

Evaluación de la incidencia de la geometría del área de reflexión en el rendimiento óptico de un prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico

Evaluation of the incidence of the geometry of the reflection area in the optical performance of a handmade prototype of a parabolic trough concentrator

Brayan Eduardo **Tarazona-Romero**¹, Javier Gonzalo **Ascanio-Villabona**²
Camilo Leonardo **Sandoval-Rodriguez**³, Arly Dario **Rincon-Quintero**⁴

Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA | Universidad del País Vasco UPV-EHU, ESPAÑA

¹<https://orcid.org/0000-0001-6099-0921> | btarazona@correo.uts.edu.co - btarazona001@ikasle.ehu.eus

Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA

²<https://orcid.org/0000-0003-1749-5399> | jascanio@correo.uts.edu.co

³<https://orcid.org/0000-0001-8584-0137> | csandoval@correo.uts.edu.co

⁴<https://orcid.org/0000-0002-4479-5613> | arincon@correo.uts.edu.co

Recibido 13-01-2022, aceptado 21-02-2022

Resumen

Este artículo tiene como objeto evaluar la incidencia de la geometría del área de reflexión en el rendimiento óptico de un sistema a baja escala de concentradores cilindro-parabólico. El sistema fue desarrollado y probado para calentar agua o generar vapor de agua en las Unidades Tecnológicas de Santander, ubicadas en Bucaramanga, Colombia. Se tuvieron en cuenta factores ópticos del prototipo real para realizar un análisis de trazado de rayos de monte Carlo, aplicando la Herramienta SolTrace. El sistema de concentración real fue sometido a una comparación con dos sistemas geoméricamente diferentes, es decir, un concentrador con dimensiones inferiores al sistema real y uno con dimensiones mayores, con el fin de determinar los rendimientos ópticos y las relaciones de concentración, para determinar la relación existente entre estos dos parámetros y el rendimiento de la unidad. Los resultados obtenidos, mostraron que el área de reflexión afecta directamente el rendimiento óptico y la relación de concentración del dispositivo, evidenciando que, a mayor área de concentración, mayor rendimiento del equipo.

Palabras clave: trazado de rayos de Monte Carlo, rendimiento óptico, colectores cilindro-parabólicos, SolTrace, razón de concentración.

Abstract

This article aims to evaluate the incidence of the geometry of the reflection area on the optical performance of a small-scale system of parabolic trough concentrates. The system was developed and tested to heat water or generate steam in the Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia. Optical factors from the actual prototype were taken into account to perform a Monte Carlo ray tracing analysis, applying the SolTrace Tool. The real concentration system was subjected to a comparison with two geometrically different systems; a concentrator with dimensions smaller than the real system and one with larger dimensions. These were used to determine the optical performance and concentration ratios, to determine the relationship between these two parameters and the performance of the unit. The results obtained showed that the reflection area directly affects the optical performance and the concentration evidence of the device.

Index terms: Monte Carlo ray tracing, optical performance, parabolic-prough collectors, SolTrace, concentration ratio.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración solar (CSP) son una tecnología que aprovecha la radiación solar normal directa (DNI) a través de reflectores para proporcionar calor de alta intensidad a ciclos de energía convencionales [1]. Son sistemas aplicados de forma centralizada para la producción de energía eléctrica o energía térmica [2]. Tecnológicamente se pueden clasificar en cuatro tipos de sistemas [3]: colectores cilindro-parabólicos (PTC)[4], colectores lineales Fresnel (LFC) [5]-[6], disco parabólico (PD) [7] y torre de concentración (CT) [8], [9]. Las Tecnologías PTC y LFC se conocen como sistemas lineales o 2D y manejan temperaturas medias con trabajo en rangos de 100°C a 500°C [10]. Por su parte, la tecnología PD y CT son sistema de concentración puntual o 3D y alcanzan temperaturas mayores a los 1000°C [11].

Los colectores cilindro-parabólico (PTC), actualmente son la tecnología de concentración solar (CSP) [10] [12] con mayor madurez y aplicación a nivel mundial [13], [14]. El sistema está compuesto por un área de reflexión solar, generalmente constituidas por espejos altamente reflectantes que direccionan los rayos solares a un punto focal o superficie de concentración [15]. El sistema transfiere calor a un fluido caloportador, aprovechando la radiación solar. Generalmente, cuentan con un sistema auxiliar de bombeo y de seguimiento solar en un solo eje, para garantizar que el dispositivo en posición perpendicular al sol todo el día [16], [17].

El costo comercial de estos dispositivos es de aproximadamente 275 euros en sistemas centralizados [18], [19], esto los hace todavía altamente costosos para aplicaciones a baja escala [20], [21]. Consecuentemente, en los últimos años diferentes autores han centrado su aplicación a sistemas PTC con diseños con materiales alternativos a baja escala o artesanales, con el fin de desarrollar tecnologías alternativas a los sistemas comerciales, sacrificando eficiencia a cambio de reducción de costos y fácil operación para aplicarlos en zonas aisladas; con alto potencial de radiación solar, pero con carencia de recursos económicos [22], [23]. Este tipo de desarrollos tecnológicos van acompañados de análisis ópticos y térmicos [24], por medio de métodos de como [25] [26]: trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) [27], [28], simulaciones numéricas [29], [30] y modelados CFD [31], [32]. Destacando el método MTCR por su precisión y simplicidad en la aplicación de los software construidos para su desarrollo, sobre los otros dos métodos [33], [34].

Eventualmente, el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía y Automatización Industrial (GISEAC) de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) desarrolló un prototipo artesanal de colector cilindro-parabólico basado en materiales blandos y lo evaluó de forma experimental [5]. El dispositivo presentó eficiencias bajas, debido a que se fabricó bajo el concepto de tecnología apropiada, dando prioridad al uso de recursos locales y mano de obra local para su construcción, incurriendo en un sistema a bajo costo [10].

Finalmente, el presente trabajo busca analizar de forma óptica el rendimiento del dispositivo aplicando el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) por medio del software SolTrace, evaluando la geometría del sistema actual y unas variaciones del área de reflexión. Consecuentemente, la sección 2 presenta los métodos y materiales utilizados para el desarrollo de las simulaciones, incluyendo características del prototipo real y las variaciones geométricas a simular. La sección 3 presenta los resultados obtenidos del proceso de simulación y, por último, la sección 4 describe las principales conclusiones del desarrollo del trabajo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Prototipo concentrador cilindro-parabólico

Las dimensiones y las características ópticas del prototipo PTC se presentan en la Tabla 1. El prototipo actual se basa en tres componentes principales (véase Fig. 1):

- Área de reflexión
- Tubo receptor
- Sistema de seguimiento solar

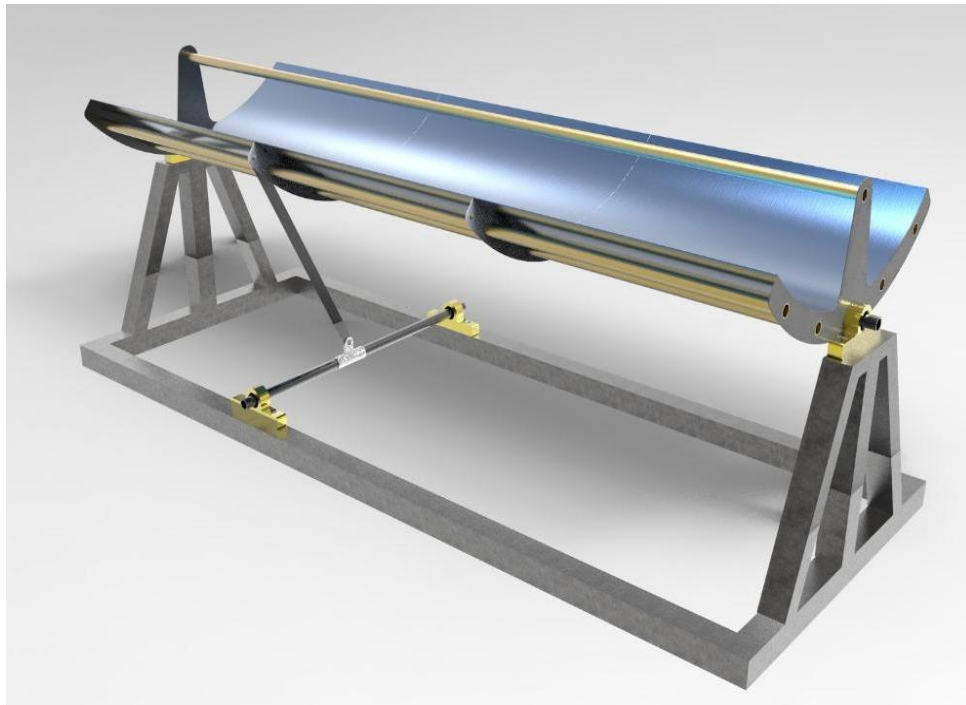


Fig. 1. Prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico.

La información presentada en la Tabla 1 es necesaria para el desarrollo de modelo óptico del dispositivo y la construcción del modelo 3D en el software de simulación, ya que permite alimentar la herramienta SolTrace valores reales del sistema, con el fin de efectuar un análisis óptico fiable, aplicando la metodología de trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) [35].

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ÓPTICAS DEL PROTOTIPO PTC

Variable	
Ψ Angulo de Borde	90°
.a (ancho de apertura)	550,08 (0,55 m)
.l (longitud del colector)	1700 mm (1,7 m)
.f (distancia focal)	164,48 mm
De (diámetro externo del tubo receptor)	15,87 mm
Dí (diámetro interno del tubo receptor)	13,85 mm
Aa (área de apertura del colector)	0,935 m ²
Ar (área del tubo receptor)	0,04985 m ²
Co (razón de concentración)	11,85 mm
Emisividad de la pintura negra	0,98
Absortividad solar pintura Negra	0,98

B. Modelo óptico

La evaluación del rendimiento óptico y térmico de los sistemas de concentración solar cilindro-parabólico, requiere ecuaciones matemáticas de alta precisión, basados en predicciones para analizar los coeficientes ópticos. La determinación de la eficiencia óptica para sistemas PTC depende de factores significativos como: errores en el área de reflexión, el Angulo de incidencia, perdidas por sombras y la razón de concentración.

En consecuencia, los modelos ópticos se aplican para determinar la intensidad en la distribución de rayos solares o radiación normal directa (DNI) en el área de reflexión y la superficie de concentración. Este análisis óptico, incluye las dimensiones del sistema actual PTC y se analizara aplicando un software de acceso abierto SolTrace, ampliamente aplicado a nivel mundial:

- Soltrace (<https://www.nrel.gov/csp/soltrace-download.html>): es una herramienta basada en el método de Trazado de Rayos de monte Carlo, desarrollada en un código C++. Requiere el uso de un plugin llamado Google Sketchup, para desarrollar un diseño 3D del prototipo a analizar, para alimentar directamente SolTrace.

4

A su vez, la Tabla 2 presenta las geometrías a simular con el fin de identificar el rendimiento óptico del sistema actual, así como dos propuestas de variación geométrica donde una presenta área de concentración mayor y otra menor. Las propuestas de variación del área se hacen con base en la disponibilidad de material en la zona local de implementación, determinando las características propias de cada material reflector, así como sus dimensiones y la opción de modificación a futuro del sistema real. El análisis actual permitirá identificar la incidencia del área de reflexión en el rendimiento del prototipo PTC.

TABLA 2
GEOMETRÍA DE LAS SIMULACIONES A REALIZAR

Geometría	Ancho Lamina Área de Reflexión (mm)	Angulo	Ancho Apertura (m ²)	Distancia Focal (m)
Real	609	90	0,454287	0,132975
1	400	90	0,289382	0,0847
2	800	90	0,596765	0,17468

Adicionalmente, se requieren expresiones matemáticas para determinar el rendimiento óptico del prototipo artesanal PTC a partir de las intensidades de flujo entregadas por el proceso de simulación en SolTrace. Para este proceso se puede aplicar la ecuación 1 [35], [36]:

$$\eta_{spp} = \eta_{sf} * \eta_{rec} * \eta_{pb} \quad (1)$$

η_{spp} = Rendimiento del sistema de concentración solar o PTC

η_{sf} = Rendimiento área de reflexión

η_{rec} = Rendimiento del receptor

η_{pb} = Rendimiento del bloque de potencia

Por otro lado, la variación del rendimiento del sistema PTC se determina a partir del rendimiento óptico del área de reflexión (véase ecuación 2). El rendimiento del receptor y el bloque de energía permanecen constantes para el análisis [35], [36].

$$\eta_{sf} = \frac{Q * A_{rec}}{DNI * A_{sf}} \quad (2)$$

Q = Flujo medio generado por el área de reflexión

A_{rec} = Área tubo receptor

A_{sf} = Área de reflexión

DNI = Radiación normal directa

Finalmente, para determinar la razón de concentración (CR), se aplica la ecuación 3 [35], [36]:

$$CR = \frac{\text{Número de rayos concentrados en el receptor}}{\text{Numero de rayos totales concentrados en el area de ref.}} \quad (3)$$

C. Características meteorológicas simuladas

- El uso de SolTrace permitirá evaluar condiciones meteorológicas, que inciden directamente en variables determinantes para el rendimiento del dispositivo como: el flujo de calor y la distribución de rayos solares o DNI.

El sistema PTC real se encuentra en las Unidades Tocológicas de Santander (UTS) con las siguientes características:

Latitud: 7° 6' 16.326" N, 7.1045351

Longitud: 73° 7' 25.134" W, -73.1236482

Estas coordenadas se identifican por medio del sitio Web Sun Earth Tools como se presenta en la Fig. 2 y permite tener un estimado del DNI.

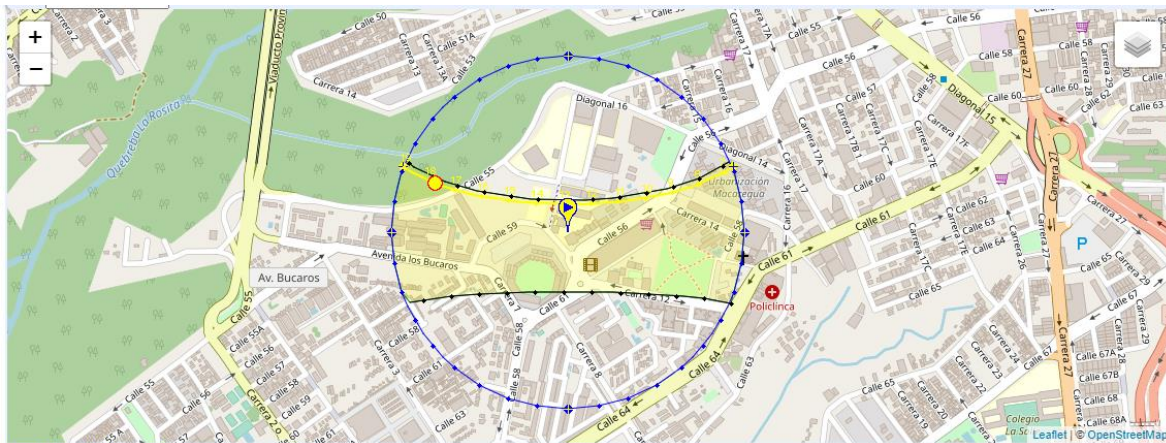


Fig. 2. Ubicación geográfica UTS para simulación en SolTrace.

Finalmente, la simulación en SolTrace se desarrollará para un DNI fijo de 600 W/m² basado en la información encontrada en Sun Earth Tools y el análisis efectuado por Saavedra-Quintero y Sánchez-Martínez en el 2021 [37]. Así mismo, se simulará con una intensidad de 5 000 000 de rayos; el valor de intensidad de rayos, fue determinado con base en las recomendaciones que hace el autor del software, donde indica que, a mayor cantidad de rayos en el análisis, mayor tiempo tomará la simulación, pero mejores resultados en términos de exactitud y precisión tendrá.

Adicionalmente, en el sitio web Sun Earth Tools, se determinó la posición solar para los intervalos diarios del día durante cada hora, con el fin de determinar la posición del sistema PTC a simular respecto al Sol. Con este parámetro, se garantiza que el proceso de simulación se realice con características reales de operación del sistema. La Fig. 3 presenta la Carta Solar de la Ubicación en las Unidades Tecnológicas de Santander, con la que se pudo determinar el ángulo del PTC respecto a la ubicación solar (véase Tabla 3).

6

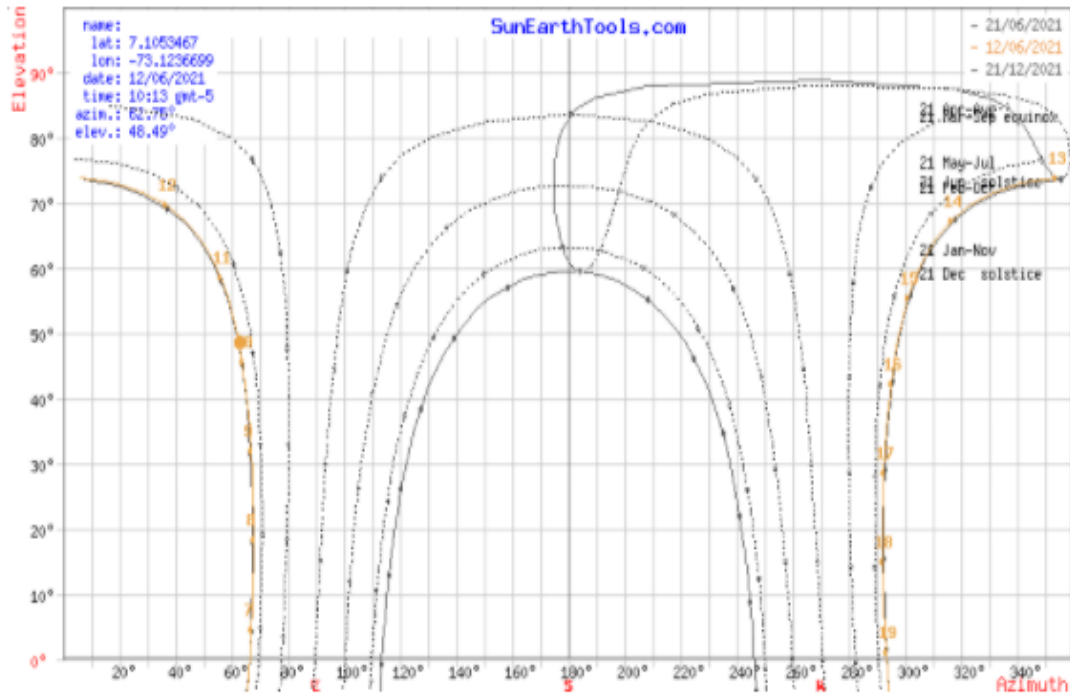


Fig. 3. Representación cartesiana posición solar.

TABLA 3
POSICIÓN SOLAR UTS

Ubicación	Ángulo	
	elevación	azimut
hora	7.105	-73.123
6:36:31	-0.833°	66.52°
7:00:00	4.52°	67.17°
8:00:00	18.28°	67.88°
9:00:00	32.04°	67.05°
10:00:00	45.61°	63.91°
11:00:00	58.56°	56.16°
12:00:00	69.56°	36.69°
13:00:00	73.81°	353.80°
14:00:00	67.15°	316.59°
15:00:00	55.41°	301.23°
16:00:00	42.24°	295.03°
17:00:00	28.60°	292.60°
18:00:00	14.83°	292.19°
19:00:00	1.09°	293.25°

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de simulación se realizó para las tres geometrías diferentes a través de la herramienta SolTrace como se evidencia en la Fig. 4, teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 1 y 2. La Fig. 4A presenta el trazado de rayos en el software SolTrace del PTC real, así como la Fig. 4B el PTC con un área de reflexión mayor y la Fig. 4C el PTC con un área de reflexión menor.

7

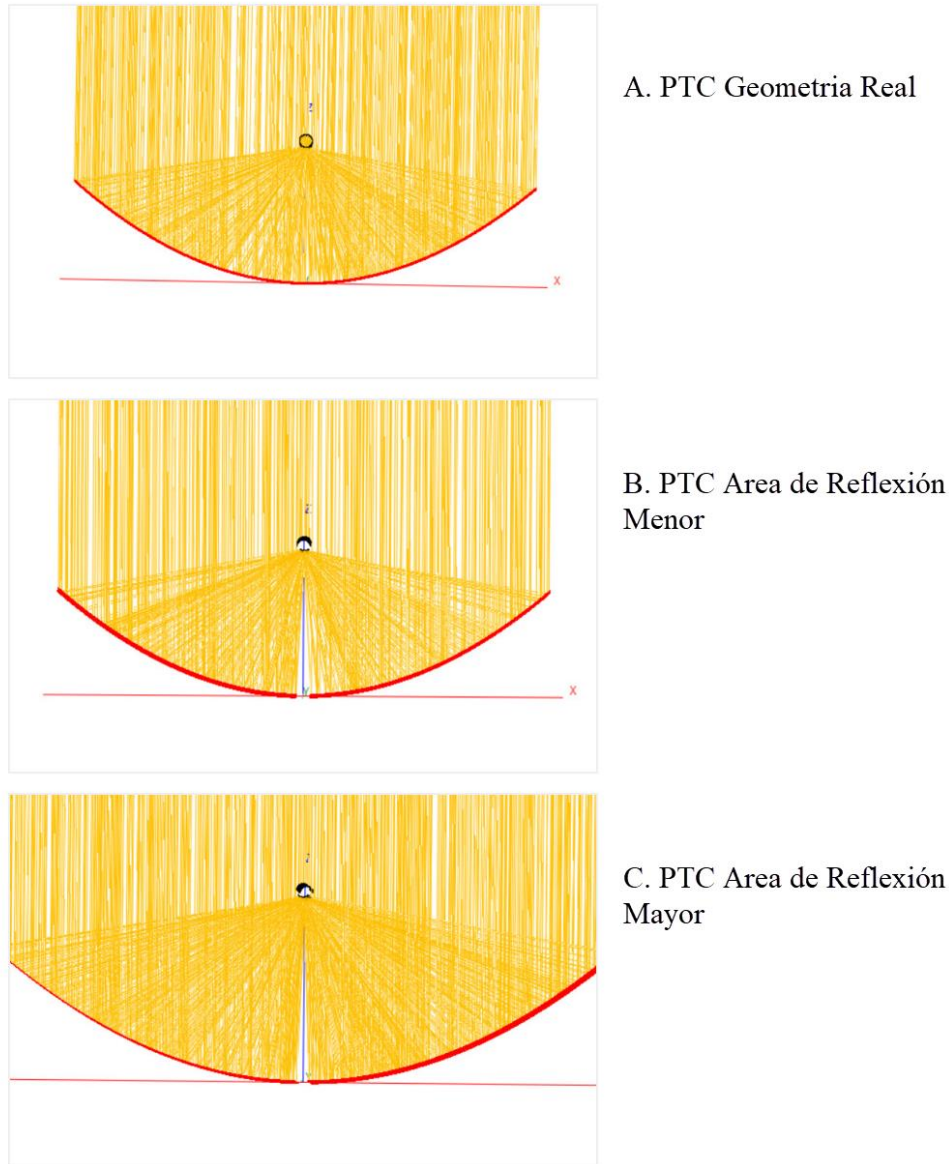


Fig. 4. Gráficas de trazado de rayos PTC en SolTrace.

La Fig. 5 presenta de forma gráfica las intensidades de flujo presentadas en la Tabla 4. Este tipo de diagramas permite evidenciar la intensidad de los rayos que inciden en las superficies evaluadas. La Fig. 5A representa la

intensidad de flujo en el tubo receptor y la Fig. 5B la intensidad de flujo en el tubo área de reflexión primaria para el PTC real. De igual forma, la Fig. 5C y 5D lo hacen para el PTC con mayor área de Reflexión y la Fig. 5E y 5F lo hacen para el PTC con menor área de reflexión.

8

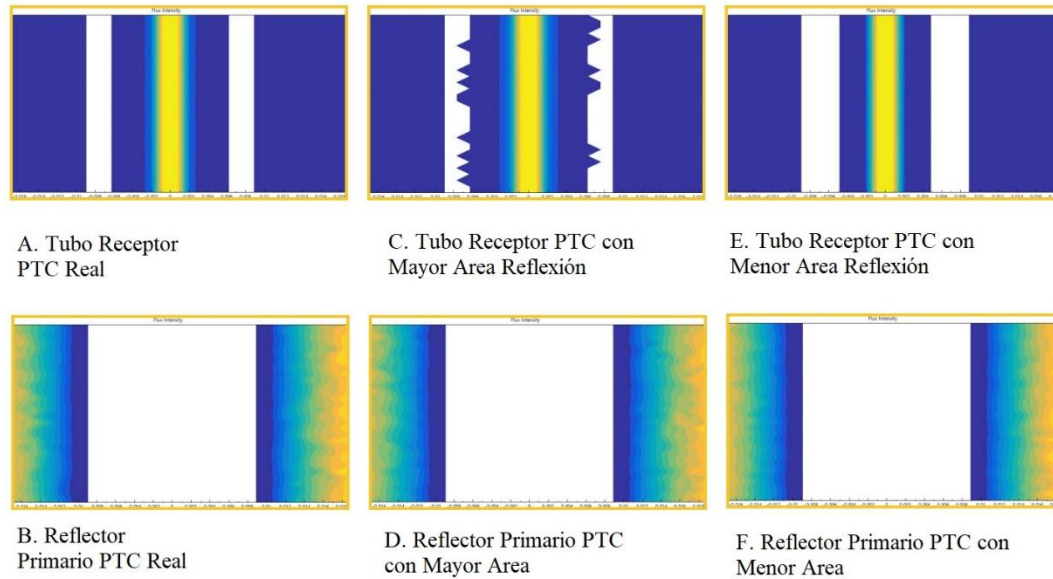


Fig. 5. Intensidad de flujo de trazado de rayos en SolTrace.

Por su parte, la Tabla 4 presenta la información de eficiencia óptica y razón de concentración, así como la intensidad de flujo del área de reflexión y el tubo absorbedor. Esta última información, es producto de la aplicación del método de trazado de rayos de Monte Carlo a través de la herramienta SolTrace para cada una de las geometrías planteadas.

Los valores de eficiencia óptica son producto de aplicar las ecuaciones 1 y 2, así como las características geométricas de los PTC presentados en la Tabla 2. Por su parte, la razón de concentración se determinó a través de la aplicación de la ecuación 3 y los datos de intensidad de flujo del área de reflexión y el tubo absorbedor.

TABLA 4
RESULTADOS DE EFICIENCIA ÓPTICA Y RAZÓN DE CONCENTRACIÓN

Geometría	Intensidad Flujo		Eficiencia Óptica %	Razón concentración %
	Tubo Absorbedor	Superficie Reflectora		
Real	62531,9	689,987	12,12	94,54
Menor	52183,8	644,671	11,78	80,94
Mayor	69311,8	715,322	13,07	96,89

La Fig. 6 presenta gráficamente el rendimiento óptico de los PTC evaluados y se nota una tendencia a aumentar cuando el área de reflexión es mayor y el rendimiento disminuye cuando el área de reflexión es menor. Es importante destacar, que el aumento de la eficiencia es apenas del 1%, sin embargo, es significativo para contribuir en la mejora del sistema PTC real.

9

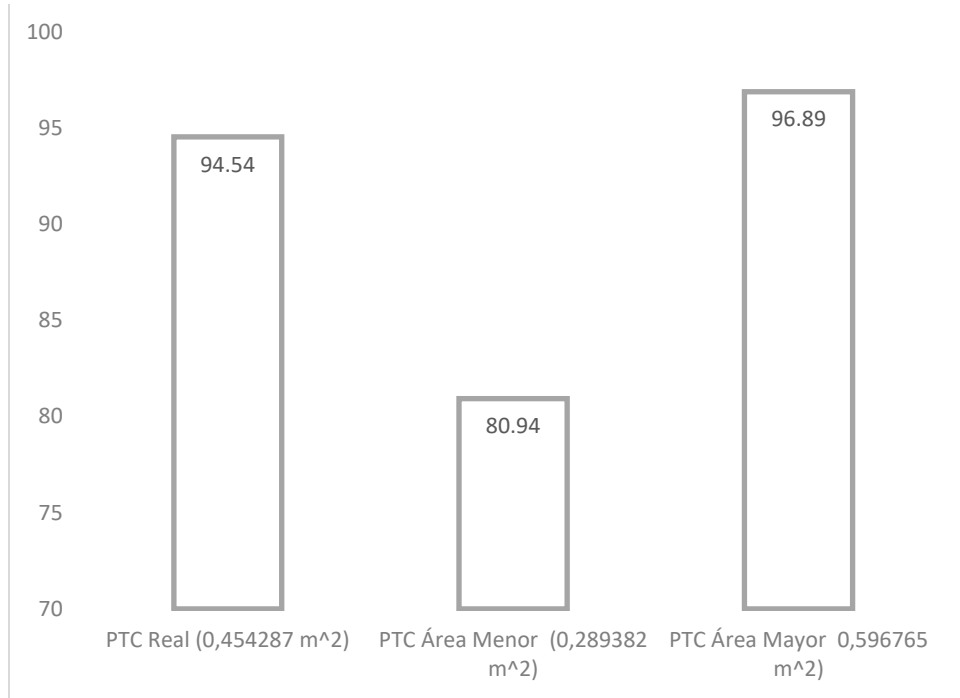


Fig. 6. Gráficas de eficiencia con base en las simulaciones de los sistemas de concentración cilindro-parabólico.

Finalmente, la Fig. 7 presenta la relación de concentración de los PTC evaluados y se evidencia un leve aumento cuando el área de reflexión es mayor y una tendencia por debajo de la razón de concentración con el PTC real, cuando el sistema tiene un área de reflexión primaria menor.

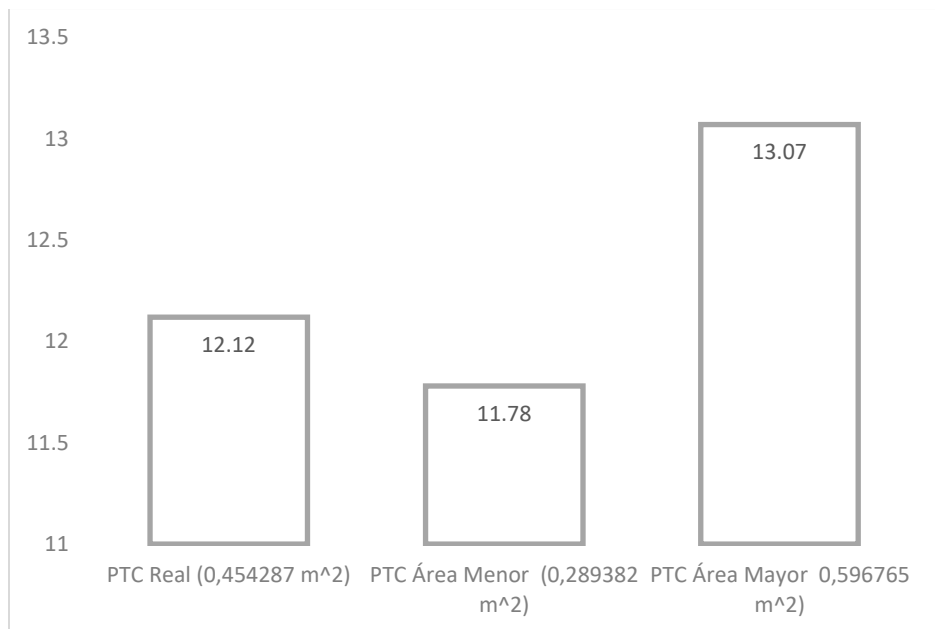


Fig. 7. Gráficas de relación de la concentración con base en las simulaciones de los sistemas de concentración cilindro-parabólico.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación de sistemas de concentración solar en todo el mundo, a nivel centralizado y descentralizado en áreas residenciales e industriales, ha tenido crecimiento en los últimos años y, actualmente, se encuentra aún en desarrollo e investigaciones día a día. Dentro de la clasificación de sistemas de concentración solar, se destacan los colectores cilindro-parabólicos por presentar facilidad en el mantenimiento, modularidad, costo de inversión, manufactura, entre otros. Esto motivo al grupo de investigación en energía, sistemas de automatización y control GISEAC, para fabricar un prototipo artesanal de este tipo de concentrador en las instalaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, como una alternativa para la producción de agua o vapor de agua. Para estudiar el comportamiento óptico del prototipo artesanal actual, se realiza un estudio óptico aplicando el software SolTrace, comparando el dispositivo real con una serie de variaciones geométricas con el fin de determinar la implicación del área de reflexión en el rendimiento del dispositivo. En conclusión, los resultados más importantes logrados en el presente estudio son:

- El rendimiento óptico del PTC aumenta proporcionalmente respecto al aumento en el área de reflexión. Para el PTC real, el área de reflexión fue de 0,454287 m² y el rendimiento óptico del 12.12%. Por su parte, el dispositivo con una mayor área de reflexión (0,596765 m²) presentó un rendimiento óptico del 13,07%, mientras que para el sistema con un área de reflexión inferior al sistema PTC real (0,289382 m²) evidencia un rendimiento óptico del 11.78%.
- La razón de concentración del PTC con un área de reflexión mayor fue del 96,68%, evidenciando un aumento en menor proporción respecto al sistema real que fue del 94,54%. Por su parte, el PTC con menor área de reflexión, presentó una razón de concentración de tan solo el 80,94 %, por debajo de los valores del PTC real y del PTC con mayor área.
- Adicionalmente, este estudio ha permitido evaluar la relación directa entre el rendimiento óptico del sistema de concentración cilindro-parabólico y la razón de concentración, determinando en el estudio de caso que: a mayor área de reflexión, mayor será el rendimiento del sistema.
- Se requiere realizar un análisis experimental modificando el área de reflexión del dispositivo actual para contrastar los datos obtenidos por la simulación.

Finalmente, se identifica un escenario geométrico que aumentaría el rendimiento de la unidad actual, contribuyendo en el desarrollo de tecnologías emergentes construidas con recursos locales a bajo costo de inversión inicial. Es importante destacar, que este tipo de sistemas artesanales no buscan competir con las tecnologías comerciales, más bien aprovechan la experiencia comercial para ofrecer una alternativa energética para zonas aisladas con carencia de recursos económicos, problemas sociales y carencia de energía térmica, que gozan, que gozan de altos niveles de radiación solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS).

REFERENCIAS

- [1] J. J. C. S. Santos, J. C. E. Palacio, A. M. M. Reyes, M. Carvalho, A. J. R. Freire, M. A. Barone, "Chapter 12 - Concentrating Solar Power," en *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, I. Yahyaoui, Ed. Elsevier, 2018, pp. 373-402. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00012-5>
- [2] R. Pitz-Paal, "Chapter 19 - Solar Energy – Concentrating Solar Power," en *Future Energy*, 2nd ed., T. M. Letcher, Ed. Boston: Elsevier, 2014, pp. 405-431. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00019-3>
- [3] H. Price *et al.*, "Chapter 20 - Concentrating solar power best practices," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds. Woodhead Publishing, 2021, pp. 725-757. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00020-7>

- [4] E. Z. Moya, "Chapter 7 - Parabolic-trough concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds. Woodhead Publishing, 2021, pp. 219-266. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00009-8>
- [5] B. E. Tarazona-Romero, A. Campos-Celador, Y. A. Muñoz-Maldonado, J. G. Ascanio-Villabona, M. A. Duran-Sarmiento, A. D. Rincón-Quintero, "Development of a Fresnel Artisanal System for the Production of Hot Water or Steam," en *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Cham, 2021, pp. 196-209. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_15
- [6] B. E. T. Tarazona-Romero, A. C. Celador, C. L. S. Rodríguez, J. G. A. Villabona, A. D. R. Quintero, "Design and construction of a solar tracking system for Linear Fresnel Concentrator," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, n.º 4, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.21533/pen.v9i4.1988>
- [7] W. Schiel, T. Keck, "Chapter 9 - Parabolic dish concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 311-355. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00007-4>
- [8] L. L. Vant-Hull, "Chapter 8 - Central tower concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 267-310. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00019-0>
- [9] W.-D. Steinmann, C. Prieto, "24 - Thermal storage for concentrating solar power plants," en *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 2nd ed., L. F. Cabeza, Ed., Woodhead Publishing, 2021, pp. 673-697. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00024-3>
- [10] B. E. Tarazona-Romero, Á. Campos-Celador, Y. A. Muñoz-Maldonado, C. L. Sandoval-Rodríguez, J. G. Ascanio-Villabona, "Prototype of lineal solar collector Fresnel: Artesanal system for the production of hot water and/or water vapor," *Visión electrónica*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.14483/22484728.16013>
- [11] A. Khosravi, M. Malekan, J. J. G. Pabon, M. E. H. Assad, "Chapter 5 - Solar power tower system," en *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*, M. E. H. Assad y M. A. Rosen, Eds. Academic Press, 2021, pp. 61-83. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00006-7>
- [12] A. Häberle, D. Krüger, "Chapter 18 - Concentrating solar technologies for industrial process heat," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 659-675. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00011-6>
- [13] K. Lovegrove, J. Pye, "Chapter 2 - Fundamental principles of concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 19-71. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00013-X>
- [14] K. Lovegrove, W. Stein, "Chapter 1 - Introduction to concentrating solar power technology," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2nd ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 3-17. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00012-8>
- [15] M. Malekan, A. Khosravi, M. El Haj Assad, "Chapter 6 - Parabolic trough solar collectors," en *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*, M. E. H. Assad y M. A. Rosen, Eds. Academic Press, 2021, pp. 85-100. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00007-9>
- [16] B. E. Tarazona-Romero, A. Campos-Celador, Y. A. Maldonado-Muñoz, "Can solar desalination be small and beautiful? A critical review of existing technology under the appropriate technology paradigm," *Energy Research & Social Science*, vol. 88, p. 102510, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102510>
- [17] H. Parlamiş, E. Özden, M. S. Büker, "Experimental performance analysis of a parabolic trough solar air collector with helical-screw tape insert: A comparative study," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, pp. 101-562, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101562>
- [18] K. Mohammadi, S. Khanmohammadi, J. Immonen, K. Powell, "Techno-economic analysis and environmental benefits of solar industrial process heating based on parabolic trough collectors," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101412, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101412>
- [19] J. Fredriksson, M. Eickhoff, L. Giese, y M. Herzog, «A comparison and evaluation of innovative parabolic trough collector concepts for large-scale application», *Solar Energy*, vol. 215, pp. 266-310, feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.017>
- [20] T. K. Aseri, C. Sharma, T. C. Kandpal, "Cost reduction potential in parabolic trough collector based CSP plants: A case study for India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110658, mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110658>
- [21] B. H. Upadhyay *et al.*, "Design, development and techno economic analysis of novel parabolic trough collector for low-temperature water heating applications," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 26, p. 100978, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100978>
- [22] P. P. Dutta *et al.*, "Modeling and performance evaluation of a small solar parabolic trough collector (PTC) for possible purification of drained water," *Materials Today: Proceedings*, may 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.489>
- [23] S. M. Sadegh Hosseini, M. S. Dehaj, "An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al₂O₃/water and GO/water nanofluids," *Energy*, vol. 234, p. 121317, nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121317>

- [24] B. E. Tarazona-Romero, Y. A. M. Maldonado, A. C. Celador, O. L. Pérez, "Optical Performance Assessment of a Handmade Prototype of Linear Fresnel Concentrator," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, n.º 4, Art. n.º 4, oct. 2021, doi: <https://doi.org/0.21533/pen.v9i4.1987>
- [25] A. Malan, K. Ravi Kumar, "A comprehensive review on optical analysis of parabolic trough solar collector," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101305, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101305>
- [26] R. Siva Subramanian, G. Kumaresan, R. Palanivel, P. Nishanth kalathil, B. Nirmal, "Comparative performance analysis of parabolic trough solar collector by varying absorber surface," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 1217-1221, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.248>
- [27] A. Gowda, S. Dassappa, R. Hanumanthrapa, "Theoretical prediction of solar heat flux intensity on parabolic trough collector systems," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2231-2236, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.484>
- [28] A. K. Ramasamy, M. Ganesh, K. Rajamani, A. K. Loganathan, R. Rangaswamy, "Investigation of concentrated solar collector with discretized flat mirrors in parabolic arrangement," *Energy for Sustainable Development*, vol. 64, pp. 25-34, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.005>
- [29] S. Wu, R. Tang, C. Wang, "Numerical calculation of the intercept factor for parabolic trough solar collector with secondary mirror," *Energy*, vol. 233, p. 121175, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121175>
- [30] F. I. Nascimento, E. W. Zavaleta-Aguilar, J. R. Simões-Moreira, "Algorithm for sizing parabolic-trough solar collectors," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 24, p. 100932, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100932>
- [31] S. E. Ghasemi, A. A. Ranjbar, "Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 222, pp. 159-166, oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.091>
- [32] S. Marrakchi, Z. Leemrani, H. Asselman, A. Aoukili, A. Asselman, "Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using CFD," *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 773-779, ene. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.110>
- [33] N. Kincaid, G. Mungas, N. Kramer, M. Wagner, G. Zhu, "An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver," *Applied Energy*, vol. 231, pp. 1109-1121, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.153>
- [34] W. Peng, O. K. Sadaghiani, "Geometrical variation in receiver tube of SEGS LS-2 parabolic trough collector (PTC) based on heat flux distribution to improve the thermal performance," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, p. 106858, may 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106858>
- [35] J. González Martínez, Y. C. Villabona Niño, "Análisis óptico y térmico de un prototipo de colector de concentración solar lineal cilíndrico parabólico, aplicando los softwares Soltrace-Tonatiuh con el fin de identificar y definir mejoras en el diseño geométrico del modelo," ago. 2021, Accedido: 1 de febrero de 2022. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7228>
- [36] A. R. Arenas García, J. C. Jaimes Orostegui, "Evaluación óptica y térmica de un prototipo de colector de concentración solar lineal cilíndrico parabólico (CSP), aplicando los softwares SOLTRACE y TRNSYS," nov. 2021, Accedido: 1 de febrero de 2022. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7821>
- [37] L. F. Saavedra Quintero, D. F. Sánchez Martínez, "Automatización de un sistema de seguimiento solar en un eje para un prototipo de colector lineal tipo Fresnel de las Unidades Tecnológicas de Santander," abr. 2021, Accedido: 27 de septiembre de 2021. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5828>