



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:  
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16  
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,  
COLOMBIA



Encuentro Internacional de  
Educación en Ingeniería ACOFI

## Los heliostatos como alternativa energética en zonas tropicales colombianas

**Álvaro Delgado Mejía, Laura Gaviria Sierra, Sebastián Zapata Molina, Juan Diego Patiño Olaya, Víctor Cifuentes Durango, Mateo Cardona Chaverra**

**Institución Universitaria Pascual Bravo  
Medellín, Colombia**

### Resumen

En Colombia desde el 2001, mediante la Ley 697 de 2001, oficialmente se fomenta el uso racional y eficiente de la energía y se promueve la utilización de energías alternativas; y desde el 2014 con la ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, propiciando entornos ideales para el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en este tipo de energías renovables, como la solar. No obstante, en la matriz energética nacional la participación de las fuentes de energía renovables aún es mínima. Adicionalmente, aunque la mayor parte de zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional (ZNI) se encuentran concentradas en el suroccidente colombiano, hay otras ubicadas en sitios más tropicales donde la energía solar podría ser una buena opción. En este sentido, en este trabajo se presentan los resultados experimentales obtenidos con un prototipo de concentración de energía solar tipo heliostato de baja potencia, diseñado y construido dentro del marco de un proyecto de investigación de semillero en la Institución Universitaria Pascual Bravo, sobre el cual se midieron parámetros energéticos, como radiación entrante y saliente, así como perfiles de temperatura, tanto en el colector solar, como en el receptor. De esta manera se pudo establecer la eficiencia térmica del heliostato y las posibles aplicaciones en las que se podría utilizar, de acuerdo a los rangos de temperatura alcanzados. Los resultados preliminares indican que para condiciones de Medellín, que no es el sitio en Colombia con la mayor radiación solar entrante, el prototipo de heliostato resulta útil en aplicaciones de secado de productos que no sobrepasen los 80 °C, como es el secado de hierbas aromáticas o productos alimenticios.

**Palabras clave:** energía solar; heliostato; radiación térmica

## Abstract

*In Colombia since 2001, through Law 697 of 2001, the rational and efficient use of energy is officially encouraged and the use of alternative energies is promoted; and since 2014 with Law 1715, which regulates the integration of non-conventional renewable energies into the National Energy System, providing ideal environments for the development of small and large projects based on this type of renewable energy, such as the sun. However, in the national energy matrix the participation of renewable energy sources is still minimal. In addition, although most of the areas not interconnected to the national electricity system are concentrated in the Colombian southwest, there are other locations in more tropical places where solar energy could be a good option. In this sense, this paper presents the experimental results obtained with a low-power heliostat-type solar energy concentration prototype, designed and built within the framework of a research project at the Pascual Bravo University, on which energy parameters were measured, such as incoming and outgoing radiation, as well as temperature profiles, both in the solar collector and in the receiver. In this way it was possible to establish the thermal efficiency of the heliostat and the possible applications in which it could be used, according to the temperature ranges reached. Preliminary results indicate that for Medellín conditions, which is not the site in Colombia with the highest incoming solar radiation, the heliostat prototype is useful in product drying applications that do not exceed 80 °C, such as the drying of aromatic herbs. or food products.*

**Keywords:** solar energy; heliostat; thermal radiation

## 1. Introducción

A partir del acuerdo para el Cambio Climático de París en 2015, muchos gobiernos están tomando iniciativas para fomentar el uso de fuentes de energías alternativas y renovables, dependiendo del contexto energético que tenga cada país. Una de las alternativas energéticas que se ha venido impulsando es la del aprovechamiento de la energía solar, tanto fotovoltaica como térmica para procesos de calentamiento e incluso para aplicaciones de generación eléctrica a pequeña, mediana y gran escala.

Las matrices energéticas de la mayor parte de países, y Colombia no es la excepción, dependen fuertemente de las fuentes de energías fósiles, como el carbón, el petróleo y sus derivados (gasolina, diésel, gas natural, propano, etc.), con lo cual se está sometido a la variación de precios, así como los vaivenes en la oferta y demanda, la cual a su vez está determinada por asuntos políticos, sociales, económicos, etc. Otro aspecto negativo de este esquema energético es el problema asociado con el impacto ambiental y la generación de compuestos gaseosos, algunos de ellos tóxicos que representan un peligro para la salud humana y también tienen un carácter perjudicial para el medio ambiente.

Con el fin de disminuir esta dependencia energética, una buena alternativa es la de fomentar el uso de fuentes de energías limpias y renovables, siendo la energía solar una de las que más desarrollo ha tenido en las últimas décadas. Tradicionalmente los procesos de calentamiento se han



venido efectuando mediante sistemas basados en procesos de combustión, utilizando preferiblemente combustibles fósiles. Sin embargo, se ha podido establecer que la fuente de energía primaria se podría sustituir por un sistema solar térmico, en cuyo caso el único costo en que se incurriría es el de la infraestructura del panel solar como tal, pero a la larga el costo por la energía de partida sería gratuito. Aunque en la literatura científica se da cuenta de aplicaciones en las que se funden metales blandos o incluso en las que se genera vapor para centrales térmicas basadas en ciclo de Rankine, en esta propuesta se aborda un prototipo de un sistema de concentración solar tipo helióstato de baja potencia, con el fin de explorar su viabilidad y potencial de uso en aplicaciones que requieran temperaturas en un rango de alrededor de 80°C.

A partir de lo anterior, aunque en Colombia la participación de las energías alternativas en la matriz energética colombiana sigue siendo mínima (Figura 1), se han desarrollado proyectos encaminados a aprovechar no solo este recurso energético sino también otros como la energía eólica, que tiene como referente el proyecto eólico *Jepirachi* en la Guajira. Según datos de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la Asociación Colombiana de Generadores de Energía (ACOLGEN), Colombia tiene la sexta matriz energética más limpia del mundo, donde el 68% de la capacidad instalada está basada en fuentes renovables de energía. Las empresas Asociadas a ACOLGEN, representan el 70% de la capacidad instalada del país, de la cual el 85% son plantas de fuentes renovables. En términos generales la demanda energética en el país se suple con energía hidráulica (68.3%) y con energía térmica (30.8%), mientras que el 0.9% restante corresponde a fuentes de energía alternativas.

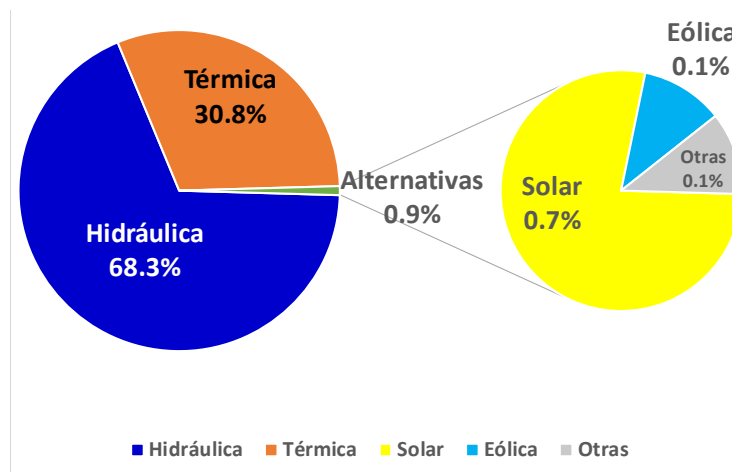


Figura 1, distribución de la matriz energética en Colombia según la fuente de energía (fuente UPME y ACOLGEN)

No obstante, la energía solar se puede aprovechar de muchas formas, a través de los denominados colectores solares, de los cuales se encuentran diferentes tipos enfocados a diferentes aplicaciones según sea el rango de temperaturas que se desea manejar. Aunque en Colombia no se tienen abundantes referencias de proyectos solares térmicos, es cierto que se cuentan con sitios en donde los índices de radiación solar entrante resultan ideales para implementar proyectos basados en el aprovechamiento de la energía solar.



## 1.1. Sistemas de aprovechamiento de la energía solar

Actualmente la energía solar se puede aprovechar para producir energía eléctrica, mediante los paneles fotovoltaicos, los cuales se componen de celdas fotovoltaicas (PV), que convierten la luz solar en electricidad de corriente continua (DC) durante las horas del día en que se tiene incidencia solar (Méndez Muñiz, 2010). En el marco de la transición energética para 2022, Colombia cuenta con 15 granjas solares, que en conjunto generan 1.13 MW/día, destacándose la granja fotovoltaica a gran escala construida por *CELSIA*, en septiembre de 2017, ubicada en el municipio de Yumbo en el Valle del Cauca, donde antes funcionaba *Termoyumbo*. Esta granja cuenta con 35.000 módulos fotovoltaicos instalados y 9 inversores que transforman la energía continua en energía alterna, con una capacidad instalada de 9.8 MW y generará cerca de 16.5 GWh de energía año, equivalentes al consumo de 8 mil hogares. En el corto plazo, la misma empresa tiene proyectado poner en marcha el *Celsia Solar Chicamocha*, que tendrá una capacidad de generación de energía limpia de 80 Megavatios, suficientes para cubrir el consumo de 20 mil viviendas, con un costo de 65 millones de dólares.

Sin embargo, este trabajo se enfocará en los sistemas de aprovechamiento solar para fines térmicos o de calentamiento, los cuales han sido objeto de investigación en las últimas décadas. Los sistemas captadores o colectores de la energía solar son los que la convierten en energía térmica la cual es transmitida a algún fluido de interés. Los tipos de captadores térmicos solares más utilizados son (Rufes Martínez, 2010 y Thirugnanasambandam, 2010) el Colector Lineal de Fresnel (CLF), el Colector Cilindro-Parabólico (PTC), el sistema de Torre solar (TSP) y el sistema de Disco Stirling (SDC):  
**Cilindro parabólico:** Utiliza reflectores en forma de espejo y tiene una estructura cilíndrica parabólica. Concentra la energía que proviene del sol por medio de unos tubos que se encuentran en medio de los espejos. Utiliza un fluido (sal fundente) que se calienta a 400°C, que por medio del vapor que genera mueve una turbina convencional.

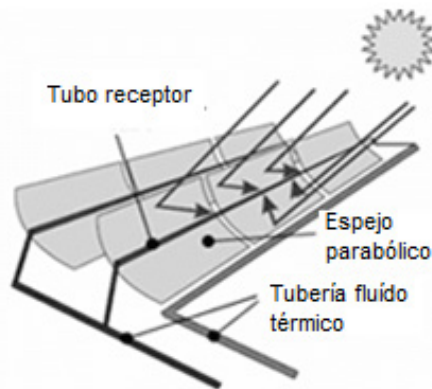


Figura 2, esquema de un sistema de cilindro parabólico, fuente (Buitrón, 2010)

Particularmente, la generación de potencia mediante sistemas CSP ha presentado un crecimiento significativo tanto en comercialización como en capacidad. Es así como la capacidad global instalada de la tecnología logró superar los 5 GW en 2016, 30 años después de la entrada en operación de la primera planta (Baharoon, 2015). Para 2019 se disponía de sistemas de hasta

377 MW y hay una gran expectativa de masificación debido a sus crecientes rendimientos y a los desarrollos de sistemas de almacenamiento eficientes que permiten la generación continua, incluso durante periodos con poca radiación: nubes, lluvia, noche.

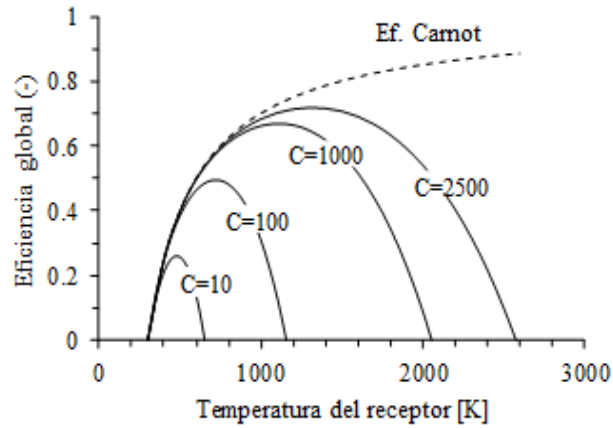


Figura 3, eficiencia ideal de sistemas CSP en función del factor de concentración

**Reflectores lineales Fresnel:** son sistemas que mediante espejos prácticamente planos concentra la luz del sol sobre unos tubos lineales, invertido y elevados, se caracterizan porque tienen un costo considerablemente bajo respecto a su estructura.

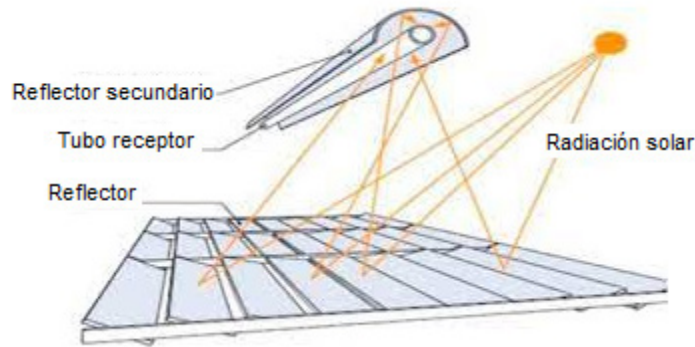


Figura 4, esquema de un sistema reflector lineal Fresnel, fuente (Zhu, 2014)

**Disco Stirling:** son colectores que concentran los rayos solares con un solo reflector parabólico por medio de un receptor que se encuentra en el punto de enfoque. El fluido que utiliza puede ser un gas o un líquido y varía su temperatura entre 250°C y 700°C. El calor que genera se utiliza para impulsar un motor Stirling que a su vez transforma la energía mecánica en electricidad.

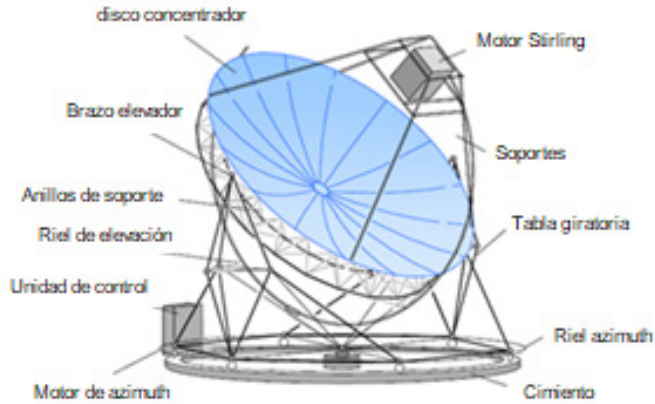


Figura 5, esquema de un sistema de disco parabólico, fuente (Hafez, 2016)

**Torre central (Heliostato):** consiste de un conjunto de espejos reflectores situados de forma circular que giran sobre uno o dos ejes, lo que permite que en todo momento los rayos del sol se focalicen en un solo punto durante todo el día, de manera que la radiación solar es dirigida sobre un receptor que se encuentra situado en una torre. El fluido que utiliza el receptor puede ser agua de mar que se calienta entre 500°C y 1000°C. Este calor permite mover una turbina que a su vez genera electricidad.

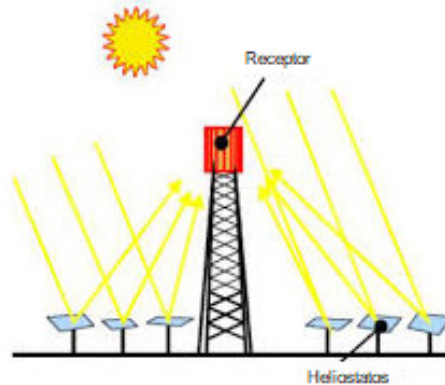


Figura 6, esquema de un sistema de torre solar, fuente (Purohit, 2017)

En la tabla siguiente se presentan los valores promedio de eficiencia térmica de estos sistemas de concentración solar (Ortega, 2012). Con base en lo anterior, con el fin de promover el uso de fuentes de energía renovables, particularmente la solar, en este proyecto se busca determinar la viabilidad de utilizar en zonas tropicales, sistemas de concentración solar tipo heliostato de baja potencia, en las que por sus condiciones geográficas se puedan manejar rangos de temperatura de alrededor de 80°C, lo cual sería lo adecuado para diferentes aplicaciones como el secado de productos, por ejemplo.

Tabla 1, eficiencia promedio de los concentradores solares (Ortega, 2012)

Tipo de sistema solar	Eficiencia (%)
páneles fotovoltaicos	12
Sistemas de torre central	20
Sistemas Cilindro-parabólicos	13 a 15
Sistemas de Disco Stirling	24

## 2. Metodología

Inicialmente se propone un diseño conceptual de la geometría del heliostato, inspirada en la flor de Girasol, de manera que el primer prototipo consta de 7 paneles hexagonales, dispuestos como se muestra en la Figura X. De esta manera se dispone de un área de captación solar de 1.61 m<sup>2</sup>. A continuación se diseñó y fabricó la estructura que soportará, además de los paneles colectores, los mecanismos y motores de paso que permitirán el movimiento basculante, las fuentes de alimentación, así como la sensórica que permitirá medir su desempeño térmico (Figura 3). Posteriormente se llevó a cabo el análisis de cargas, esfuerzos y deformaciones a las que se vería sometido el heliostato durante su operación típica y para estar seguros que los materiales y dimensiones elegidas resultan adecuadas. Dicho análisis fue efectuado utilizando un software CAD comercial con licencia educativa institucional.

Paralelamente se diseñó el sistema de control del heliostato y se acopló un sistema de rastreamiento solar basado en cálculos astronómicos de la posición del sol. La interfaz de control fue programada en Matlab y mediante tarjetas Arduino se registraron las señales de temperatura e intensidad de radiación solar.

Con base en los datos medidos de radiación solar entrante y mediante un balance de energía simplificado (Ecuación 1) donde se calcula la radiación útil como la diferencia entre la radiación entrante y las pérdidas de calor por convección y por radiación, tanto en el colector como en el receptor, se estimaron las eficiencias térmicas promedio (Ecuación 2).

$$Rad_{\text{útil}} = I_{\text{global}} - h A_s (T_s - T_{\text{aire}}) - \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{aire}}^4) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Eficiencia = \frac{Rad_{\text{útil}}}{I_{\text{global}}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$





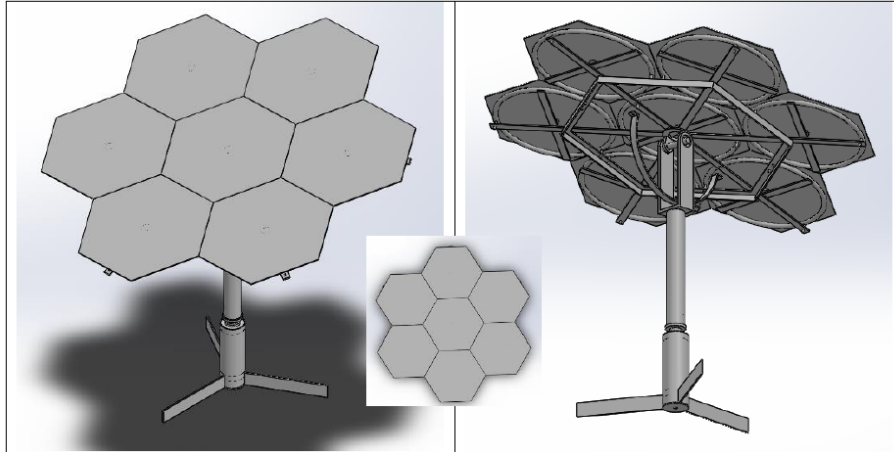


Figura 7, diseño preliminar de Heliostato (Elaboración propia)

### 3. Resultados

Los resultados del análisis de esfuerzos y deformaciones para el primer prototipo del heliostato, arrojaron que el punto donde se ejerce la mayor concentración de esfuerzos y la mayor deformación bajo carga axial, es en la zona periferal de las perforaciones para asegurar las chumaceras, donde se apreció un esfuerzo máximo que oscila entre 8 MPa y 10 MPa a compresión, y una deformación máxima corresponde a un valor de 0.1093 mm. El análisis para la columna del heliostato y el soporte que cargara con la superficie de espejos, mostró esfuerzos y deformaciones menores, dando al final un factor de seguridad global de 12.5, lo cual permitió establecer que incluso se pudo haber utilizado aluminio en lugar de acero, para el esqueleto del heliostato.

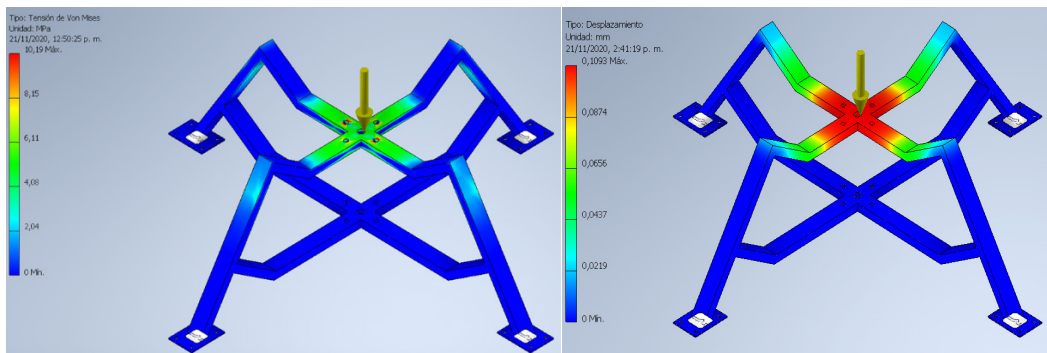


Figura 8, esfuerzo y deformación axial máximos en la estructura mecánica del heliostato

En cuanto al desempeño térmico del heliostato, mediante pruebas preliminares con un control manual de movimiento, se efectuaron algunas pruebas experimentales con el fin de determinar la eficiencia térmica del concentrador solar, a condiciones de Medellín. Para ello se midió la radiación solar incidente sobre el colector solar y sobre el receptor, al igual que las temperaturas alcanzadas en ambos.



Para una radiación incidente diaria promedio de  $900 \text{ W/m}^2$ , una humedad relativa promedio de 53%, una velocidad promedio del aire de  $1.6 \text{ m/s}$  y una temperatura ambiente promedio de  $28^\circ\text{C}$ , se obtuvieron eficiencias promedio de 71% en el colector y de 24.6% en el receptor, para una eficiencia global promedio del conjunto colector + receptor de 47.8%, los cuales están dentro de los valores típicos para estos sistemas de concentración solar.

De la misma manera se alcanzaron temperaturas promedio de  $41^\circ\text{C}$  en el panel colector y de  $56^\circ\text{C}$  en el receptor, aunque valga aclarar que dichas pruebas se realizaron en el mes de octubre donde se tiene la segunda temporada invernal y además donde el promedio anual de radiación solar incidente no es el mejor. Además, debe considerarse que en estas pruebas se utilizaron láminas hexagonales de acero inoxidable, ya que no se nos había suministrado aún los espejos pulidos. También para destacar que como receptor se utilizó una lámina de zinc de geometría rectangular de  $0.5 \text{ m}^2$  de superficie, ubicada a distancias de 1 m, 1.5 m y 3 m del colector hexagonal. Aún así, se alcanzaron temperaturas cercanas a los  $60^\circ\text{C}$ , sin embargo se estima que con un número mayor de helióstatos, con espejos del material y curvatura adecuados, un control automático robusto y operando en un sitio con mayor radiación solar incidente, se podrían alcanzar rangos de temperatura de alrededor de  $70^\circ\text{C}$  u  $80^\circ\text{C}$ , tal como lo lograron otros autores que efectuaron estudios de la influencia de aspectos como la relación de aspectos (Singhai, 2020) o el sistema de rastreamiento solar empleado (Hafiz, 2020).

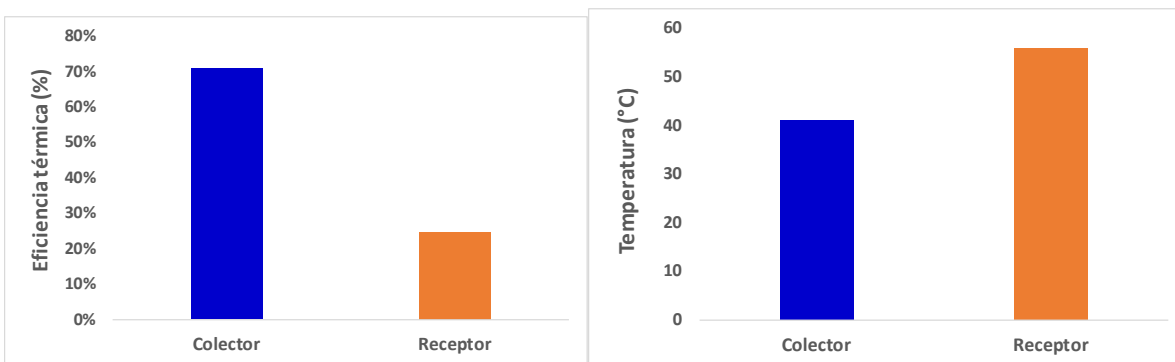


Figura 9, resultados de eficiencia promedio y temperatura superficial en el panel colector y en el receptor

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se hizo un análisis del potencial energético de los sistemas de concentración solar tipo heliostato, con el fin de ser usados como fuente energética para diferentes procesos en los que se manejen rangos de temperatura en torno a  $80^\circ\text{C}$ , en este sentido se diseñó y fabricó un prototipo de baja potencia el cual fue probado bajo condiciones típicas de la ciudad de Medellín. Las principales conclusiones son:

- La energía solar ha demostrado tener un gran potencial, tanto para sistemas fotovoltaicos como para sistemas térmicos, aunque la tecnología se encuentra más madura para los primeros.



- En Colombia aún es muy baja la participación de las energías alternativas y también el número de proyectos energéticos de mediana y alta magnitud basados en dichas fuentes alternativas.
- De los diferentes tipos de sistemas concentradores de la radiación solar, los heliostatos destacan por su aplicación en generación eléctrica y calentamiento a altas temperaturas (mayores a 700°C), lo cual los hace una opción válida para zonas no interconectadas donde se disponga de altos índices de radiación solar incidente, como la zona norte colombiana.
- La versión preliminar del prototipo diseñado y construido arrojó valores de eficiencia térmica y temperatura superficial acorde con lo que se maneja en la literatura científica, con la salvedad que aún no se tienen implementados ni los espejos pulidos ni el sistema de control y rastreamiento solar.
- A partir de los resultados se puede establecer que los heliostatos son una alternativa accesible para la sustitución de combustibles fósiles utilizados en aplicaciones de calentamiento donde se manejen rangos de temperatura cercanos a 80°C
- Con una infraestructura más robusta, en cuanto al número de heliostatos, materiales empleados y sistemas de control más depurados, se pondría pensar en tener centrales de generación eléctrica a pequeña y mediana escala, basadas en el aprovechamiento de la energía solar, especialmente en las zonas colombianas donde se disponga de altos índices de radiación solar.

## 5. Referencias bibliográficas

- ACOLGEN . Capacidad instalada en Colombia. Recuperado el 1 de junio de 2022 del sitio web <https://acolgen.org.co/#:~:text=La%20matriz%20de%20generaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica,son%20plantas%20de%20fuentes%20renovables>
- Blanco, Manuel J. - Miller, S. - Santigosa, L. (2017). Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies. *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. Woodhead Publish. Pp 3-25. SN 978-0-08-100516-3.
- Buitrón Proaño, R. D. (2010). *Elaboración de una normativa para el diseño y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos residenciales autónomos para el Ecuador*. Quito (Ecuador): Bachelor 's thesis.
- Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2016). Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis. *Energy Conversion and Management*, 126, 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.067>.
- Hafiz M., Salman H., Naveed A., Muhammad N. Case studies on the effect of two-dimensional heliostat tracking on the performance of domestic scale solar thermal tower. *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 21, 2020, 100681, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100681>.
- Méndez Muñiz, J. M. (2010). Energía solar térmica (No. 621.47 M4E5 2010). Editorial Fundación Comfemental, Madrid-España, 510 pp.
- Ortega, N. (2012). *Diseño y construcción de un motor Stirling tipo beta de baja potencia, utilizando como fuente de energía la biomasa del bagazo de caña*. Loja (México): Universidad de Loja.
- Purohit, I., & Purohit, P. (2017). Technical and economic potential of concentrating solar thermal power generation in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (August 2016), 648–667. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.059>.



- Rufes Martínez, P. (2010). Energía solar térmica: Técnicas para su aprovechamiento. Editorial Marcombo, Barcelona - España 428 pp.
- Singhai, R., Banker, N., Sinhmar, H., Jain, S., Kulshresth, S. (2020). Effect of aspect ratio of heliostats on the optical efficiency of solar tower power plant – an experimental analysis. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1751745>
- Thirugnanasambandam, M. - Iniyar, S. - Goic, Ranko. (2010) A review of solar thermal technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 14 Issue 1, 312-322
- UPME. BALANCE ENERGETICO COLOMBIANO – BECO, Recuperado el 1 de junio de 2022 del sitio web <https://www1.upme.gov.co/informacioncifras/paginas/balancedenergetico.aspx>
- Zhu, G., Wendelin, T., Wagner, M. J., & Kutscher, C. (2014). History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. *Solar Energy*, 103, 639–652.

## Sobre los autores

- **Laura Gaviria Sierra:** Estudiante de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo. [l.gaviria2513@pascualbravo.edu.co](mailto:l.gaviria2513@pascualbravo.edu.co)
- **Sebastián Zapata Molina:** Estudiante de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo. [s.zapata39@pascualbravo.edu.co](mailto:s.zapata39@pascualbravo.edu.co)
- **Juan Diego Patiño Olaya:** Estudiante de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo. [juan.patino313@pascualbravo.edu.co](mailto:juan.patino313@pascualbravo.edu.co)
- **Álvaro Delgado Mejía:** Ingeniero Mecánico, Magister en Energía de la Universidad de Antioquia. Profesor Ocasional Institución Universitaria Pascual Bravo. [alvaro.delgado@pascualbravo.edu.co](mailto:alvaro.delgado@pascualbravo.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

