

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR DE DISCO CON MOTOR STIRLING EN LA CIUDAD DE ARMENIA, COLOMBIA

EFFICIENCY ANALYSIS OF A SOLAR DISK COLLECTOR WITH STIRLING ENGINE IN THE CITY OF ARMENIA, COLOMBIA

Carlos Andrés Cárdenas Valencia [1]

Ramón Pali Casanova [2]

Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Universidad Internacional Iberoamericana
(UNINI), Campeche, México

339

RESUMEN

Este documento presenta el estudio y análisis de la eficiencia térmica y óptica de un colector de disco con motor Stirling ubicado en la ciudad de Armenia, Colombia, utilizado para producir energía eléctrica. Se realizó la implementación de un concentrador solar de disco parabólico

de 65 cm de diámetro con un motor Stirling pequeño. Se realizaron pruebas semanales midiendo durante 5 meses los valores de la temperatura en el reflector, temperatura en el absorbedor, temperatura ambiente y la radiación solar entre las 9 am y las 3 pm. Se calculó la eficiencia térmica, óptica y la potencia generada por el colector. Asimismo, se desarrolló un sistema de seguimiento solar automático basado en actuadores lineales controlados por una tarjeta Arduino, con el fin de obtener una mayor concentración de la radiación incidente. La radiación solar promedio fue de 626 W/m² y se obtuvo una eficiencia térmica promedio de 39,6% mientras que la eficiencia óptica fue del 33%, valores comparados con colectores de disco reportados en la literatura.

¹ Candidato a Doctor en Proyectos. Magister en Ciencias de los Materiales. Licenciado en Electricidad y Electrónica. Docente del Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica de la Universidad del Quindío. carlosac@uniquindio.edu.co. <http://orcid.org/0000-0002-0882-1810>

² Doctor en Materiales Poliméricos, Profesor-Investigador (Proyectos e Ingeniería Industrial), Universidad Internacional Iberoamericana. ramon.pali@unini.edu.mx <http://orcid.org/0000-0001-8028-0089>.

Palabras clave: energía solar, colector de disco, eficiencia térmica, eficiencia óptica, motor Stirling, seguimiento Solar.

ABSTRACT

This paper presents the study and analysis of the thermal and optical efficiency of a disk collector with a Stirling engine located in the city of Armenia, Colombia, used to produce electrical energy. The implementation of a 65 cm diameter parabolic disk solar concentrator with a small Stirling engine was carried out. Weekly tests were carried out, measuring the reflector temperature, absorber temperature, ambient temperature and solar radiation between 9 am and 3 pm for 5 months. The thermal and optical efficiency and the power generated by the collector were calculated. Likewise, an automatic solar tracking system was developed based on linear actuators controlled by an Arduino board, in order to obtain a higher concentration of incident radiation. The average solar radiation was 626 W/m² and an average thermal efficiency of 39,6% was obtained, while the optical efficiency was 33%, values compared with disk collectors reported in the literature.

KEYWORDS: solar energy, disc collector, thermal efficiency, optical efficiency, Stirling engine, sun tracking.

INTRODUCCIÓN

El sol es la principal fuente de energía del planeta proporcionando diariamente una energía promedio de 89.000 TWh, mientras que el consumo promedio anual de energía en la Tierra es de 16 TWh. Si se pudiera utilizar toda esta cantidad de energía, se podría generar suficiente electricidad para satisfacer la demanda mundial sin recurrir a la quema de los combustibles fósiles (Romero, O., Romero, S. & Wood, 2010).

La energía solar se puede utilizar para generar calor por medio de concentradores solares o

para generar electricidad mediante el uso de paneles fotovoltaicos o por medio de vapor a partir de procesos termodinámicos como el ciclo Rankine o el ciclo Stirling.

Desde la década de los 70, se empezaron a desarrollar a nivel mundial tecnologías para el aprovechamiento de la energía radiada por el sol y en la actualidad los estudios se centran en la reducción de los costos de las mismas.

Los concentradores de disco parabólico son una de las tecnologías que se utilizan actualmente para la generación de electricidad a partir de la energía solar. Un colector de disco consta de un concentrador en forma de paraboloide de revolución, un receptor ubicado en el foco de la parábola, el sistema de generación, la estructura de soporte y el sistema de seguimiento solar.

El concentrador es un espejo parabólico que permite concentrar la radiación solar sobre un punto situado en el foco de la parábola, en la que se ubica un receptor que absorbe la radiación y en cuyo interior hay un termofluido que se calienta y es transmitido a un motor Stirling encargado de convertir el calor en movimiento. El motor Stirling está conectado a un generador, por lo tanto, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

El motor Stirling es un motor de combustión externa inventado en 1816 por Robert Stirling. Este motor consta básicamente de un pistón que permite la expansión y contracción de un gas que es obligado a desplazarse entre una zona caliente y una zona fría en un ciclo cerrado. Se utilizan gases como helio, hidrógeno, nitrógeno o aire. El calor externo se puede obtener mediante fuentes de calor, como energía nuclear, combustibles fósiles, biomasa o energía solar.

Son diversos los estudios que se han realizado para mejorar el rendimiento de los colectores de disco parabólico. Dantsoho, Momoh, Garba, & Muazu (2019), realizaron un análisis del rendimiento óptico de un concentrador solar

de disco parabólico utilizado en procesos de calefacción y cocción con vapor. Se utilizó aluminio para recubrir el disco debido a la alta reflectividad y la distancia focal se calculó con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{D_a}{4 \tan^2 \frac{\phi}{2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde D_a es el diámetro del concentrador (m) y ϕ es ángulo de borde.

Se realizaron pruebas de ebullición del agua, de generación de vapor y de cocción de alimentos. Se alcanzó una temperatura de ebullición de 95 °C con una temperatura ambiente entre 25,3 °C y 34,0 °C y una radiación solar de 851 W/m², obteniendo una eficiencia óptica del 32,5%. Para el vapor, se obtuvo una eficiencia del 32,47%, mientras que para la cocción la eficiencia fue del 32,5% con una potencia de 63,5 W y una radiación solar de 318 W/m², valores que son suficientes para calentar y cocinar alimentos. Este diseño mostró una eficiencia un poco por encima que el de las estufas de mecha y presión de kerosene referenciadas por otros autores.

Alarcón, Hortúa & López (2013), realizaron el diseño de un prototipo de colector solar de disco parabólico con el fin de proveer de energía a sectores rurales que no tienen acceso a la energía eléctrica ni cuentan con fondos suficientes para adquirir una estufa eléctrica o de gas. Se utilizó acero inoxidable con una reflectividad del 87% con un diámetro de apertura de 1,5 m, una distancia focal de 0,42 m, un ángulo de 83,5°, un área de apertura de 1,77 m², un área del receptor de 387,9 mm² y una relación de concentración de 4555,671. La distancia focal se calculó con la ecuación 1 y el ángulo máximo de apertura se calculó con la siguiente ecuación:

$$\phi = 2 \arccot \left(\frac{D_a}{4f} \right) = 83,5^\circ \quad \text{Ecuación 2}$$

La relación de concentración se define como el área de apertura (A_a) dividida entre el área del receptor (A_r), y se calcula con la ecuación 3:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Ecuación 3}$$

El área de apertura se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para calcular el área de receptor se utiliza la ecuación 5:

$$A_r = 2\pi ah \quad \text{Ecuación 5}$$

La eficiencia óptica (η) del colector de disco depende de los mismos parámetros que un colector cilindro parabólico y por lo tanto se calcula mediante la ecuación 6. (El Ydrissi, Ghennioui, Bennouna, & Farid, 2019).

$$\eta_{opt} = \rho\alpha\gamma\tau \quad \text{Ecuación 6}$$

Los resultados mostraron que la eficiencia térmica del disco alcanzó un valor del 48,5%, mientras que la eficiencia óptica fue del 49% con una radiación solar de 826,68 W/m² en la ciudad de Bogotá, Colombia. Se determinó que, en Colombia, el lugar más apropiado para ubicar este prototipo es la Guajira debido a sus altos índices de radiación solar.

Jayadevamurthy, Chandrasekhar, Maruthi & Kumar (2017), fabricaron y analizaron el rendimiento de un concentrador de disco parabólico utilizado para aplicación en cocción y secado. Se utilizó aluminio como material reflector con un diámetro de 80 cm. El receptor es una caja de acero de 15 cm de diámetro, la cual se pintó de negro para absorber mayor radiación y se ubicó a una altura de 8 pulgadas. Los resultados mostraron que la temperatura del receptor siempre está por encima de la temperatura del reflector sobre todo entre las 11 am y 1 pm, alcanzando valores máximos de 66 °C para el receptor y 54 °C para el reflector, mientras que la temperatura ambiente máxima fue de 40 °C para un ángulo de inclinación de 0°. Se encontró que, al aumentar el ángulo de inclinación, las temperaturas van disminuyendo.

Mohammed & Bartholomew (2012), desarrollaron un circuito de control electrónico para el mecanismo de seguimiento solar de un calentador de agua, utilizando dos fotorresistencias y un actuador lineal. El sistema tiene una capacidad de 10 litros y puede calentar el agua hasta una temperatura de 100 °C. El disco tiene un diámetro de apertura de 167 cm, una distancia focal de 57,9 cm, recubierto por espejos de vidrio. El absorbedor es un cilindro de aluminio con una altura de 23,8 cm. Se determinó que el rendimiento térmico del sistema con el control automático es mayor al del control manual, logrando un 2% más de eficiencia térmica y un 4% menos de tiempo de conversión de la energía en el sistema.

Kulal & Patil (2016), analizaron el rendimiento de un disco solar parabólico utilizando diferentes materiales reflectantes para el calentamiento de agua. El sistema consiste en un disco parabólico solar que utiliza agua como fluido de trabajo, la cual se hace circular desde el tanque de almacenamiento hasta el receptor mediante una motobomba. Los materiales usados como reflectores son: acero inoxidable, aluminio y papel de plata. El funcionamiento del sistema consiste en llenar el tanque de almacenamiento con agua dulce mientras que el colector está expuesto al sol, luego se hace circular el agua a través del receptor o absorbedor y se mide la temperatura de entrada y salida del fluido y la radiación solar cada 10 minutos. Se determinó que para el acero inoxidable la eficiencia instantánea aumenta alcanzando su máximo valor de 44,82% a las 3.30 p.m. debido al aumento en la radiación solar, mientras que, para el aluminio, la eficiencia instantánea alcanza un valor máximo de 51,04% a la 1.40 p.m., y para el papel de plata, la eficiencia instantánea alcanzó un valor máximo de 43,44% a las 3.30 p.m. Se observó que el papel de plata es un material económico y de buen rendimiento para usar como reflector en los concentradores de disco parabólico.

Patiño, Nahmad, Moreno, De Los Santos & Santiago (2015), construyeron y caracterizaron ópticamente un espejo inflable fabricado con membranas flexibles de polímeros. Se encontró que la mejor aproximación para la forma de la superficie del espejo es cónica, con una relación de concentración de 25,1 soles a una distancia focal de 5 m, con lo que se obtuvo una eficiencia térmica de 37,51%. Se implementó una matriz de 7 espejos con la cual se alcanza una relación de concentración de 87 soles. Este tipo de espejos es económico, fácil de fabricar y de buena calidad óptica y se puede utilizar para aplicaciones como agua caliente, disco parabólico con motor Stirling o generación de electricidad fotovoltaica concentrada.

Aditya, Balaji, Chengappa, & Mohankrishna (2018), diseñaron y desarrollaron un motor Stirling para la generación de energía eléctrica en zonas rurales y analizaron el rendimiento de un disco parabólico como fuente de calor. Se propuso un motor diferencial de baja temperatura (LTD) Stirling tipo gamma debido a que es una de las configuraciones más simples de estos motores. El modelado se realizó en Solid edge. Para el disco solar se utilizó aluminio como material reflector con un diámetro de 1,4 m². Las pruebas del sistema se realizaron en dos días entre las 11 am y las 3 pm debido a que es el período en el cual la radiación solar es mayor. En el primer día se observó que la temperatura sobre el desplazador del motor osciló entre 35 °C y 44 °C, las cuales no fueron suficientes para hacer mover el motor. Se alcanzaron temperaturas entre 59 °C y 73 °C, las cuales hicieron que el motor funcionara, pero no de manera continua.

En el segundo día se utilizó un quemador como fuente de calor externa para poner en funcionamiento el motor, ya que éste no arrancó con el calor generado y se observó que la temperatura estuvo entre 89 °C y 110 °C haciendo mover el motor de manera continua. Se encontró que la cantidad de energía recibida

en el reflector fue de 520,69 J, con una eficiencia térmica del motor de 71,8%.

Gholamalizadeh & Chung (2017), realizaron un análisis energético y exergético de un sistema piloto de disco solar parabólico con motor Stirling. Se realizaron simulaciones de la eficiencia energética y exergética del disco instalado. Para ello se calculó la cantidad de irradiación sobre el sitio de trabajo durante todo el año.

Se determinó que, para el sistema piloto, la potencia de salida teórica es de 0,63 KW, mientras que el valor experimental es 0,60 KW, presentando un error porcentual del 4,61%. Para el EuroDish la potencia de salida teórica fue de 7,66 KW y la experimental fue de 7,55 KW con un error de 1,44% con una irradiación normal directa de 773 W/m² a mediados del mes de mayo. Estos resultados revelaron que las salidas de potencia predichas estaban muy de acuerdo con los datos medidos.

La máxima eficiencia energética se obtuvo para el mes de julio con un valor del 54% y entre noviembre y febrero, la eficiencia fue baja.

En cuanto a la eficiencia exergética, el máximo valor se obtuvo para el mes de julio con 41,5%. Los valores máximos totales para la eficiencia de energía y de exergía del sistema fueron de 12,2% y 13,2%, respectivamente.

Yan, Peng, Cheng, Liu & Tang (2017) estudiaron el diseño y la implementación de un sistema de energía solar con disco parabólico y motor Stirling de doble acción tipo alfa, con una capacidad de generación eléctrica de 38 KW y una eficiencia estimada de conversión de luz solar a electricidad del 25%. El disco tiene un diámetro de 17,70 m, una longitud focal de 9,49 m, área del disco de 204 m² y un ángulo de borde de 50°. Se encontró que el día 15 de octubre de 2015, el sistema generó energía promedio superior a 35 KW entre las 11 am y la 1:10 pm. El valor máximo de la radiación fue 750 W/m² con el que se alcanzó una potencia de 38,5 KW

mientras que la eficiencia del motor alcanzó un valor del 25,3%.

Xu, Gan, Li, Ruan, Wang & Wan (2016) desarrollaron un método de análisis para el diseño de discos solares para una planta de energía. El estudio se basó en un método para calcular el área de la sombra, así como el efecto de sombreado total en un día. Se determinó la influencia de los discos contiguos cuando se está realizando el seguimiento solar.

Hafez, Soliman, El-Metwally & Ismail (2016), realizaron un estudio para diseñar y operar un sistema de disco parabólico con motor Stirling de 10 KW, así como para estimar la potencia de salida utilizando el software MATLAB®. Se encontró que, para una película polimérica reflectora, la conversión neta de energía en el motor es del 97,07% es decir una potencia de 9707 W, por encima de los reflectores de aluminio Anod cuyo poder de conversión neto es del 85,97% equivalente a 8597 W y de reflectores de acero inoxidable pulido con una conversión neta del 49,52% con 4952 W. se observó que el rendimiento del motor se puede mejorar cuando se aumenta la eficiencia de la fuente de calor.

Papageorgiou, Maimaris, Hadjixenophontos & Ioannou (2014) presentaron un prototipo innovador para la conversión de energía solar en energía eléctrica denominado HelioTrobe. Este sistema se puede utilizar para producir energía térmica para su almacenamiento. Está conformado por un disco parabólico de 60 cm de diámetro con un motor Stirling pequeño y sistema de seguimiento solar en dos ejes con control automático para maximizar la captura de energía solar. El motor alcanzó una temperatura de 315 °C en su extremo caliente y de 45 °C en su extremo frío, generando una eficiencia máxima del 46%. El sistema se controla a través de una aplicación en internet y la información sobre el rendimiento se podrá consultar desde un pc o un teléfono móvil.

Li, Choi & Yang (2014), propusieron un modelo adiabático simplificado del motor Stirling, con control de temperatura mejorado para el absorbedor de calor del motor, teniendo en cuenta la velocidad del motor, la presión y la radiación solar para estudiar variaciones rápidas de temperatura y velocidad en una planta de disco parabólico. De acuerdo con los resultados obtenidos se tiene que el controlador es muy útil para reducir las variaciones de temperatura luego de que ocurre una perturbación.

Prinsloo, Dobson & Schreve (2014), propusieron un diseño para hacer más simple el ensamblaje y la instalación de un disco parabólico de 12 m² de área para generación de 12 KW de energía solar con motor Stirling.

En el año 2015 se construyó en Dubai un parque de energía solar térmica (STE) de primera generación denominado C11S, el cual está conformado por 10 unidades de disco parabólico y motor Stirling, con una capacidad de generación eléctrica de 11 KW. En el primer año de operación, el sistema C11S acumuló más de 20000 horas de operación y presentó pocas fallas. Asimismo, se aumentó la eficiencia anual mejorando tanto el hardware como el software del sistema (Nilsson, Jamot Malm, 2017).

El Ouederni, Salah & Askri (2009), diseñaron un concentrador de disco parabólico con un diámetro de 2,2 m, área de la parábola de 3,8 m², profundidad de 0,4 m, una distancia focal de 0,75 m y acero inoxidable con reflectancia del 85%. Este diseño permitió alcanzar una temperatura máxima de 380 °C en aproximadamente 20 minutos y se alcanzó una eficiencia del 27%.

OBJETIVOS

Implementar un colector solar de disco parabólico con motor Stirling y analizar su rendimiento óptico, térmico y energético para determinar su posible uso en la generación de electricidad. Además, desarrollar un sistema de

seguimiento en dos ejes que permita captar la mayor cantidad de radiación solar.

METODOLOGÍA

Para determinar la eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica se implementó un concentrador solar de disco parabólico con un motor Stirling pequeño. El disco tiene un diámetro de 0,65 m y un ángulo de borde de 40°. La distancia focal se calculó con la ecuación 1 y se obtuvo un valor de 0,45 m. El área de apertura del disco se calculó con la ecuación 4 obteniendo un valor de 0,33 m². La relación de concentración del disco parabólico se calculó utilizando la ecuación 3, la cual relaciona el área de apertura del disco y el área del receptor, obteniendo un valor de 126,9.

La superficie del disco se cubrió con una cinta reflectora con un coeficiente de reflectividad de 0,90. Para la generación de electricidad, el concentrador de disco parabólico trabaja en conjunto con un motor Stirling comercial pequeño. En la figura 1 se muestra el disco implementado.



Figura 1. Disco parabólico con motor Stirling. Tomada de Cárdenas (2021).

La radiación solar concentrada por el colector incide en el cilindro de calentamiento (tubo receptor), el cual está hecho de vidrio de cuarzo y está ubicado en el foco del disco parabólico. El calor calienta el aire y por medio de un ciclo Stirling el calor se convierte en energía mecánica. El volante alcanza una velocidad entre 2000 y 3000 revoluciones por minuto (rpm) y mediante una correa, transmite el movimiento al generador, convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica. El generador proporciona un voltaje de salida de 5 V.

Para asegurar que la radiación reflejada por el espejo, incida siempre sobre el tubo receptor se implementó un sistema de seguimiento solar en dos ejes, para lo cual se utilizaron sensores de luz conectados a una tarjeta Arduino que se encarga de recibir las señales de los sensores y ubicar el colector con la mayor radiación incidente. Este sistema cuenta con dos actuadores lineales encargados de mover el colector solar. El colector se programó para realizar el seguimiento desde las 9 am hasta las 3 pm, tiempo en el cual se realizaron las mediciones de variables como la temperatura en el disco reflector, la temperatura en el motor (absorbedor), la temperatura ambiente y la radiación solar. El disco se ubicó sobre una estructura en hierro para brindarle soporte al colector y darle estabilidad. La temperatura del reflector se midió con un sensor LM35 ubicado

sobre la superficie del disco, mientras que la temperatura en el motor se midió por medio de una termocupla tipo K en el tubo receptor. Estos sensores también se conectaron a la tarjeta Arduino para realizar el procesamiento y visualización de los datos de temperatura.

El estudio se realizó en la ciudad de Armenia, bajo una ubicación geográfica de latitud $4^{\circ} 33'11''$ y longitud $-75^{\circ} 39'39''$. La radiación solar se midió con un medidor de radiación SM-206 marca DR Meter.

Las mediciones de las temperaturas y la radiación solar permitieron calcular la eficiencia térmica, óptica y energética del concentrador de disco parabólico.

RESULTADOS

La radiación solar promedio registrada desde el mes de enero hasta el mes de mayo de 2021 arrojó un valor 626 W/m^2 , valor menor a lo reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para los últimos años con un promedio de 884 W/m^2 , debido básicamente a una alta temporada de lluvias durante todo el año 2021.

En la figura 2 se presenta el promedio mensual de la radiación registrada en los primeros meses del año 2021.



Figura 2. Radiación solar promedio mensual (W/m^2) en la ciudad de Armenia. Tomada de Cárdenas (2021).

Se implementó un concentrador de disco parabólico con motor Stirling con los parámetros que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. *Parámetros de diseño del colector de disco parabólico construido.*

Parámetro	Valor
Diámetro	0,65 m
Área	0,33 m ²
Angulo de borde	40°
Distancia focal	0,45 m
Relación de concentración	126,9
Material reflector	Aluminio
Reflectividad	0,90
Absorbedor	Motor Stirling
Diámetro interno	0,014 m
Área del receptor	0,0026 m ²
Carrera del pistón	0,012 m
Velocidad del motor	2000 rpm
Generador eléctrico	5 V

Nota: Tomada de Cárdenas (2021)

Se desarrolló un sistema de seguimiento solar bajo la plataforma Arduino, utilizando dos actuadores lineales, los cuales permiten seguir el sol con mayor precisión, manteniendo su posición lo más perpendicular posible y alcanzando a captar la mayor radiación sobre el motor.

Los datos experimentales se midieron desde el mes de enero hasta el mes de mayo del año 2021, desde las 9 am hasta las 3 pm y con ellos se calculó la eficiencia térmica, la eficiencia óptica del colector de disco y la potencia. Se midieron los valores de la temperatura ambiente T_a , la temperatura sobre el disco reflector T_d , la Temperatura en el receptor del motor T_r y la radiación solar G_s .

En la figura 3 se presentan los valores de las temperaturas promedio mensuales del disco reflector, temperatura del motor y radiación solar. Se observa que el mayor promedio de radiación solar se presentó en el mes de mayo con un valor de 848 W/m² presentando una temperatura promedio del receptor de 236,1 °C y una temperatura del disco de 46,6 °C. Se determinó que a mayor radiación promedio mayor son las temperaturas tanto del disco como del receptor. De igual manera se observa que la menor radiación promedio se presentó en el mes de febrero con un valor de 539 W/m² con las temperaturas más bajas tanto en el disco como en el receptor con valores de temperatura promedio del disco de 30,3 °C y 72,9 °C respectivamente, confirmando la proporcionalidad entre la radiación promedio y el promedio de las temperaturas. También se observó que para valores promedio de radiación solar menores a 400 W/m², no hay una diferencia muy grande entre las temperaturas del disco y el receptor.

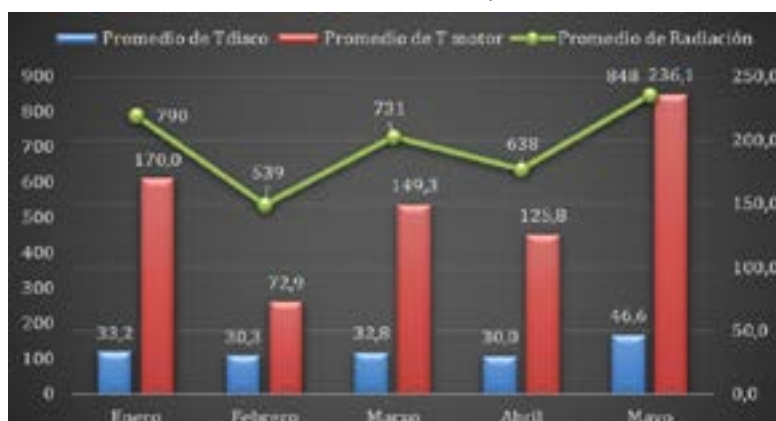


Figura 3. Valores promedio mensuales de temperaturas del disco, del receptor y radiación solar. Tomada de Cárdenas (2021).

La máxima temperatura en el disco se presentó el día 11 de mayo a las 9 am con un valor de 67,38 °C a una radiación solar de 1185 W/m², alcanzando una temperatura en el motor de 315 °C y con una temperatura ambiente de 20,5 °C. Asimismo, el día 5 de mayo a las 11 am se presentó la máxima temperatura en el motor, la cual tuvo un valor de 597 °C con una radiación solar de 1548 W/m² mientras que la temperatura en el disco fue de 54,69 °C a una temperatura ambiente de 23,2 °C.

El día 18 de marzo a las 3 pm se presentó la menor temperatura tanto en el disco como en el receptor con valores de 20,16 °C y 22 °C respectivamente con una radiación solar de 176 W/m² y temperatura ambiente de 20,3 °C. Estos valores nuevamente confirman la

proporcionalidad entre la radiación solar y la temperatura del colector de disco parabólico. La eficiencia óptica del colector de disco se calculó con la ecuación 6 obteniendo un valor del 33%.

En la tabla 2 se presentan los valores promedio mensual de la potencia y de la radiación solar para el colector de disco parabólico. Se observa que para el mes de mayo se obtuvo el mayor promedio de potencia con un valor de 104,6 W correspondiente a la mayor radiación promedio de 848,2 W/m². Asimismo, se observa que el promedio de potencia menor ocurrió en el mes de febrero con un valor de 71,6 W y la menor radiación promedio mensual de 538,5 W/m². Este comportamiento permite determinar que la potencia es directamente proporcional a la radiación solar.

Tabla 2. *Potencia (W) promedio mensual*

Año	2021				
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Potencia promedio (W)	100,6	71,6	93,7	82,1	104,6
Radiación (W/m ²)	790,1	538,5	731,3	637,6	848,2

Nota: Tomada de Cárdenas (2021)

La eficiencia térmica del colector de disco parabólico se calculó para cada uno de los días de las mediciones, obteniendo los promedios mensuales que se presentan en la tabla 3. La mayor eficiencia térmica se obtuvo el día

7 de febrero a las 12 del día con un valor de 42,0% a una radiación solar de 194 W/m² y una temperatura ambiente de 23,9 °C. El promedio de la eficiencia térmica durante el tiempo de las mediciones fue de 39,6%.

Tabla 3. *Eficiencia térmica (%) promedio mensual.*

Año	2021				
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Eficiencia térmica Promedio η (%)	39,5	41,0	39,9	40,1	38,2
Radiación (W/m ²)	790,1	538,5	731,3	637,6	848,2

Nota: Tomada de Cárdenas (2021)

Se observa que el mayor promedio de eficiencia térmica se obtuvo en el mes de febrero con un valor de 41,0% y la menor radiación promedio de 538,5 W/m². También se observa que el menor promedio de eficiencia de 38,2% se obtuvo en el mes de mayo con la mayor radiación promedio de 848,2 W/m². Este comportamiento muestra que, a mayor promedio de radiación solar, menor es el promedio de la eficiencia térmica del colector.

Los resultados muestran que el colector de disco desarrollado presenta un valor considerable en cuanto al promedio de la eficiencia térmica comparado con otros trabajos reportados en la literatura, sin embargo, se encontró que para lograr un movimiento del motor Stirling, se debía alcanzar una radiación solar superior a los 1000 W/m², adicionalmente se debía proporcionar un trabajo externo (empujar el volante) para que el motor comenzara a moverse ya que por sí solo no lo hacía.

Luego de que el motor estuviera en movimiento, este no se mantenía por mucho tiempo debido a las condiciones climáticas, como la nubosidad, que hacían que la radiación solar disminuyera bruscamente haciendo que el motor cesara

su movimiento. El promedio de tiempo de movimiento cada vez que el motor se movió fue de 1,6 min equivalentes a 96 s con un voltaje promedio de 2,2 V.

La menor radiación con la que se movió el motor fue de 1016 W/m² el día 13 de abril a las 10 am alcanzando una temperatura en el receptor de 302 °C y una temperatura ambiente de 22,7 °C.

La mayor radiación con la que se movió el motor fue de 1560 W/m² el día 1 de mayo a las 2 pm donde el motor alcanzó una temperatura en el receptor de 562 °C y una temperatura ambiente de 24,3 °C.

En la tabla 4 se presenta el promedio mensual de la temperatura del receptor (motor) y la radiación solar medidas mientras el motor estuvo en movimiento. Se observa que el mayor promedio de radiación solar fue en el mes de mayo con un valor de 1325 W/m², mes en el cual se alcanzó la mayor temperatura promedio en el motor con 417,8 °C.

El menor promedio de radiación solar fue en el mes de febrero con un valor de 1109 W/m², y la menor temperatura promedio en el motor con 303,7 °C.

Tabla 4. Promedio mensual de la temperatura en el motor y radiación solar.

Año	2021				
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Temperatura motor (°C)	405,9	303,7	382,3	347,4	417,8
Radiación (W/m ²)	1246	1109	1288	1240	1325

Nota: Tomada de Cárdenas (2021)

CONCLUSIONES

Se implementó un colector de disco parabólico con motor Stirling, utilizando cinta de aluminio reflectante para concentrar la radiación sobre el motor. Este sistema se ubicó sobre una base de tal forma que tuviera dos grados de movimiento para garantizar una mejor posición con respecto al sol. Se desarrolló el sistema de seguimiento solar en dos ejes, el cual garantiza de forma permanente la posición perpendicular al sol. Dicho sistema está compuesto por una parte mecánica y una parte eléctrica.

La parte mecánica consta de dos actuadores lineales que se encargan de brindar el movimiento de altura y de rotación del disco. Es decir, uno de los actuadores genera movimiento de norte a sur y el otro actuador produce el movimiento de este a oeste maximizando la radiación incidente sobre el espejo concentrador.

El control de este sistema se realizó con un microcontrolador bajo la plataforma libre de Arduino. Se utilizaron sensores de temperatura y luz, estos últimos encargados de enviar las señales al microcontrolador para mover los actuadores.

El programa desarrollado para realizar el seguimiento solar permite controlar los dos actuadores lineales moviéndose cada vez que los sensores de luz envían una señal al microcontrolador, el cual permite ir corrigiendo constantemente la posición del colector y ubicándolo siempre lo más perpendicular posible frente al sol. Las lecturas de los sensores de luz se realizan cada 10 minutos por lo tanto el colector se reposiciona en este mismo tiempo.

El programa también permitió obtener las lecturas de la temperatura del disco, así como la temperatura en el receptor del motor Stirling. Los datos fueron recolectados y guardados cada 10 minutos, siendo visualizados en tiempo

real. El algoritmo desarrollado se implementó para realizar el seguimiento solar entre las 9 am y las 3 pm, luego de esta hora el colector solar regresa automáticamente a su posición inicial (9 am) para iniciar su recorrido cada nuevo día.

Las mediciones de las temperaturas del disco reflector y del receptor del motor se llevaron a cabo desde el mes de enero hasta el mes de mayo del 2021 y se registraron los datos en el mismo tiempo del seguimiento solar, es decir, de 9 am a 3 pm. Con estos valores se calcularon las eficiencias térmica y óptica del colector de disco parabólico durante los 5 meses de las mediciones experimentales.

El análisis de los datos se realizó teniendo en cuenta los tiempos en los cuales el motor Stirling estuvo en movimiento. Durante el desarrollo de la parte experimental, el colector alcanzó una eficiencia térmica promedio del 39,6%, valor muy cercano a lo reportado en trabajos similares como el reportado por Dantsoho et al, 2019 cuya eficiencia fue del 32,5% y por Alarcón et al., 2013 con una eficiencia del 48,5%

Se encontró que la potencia es directamente proporcional a la radiación solar, y los mayores valores se presentan entre las 11 am y la 1 pm y los menores se encuentran entre las 9 y 10 am y entre las 2 y 3 pm.

La eficiencia óptica alcanzada por el colector de disco fue del 33%, valor por debajo de lo reportado por Alarcón et al. (2013) con un 49% pero similar al trabajo de Dantsoho et al. (2019) con 32,5%.

En el receptor del motor Stirling se alcanzaron temperaturas superiores a 200 °C, para radiaciones por encima de 1000 W/m² pero no se obtuvo movimiento del motor, razón por la cual se le dio un impulso manual para ponerlo en movimiento.

Debido a la disminución de la radiación solar, lo que implica una disminución de la temperatura en el receptor, el motor Stirling no consiguió moverse por más de dos minutos continuos y cada vez que se alcanzaban radiaciones altas se debía impulsar manualmente el motor.

Para este colector, la radiación solar es el parámetro más importante porque dependiendo de la intensidad se logra el movimiento en el motor. El voltaje proporcionado por el generador conectado al motor Stirling fue en promedio de 2,2 V para un tiempo promedio de movimiento de 96 s.

Se presentaron algunos problemas en el desarrollo de la investigación relacionados con la consecución de los actuadores lineales y el motor Stirling, los cuales tuvieron que ser importados debido a que en el comercio local no se consiguieron.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aditya, A., Balaji, G., Chengappa, B. C., Chethan Kumar, K., & Mohankrishna, S. A. (2018). Design and development of Solar Stirling Engine for power generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012022>
- Alarcón, J. A., Hortúa, J. E., & López G., A. (2013). Design and construction of a solar collector parabolic dish for rural zones in Colombia. *TECCIENCIA*, 7(14), 14–22. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2013.14>.
- Dantsoho, A. A., Momoh, M., Garba, M. M., & Muazu, M. (2019). OPTICAL ANALYSIS OF PARABOLIC DISH SOLAR CONCENTRATOR FOR HEATING PROCESSES. *International Journal of All Research Writings (IJARW)*, 1(August), 3–8.
- El Ouederni, A., Salah, M., Askri, F., Nasrallah, M., & Aloui, F. (2009). Experimental study of a parabolic solar concentrator. *Revue des Energies Renouvelables*, 12(3), (2009), 395-404.
- El Ydrissi, M., Ghennioui, H., Bennouna, E., & Farid, A. (2019). Geometric, optical and thermal analysis for solar parabolic trough concentrator efficiency improvement using the photogrammetry technique under semi-arid climate. *Energy Procedia*, 157, (2019), 1050-1060.
- Gholamalizadeh, E., & Chung, J. D. (2017). Exergy analysis of a pilot parabolic solar dish-Stirling system. *Entropy*, 19(10), 1–12. <https://doi.org/10.3390/e19100509>
- 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>
- Jayadevamurthy, M., Chandrasekhar, R., Maruthi, R., & Kumar, S. (2017). Design and Performance Analysis of Microcontroller based Solar Parabolic Dish Concentrator. *International Journal of Science Technology & Engineering (IJSTE)*, 3(09), 584–588.

- Kulal, S. D., & Patil, P. S. R. (2016). Performance Analysis of Parabolic Solar Dish Collector for Various Reflecting Materials. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 03(11), 326–329.
- Li, Y., Choi, S. S., & Yang, C. (2014a). An average-value model of kinematic Stirling engine for the study of variable-speed operations of dish-Stirling solar-thermal generating system. *IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA*, 1310–1315. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2014.6871113>
- Mohammed, I. L., & Bartholomew, P. (2012). DEVELOPMENT OF CONTROL CIRCUIT FOR PARABOLIC DISH SOLAR WATER HEATER. *International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET)*, 3(2), 16–25.
- Nilsson, M., Jamot, J., & Malm, T. (2017). Operational data and thermodynamic modeling of a Stirling-dish demonstration installation in desert conditions. *AIP Conference Proceedings*, 1850(June). <https://doi.org/10.1063/1.4984408>
- Papageorgiou, G., Maimaris, A., Hadjixenophontos, S., & Ioannou, P. (2014). HelioTrobe: An innovative and efficient prototype for solar power production. *EPJ Web of Conferences*, 79. <https://doi.org/10.1051/epjconf/2013790301>
- Patiño-Jiménez, F., Nahmad-Molinari, Y., Moreno-Oliva, V. I., De Los Santos-García, F., & Santiago-Alvarado, A. (2015). Construction and optical testing of inflatable membrane mirror using structured light technique. *International Journal of Photoenergy*, 2015, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/196186>
- Prinsloo, G., Dobson, R., & Schreve, K. (2014). Mechatronic platform with 12m solar thermal concentrator for rural power generation in Africa. *Energy Procedia*, 49, 1470–1480. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.15>
- Romero H, O., Romero H, S., & Wood, D. (2010). Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México sustentable. www.researchgate.net/profile/Sergio_Romero-Hernandez/publication/324173455_Energias_Renovables_Impulso_politico_y_tecnologico_para_un_Mexico_sustentable/links/5ac3b472aca27218eabc09c8/Energias-Renovables-Impulso-politico-y-tecnologico-para-un-Mexico-suste
- Xu, J., Gan, S., Li, S., Ruan, Z., Chen, S., Wang, Y., Gui, C., & Wan, B. (2016). Dish layouts analysis method for concentrative solar power plant. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3540-3>
- Yan, J., Peng, Y. D., Cheng, Z. R., Liu, F. M., & Tang, X. H. (2017). Design and implementation of a 38 kW dish-Stirling concentrated solar power system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 93(1), 0–14. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/93/1/012052>