solar en aplicaciones industriales. Además, este trabajo contribuye significativamente al campo de la energía solar, ofreciendo datos valiosos para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el área de la energía renovable.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

David Rojas Valdez: Conceptualización, Metodología, Redacción - Preparación del borrador

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

original.

Miriam Sánchez Pozos: Conceptualización, Investigación, Redacción - Preparación del borrador original. **Iván G. Martínez Ciegus:** Supervisión. **María Dolores Durán García:** Supervisión. **Martha Fernanda Mohedano Castilolo:** Software, Validación.

Referencias

[1] B. Chavarría-Domínguez, S. E. De León-Aldaco, N. Velázquez-Limón, M. Ponce-Silva, J. A. Aguilar-Jiménez, and F. Chavarría-Domínguez, "A Review of the Modeling of Parabolic Trough Solar Collectors Coupled to Solar Receivers with Photovoltaic/Thermal Generation," Energies, vol. 17, no. 7, p. 1582, 2024, DOI: 10.3390/en17071582.

[2] E. González-Mora and M. Durán-García, "Energía solar concentrada para procesos industriales: un recurso estratégico hacia la sostenibilidad," CIENCIA ergo-sum, vol. 33, 2025, DOI: 10.30878/ces.v33n0a54.

[3] K. Faye, A. Thiam, M. Faye, K. J. Craig, E. H. I. Cissé, and V. Sambou, "Combining ray tracing and CFD to evaluate the outlet air temperature of an indirectly irradiated solar receiver equipped with a 3D-CPC for a solar tower power plant," SSRN Electronic Journal, 2022, DOI: 10.2139/ssrn.4237380.

[4] G. Klepp, "Solar Stirling for Renewable Energy Multigeneration Systems," Sustainability, vol. 17, no. 3, p. 1257, 2025, DOI: 10.3390/su17031257.

[5] D. Banitia, S. Ramachandran, S. S. Bhogilla, and P. K. Vijayan, "Optical analysis and design of a novel solar beam down concentrator for indoor cooking," Solar Compass, vol. 12, Art. no. 100083, 2024, DOI: 10.1016/j.solcom.2024.100083.

[6] L. F. Martins, J. E. P. Navalho, M. A. A. Mendes, and J. C. F. Pereira, "Optical and thermal performance analysis of ceramic foam solar receivers in parabolic dish solar collector assemblies: The role of collector geometrical and optical parameters and absorber and coating materials," Energy Conversion and Management, vol. 365, Art. no. 121694, 2026, DOI: 10.1016/j.enconman.2026.121694.

[7] M. H. Farhat, Y. Mazloum, S. Wakim, W. Bou Nader, M. ALEbrahim, and N. Ghareeb, "Energy optimization of parabolic dish solar concentrator coupled to organic Rankine cycle: Experimental and analytical investigation of cavity receiver design and covering effects," International Journal of Thermofluids, vol. 23, Art. no. 100730, 2024, DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100730.

[8] M. Rahbari, P. Esfanjani, A. Mahmoudi, and M. S. Valipour, "Performance enhancement of a parabolic dish collector with a novel receiver assisted with a secondary reflector," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 283, Art. no. 113464, 2025, DOI: 10.1016/j.solmat.2025.113464.

[9] R. Mitchell, Y. Wang, M. Izygon, J. Pye, and G. Zhu, "Modeling receiver flux of commercial power tower concentrating solar power plants using ray tracing: a round-robin comparison of SolTrace, Solstice, and TieSOL," Solar Energy, vol. 300, Art. no. 113785, 2025, DOI: 10.1016/j.solener.2025.113785.

[10] L. Jadhav, P. Gadiya, J. Girnar, H. Bhusal, and P. Gadhe, "Numerical analysis using SolTrace software to determine the size and position of a central receiver for ganged heliostat system," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1042, no. 1, Art. no. 012015, 2022, DOI: 10.1088/1755-1315/1042/1/012015.

[11] P. Richter and F. Hövelmann, "Computationally fast analytical ray-tracer for central receiver systems," in AIP Conference Proceedings, vol. 2445, Art. no. 030019, 2022, DOI: 10.1063/5.0085714.

[12] L. Li, Y. Zhang, H. Li, R. Liu, and P. Guo, "An optimized approach for solar concentrating parabolic dish based on particle swarm optimization-genetic algorithm," Heliyon, vol. 10, no. 4, Art. no. e26165, 2024, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26165.

[13] K. H. Kumar, D. S. Reddy, and M. Karmakar, "Optical modeling of a cylindrical-hemispherical receiver for parabolic dish concentrator," Environmental Science and Pollution Research, vol. 30, no. 22, pp. 63121–63134, May 2023, DOI: 10.1007/s11356-023-26432-4.

[14] E. H. El-Gamal, M. Emran, O. Elsamni, M. Rashad, and O. Mokhiamar, "Parabolic Dish Collector as a New Approach for Biochar Production: An Evaluation Study," Applied Sciences, vol. 12, no. 24, Art. no. 12677, 2022, DOI: 10.3390/app122412677.

[15] H. S. Al-Arab, "Analyzes and compares the optical characteristics for two types of solar dish concentrators," Journal of Optics, 2024, DOI: 10.1007/s12596-024-02278-y.

[16] D. Banitia, S. Ramachandran, S. S. Bhogilla, and P. K. Vijayan, "Mathematical modeling and optical-thermal analysis of a novel solar beam down parabolic dish concentrator," Solar Compass, vol. 15, Art. no. 100137, 2025, DOI: 10.1016/j.solcom.2025.100137.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

[17] N. Zhang, N. Huang, and C. Gong, "Improved Monte Carlo ray-tracing algorithm based on importance sampling," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2700, no. 1, Art. no. 012005, 2024, DOI: 10.1088/1742-6596/2700/1/012005.

[18] G. Canneto, I. Balog, P. Di Ascenzi, and G. Caputo, "Analysis of Experimental Data from a Concentrating Parabolic Solar Plant and Comparison with Simulation Model Results," Energies, vol. 18, no. 12, Art. no. 3161, 2025, DOI: 10.3390/en18123161.

[19] S. Y. Khan, M. Uzair, and U. Allauddin, "Coupled optical-thermal performance enhancement of solar parabolic dish system using a hemiellipsoidal tubular receiver," Renewable Energy, vol. 256, Part F, Art. no. 124434, 2026, DOI: 10.1016/j.renene.2025.124434.

[20] N. ur Rehman and M. Uzair, "Hybrid ray-tracing model for solar energy assessment and its open-source implementation as a service," Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 49, no. 2, pp. 289–300, 2025, DOI: 10.1139/tcsme-2024-0044.

[21] M. Reeze, M. A. Veerman, and C. C. van Heerwaarden, "Machine learning-based denoising of surface solar irradiance simulated with Monte Carlo ray tracing," Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation, vol. 2, Art. no. e2024JH000515, 2025, DOI: 10.1029/2024JH000515.

[22] R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez, Nonimaging Optics. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press, 2005.

[23] F. M. Boora, J. Ebrahimpourboura, and M. Sheikholeslami, "Machine learning technique for optimization of solar unit equipped with a novel design tube filled with nanofluid," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 166, Part A, Art. no. 113544, 2026, DOI: 10.1016/j.engappai.2025.113544.

[24] Y. Zheng, L. Li, S. Dai, D. Liu, H. Zheng, S. Yang, Y. Guo, M. Rafique, B. Wang, C.-H. Wang, and Y. Shuai, "Monte-Carlo ray tracing simulation of view factors for diffuse solar radiation determination in cylindrical photobioreactor arrays for microalgae cultivation," Bioresource Technology, vol. 436, Art. no. 132813, 2025, DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132813.

[25] J. Yan, Y.-X. Liu, and Y.-D. Peng, "Study on the optical performance of novel dish solar concentrator formed by rotating array of plane mirrors with the same size," Renewable Energy, vol. 195, pp. 416–430, 2022, DOI: 10.1016/j.renene.2022.06.005.