







DOI: 10.20983/culcyt.2024.2.2.1

Concentrador solar estático reflectivo-refractivo: construcción y evaluación experimental

e21201

Reflective-refractive static solar concentrator: construction and experimental evaluation

Arturo Cordero-Guillén^{1a} , Guillermo Luque-Zúñiga^{1b} , Omar Jiménez-Ramírez^{1a} , Gonzalo Alonso Ramos-López^{1b} , Rubén Vázquez-Medina^{1b}  

^{1a}Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ciencias de Ingeniería en Sistemas Energéticos, ^{1b}Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro; Laboratorio de Energías Alternativas), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados de un experimento que mejora la eficiencia de la captación de energía solar de un concentrador solar estático refractivo-reflectivo. Para esto, se consideró un concentrador solar con eficiencia reportada del 69.36 %, el cual combina un prisma y un concentrador cónico metálico. La nueva versión del concentrador solar fue construida en un torno convencional usando acero 1018 que tiene bajo contenido de carbono (0.15 % al 0.20 %) en la aleación, a la cual se le aplicó un proceso de lijado y pulido para lograr un acabado tipo espejo. Se usó un sistema de medición de intensidad de luz basado en un microcontrolador Arduino Uno R3 de código abierto, soportado por el circuito ATmega328P, un fotodiodo y un foco de halógeno con ajuste de posición en altura y desplazamiento horizontal. La eficiencia lograda fue de 73.39 %, que supera los resultados ya reportados. Este trabajo ofrece una solución innovadora y eficiente que aumenta el tiempo de captación de energía solar. Además, proporciona otra alternativa que usa materiales diferentes a los reportados anteriormente, como la lámina de aluminio anodizado, con superficies altamente reflectantes. El concentrador solar desarrollado en este estudio se puede adaptar a sistemas más complejos de concentración solar. La mejora significativa en la eficiencia de captación de energía solar se debe a la rigidez y estabilidad de los materiales usados y a los procesos de acabado aplicados. Como ventaja se destaca su potencial aplicación en entornos industriales y comerciales basadas en energías renovables.

PALABRAS CLAVE: refractivo-reflectivo; concentrador de embudo; captación de energía solar; radiación solar.

ABSTRACT

This study presents the results of an experiment that improves the solar energy collection efficiency of a static refractive-reflective solar concentrator. For this, a solar concentrator with a reported efficiency of 69.36% was considered, which combines a prism and a metallic conical concentrator. The new version of the solar concentrator was built on a conventional lathe using 1018 steel that has low carbon content (0.15% to 0.20%) in the alloy, which was applied a sanding and polishing process to achieve a mirror-like finish. A light intensity measurement system was used based on an open source Arduino Uno R3 microcontroller, supported by the ATmega328P circuit, a photodiode and a halogen spotlight with height position adjustment and horizontal displacement. The efficiency achieved was 73.39%, which exceeds the results already reported. This work offers an innovative and efficient solution that increases the collection time of solar energy. In addition, it provides another alternative that uses different materials than those reported previously, such as anodized aluminum sheet, with highly reflective surfaces. The solar concentrator developed in this study can be adapted to more complex solar concentration systems. The significant improvement in solar energy collection efficiency is due to the rigidity and stability of the materials used and the finishing processes applied. An advantage is its potential application in industrial and commercial environments based on renewable energy.

KEYWORDS: refractive-reflective; funnel concentrator; solar energy harvesting; solar radiation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Rubén Vázquez-Medina

INSTITUCIÓN: Instituto Politécnico Nacional / Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada

DIRECCIÓN: Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, C. P. 76090, Santiago de Querétaro, México

CORREO ELECTRÓNICO: ruvazquez@ipn.mx

Fecha de recepción: 16 de febrero de 2024. **Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2024. **Fecha de publicación:** 13 de junio de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La energía solar es una alternativa de energía limpia. Si se considera que el planeta recibe del sol aproximadamente 1.5×10^9 TWh al año, el mayor potencial teórico global de radiación solar por año sería de 2300-2500 kWh/m², observándose en el norte y sur de África, Oriente Medio, Península Arábiga, Australia, México, Brasil, Estados Unidos, el Caribe y el Mediterráneo [1]. La creciente demanda de energía renovable ha impulsado el desarrollo de tecnologías eficientes para captar y aprovechar la energía solar [2]. Los dispositivos más comunes para hacer esto son los captadores y las celdas solares, así como los módulos fotovoltaicos [3], [4], [5]. En el contexto de la creciente demanda de energía renovable, en sustitución de los combustibles fósiles, la investigación en el campo de la energía solar ha adquirido una importancia creciente, impulsando el desarrollo de tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia de la recolección de energía solar.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

En el marco de la creciente demanda motivada por el cambio climático, la energía solar ha emergido como una fuente prometedora de energía renovable, debido a su abundancia y bajo impacto ambiental. Los avances en tecnología solar han llevado al desarrollo de diversas técnicas para aprovechar eficientemente la radiación solar y convertirla en energía utilizable. Los captadores, las celdas y los concentradores solares están entre los dispositivos más comunes utilizados para esta finalidad [5].

Los concentradores solares, por su eficiencia en la conversión de energía, surgen como una alternativa prometedora [6], [7], ya que permiten concentrar la radiación solar incidente en áreas más pequeñas, aumentando la densidad de potencia y reduciendo los costos asociados [8]. Uno de los enfoques más recientes en este campo es el uso de concentradores solares estáticos. Estos dispositivos buscan mejorar la eficiencia de la captación de energía solar mediante el uso de elementos ópticos para concentrar la radiación solar incidente en un área receptora más pequeña. Esto contribuye a prescindir de costos extra asociados a seguidores solares, que, si bien son de alta concentración, tienen ángulos de aceptación pequeños [9].

Las investigaciones que influyeron notablemente en la realización de este trabajo se centran en el uso y la optimización de la energía solar y en el desarrollo de nuevas

técnicas para la captación de energía. Algunos de estos trabajos abordan la disponibilidad, destacando a México como uno de los países con un gran potencial en el aprovechamiento de energías limpias. Este reconocimiento motiva a seguir investigando las formas de aprovechar la radiación solar de manera efectiva. A continuación, se enlistan y describen brevemente algunos trabajos que demuestran la importancia de abordar la optimización de los sistemas de concentración de energía solar.

En 2016, Grede *et al.* [10] realizaron una búsqueda de opciones para el seguimiento solar que incrementara el tiempo de captación de energía solar a través de paneles fotovoltaicos. Ellos utilizaron microseguimiento planar integrado a paneles fotovoltaicos estándar. Salvi *et al.* [11] estudiaron en 2018 los retos que enfrenta la industria fotovoltaica y los asemeja a aquellos que tiene la industria de los semiconductores. Ellos presentaron una revisión de cómo se gestiona el calor concentrado en los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. Por su parte, Shahsavari y Akbari [12] publicaron en 2018 un estudio sobre el potencial de la energía solar en países en desarrollo como una estrategia para reducir las emisiones relacionadas con la energía fósil. Ellos examinaron las oportunidades y desafíos que enfrentan estos países en la adopción de tecnologías solares y destaca su papel en la mitigación del cambio climático y la transición hacia fuentes de energías limpias.

Por su parte, Gorjian, *et al.* [13] realizaron en 2020 una revisión exhaustiva de los avances recientes en las técnicas para mejorar el rendimiento térmico de los captadores solares de baja temperatura. También abordaron los principales tipos de captadores solares de baja temperatura, incluyendo los captadores de placa plana, de tubo de vacío y parabólicos compuestos. En 2022, Masood *et al.* [14] estudiaron el incremento de la energía eléctrica generada por módulos solares fotovoltaicos mediante la concentración de radiación solar. Para lograr esto, propusieron la integración de concentradores ópticos con módulos fotovoltaicos planos. Además, destacaron que una de las causas de pérdidas de energía en los concentradores parabólicos compuestos se atribuye a imperfecciones en las superficies reflectantes y subrayaron la importancia de un proceso de fabricación riguroso para el control de las imperfecciones.

Finalmente, Luque-Zuñiga *et al.* [15] diseñaron en 2023 un concentrador solar estático reflectivo-refractivo y realizaron un montaje experimental que les permitió

evaluar la eficiencia del sistema, simulando las condiciones de iluminación generadas por el sol. Igualmente, resaltaron que la configuración de este concentrador solar permite la integración gradual de varios de ellos para construir sistemas más grandes y eficientes de concentración solar estática.

CONTRIBUCIÓN

Esta investigación se enfocó en estudiar y mejorar la eficiencia de un concentrador estático refractivo-reflector, el cual permite una eficiencia mayor que otras alternativas estáticas de concentración solar. Para aumentar la eficiencia en la concentración solar se han desarrollado soluciones con dos enfoques. Por un lado, se han propuesto dispositivos con seguimiento automático del sol, buscando alcanzar altos factores de concentración. Sin embargo, este tipo de soluciones aumenta significativamente la inversión y el costo de mantenimiento [16]. Por otro lado, para concentradores solares estáticos con bajos factores de concentración, han surgido estudios que evitan sistemas adicionales de seguimiento solar, pero buscan aumentar el tiempo de captación solar a través de la incorporación de superficies con ángulos de aceptación más amplios [17].

En este trabajo se combinan elementos ópticos refractivos y reflectivos en un sistema de concentración estático para maximizar el tiempo de captación de energía solar y superar las limitaciones que tienen alternativas que se diseñan con enfoques convencionales [9]. Bajo condiciones controladas de iluminación, se realizó un análisis experimental de eficiencia en la captación de energía. Además, en este trabajo se presenta el proceso de fabricación de un prototipo de concentrador solar estático refractivo-reflector, incluyendo la selección de materiales y técnicas de fabricación. El concentrador propuesto se presenta con la idea de contribuir al desarrollo de tecnología para generar energía eléctrica y térmica en entornos residenciales, comerciales e industriales. El concentrador propuesto integra componentes ópticos y su diseño ha permitido identificar otras posibilidades de mejorar la eficiencia en la captación solar. Por ejemplo, se puede considerar el uso de otros materiales que mejoren las condiciones de reflectividad. Además, este estudio ha permitido identificar también la aplicación de los concentradores solares de manera conjunta con sistemas de almacenamiento de energía térmica.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se presenta en cuatro etapas: revisión bibliográfica, diseño mecánico, proceso de fabricación y análisis experimental. Enseguida se describe cada una de ellas.

1. Revisión bibliográfica. Esta etapa se realizó para comprender las características de los concentradores solares que se han expuesto a la fecha. De esta revisión, se eligió el concentrador solar estático tipo cónico desarrollado por Luque-Zuñiga *et al.* [15], debido a que sus características ópticas y geométricas mejoran la eficiencia de la captación solar. Las características principales del concentrador propuesto en este trabajo, a diferencia del planteado por Luque Zúñiga *et al.* [15], son las siguientes: a) dimensiones: es más alto, guardando las proporciones con los diámetros que generan el cono, lo que permite aumentar el tiempo en la captación solar durante el día; b) material utilizado: se usó acero 1018 en una sola pieza sin uniones para evitar deformación y deficiencias en la captación solar (en el de Luque-Zuñiga *et al.* [15] se usó lámina anodizada de aluminio unida por pegamento para formar el cono); c) se le aplicó un proceso de lijado y pulido para lograr un acabado tipo espejo y d) para el maquinado se establecieron condiciones precisas, tales como velocidades de corte, desbaste y acabado, con el propósito de asegurar la repetibilidad en futuros desarrollos.

Un aspecto diferenciador importante radica en la rigidez del prototipo, la cual garantiza la integridad estructural y evita deformaciones incluso ante la manipulación o exposición prolongada a la intemperie.

2. Diseño mecánico. A partir del concentrador solar estático seleccionado, se crearon los planos y diagramas mostrados en la [Figura 1](#), que sirvieron como guía para el proceso de fabricación. Ahí se observa que el diseño en una sola pieza logra un adecuado acople con el prisma en la parte superior y con un sistema transductor en la parte inferior.

El diseño del concentrador estático se basó en las especificaciones, estudios previos y análisis numéricos realizados por Luque Zúñiga *et al.* [9], [15]. La [Figura 1](#) muestra las dimensiones que facilitan la fabricación del prototipo y se incluyen las especificaciones de una ranura que evita el uso de adhesivos para el montaje de un prisma sobre el cono concentrador. Además, se presenta una brida de

acoplamiento entre el concentrador y otros dispositivos, lo que permitió realizar pruebas en condiciones reales.

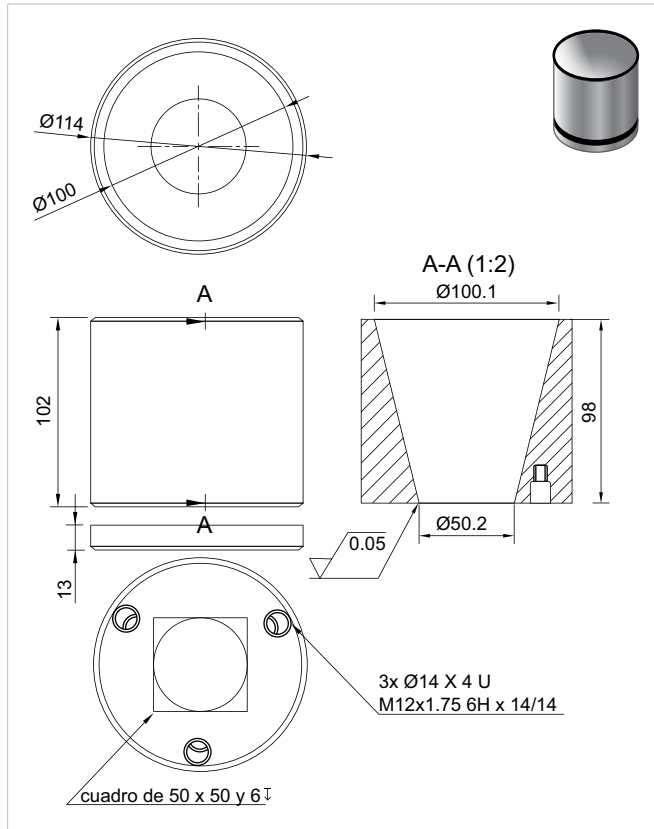


Figura 1. Diagramas de diseño mecánico para el concentrador solar.

El concentrador solar propuesto tiene un área de 7869.70 mm² en el diámetro mayor y un área de concentración efectiva de 1979.23 mm² dada en el diámetro menor. La altura total es de 102 mm. Conforme a sus diámetros mayor y menor, el concentrador tiene un ángulo de aceptación de 45° y un factor geométrico de concentración (GCR: Geometric Concentration Ratio) igual a 4x. El GCR se puede calcular de acuerdo con la Ecuación (1) [15], donde A representa el área de la circunferencia con mayor diámetro en el cono concentrador y a el área de la circunferencia con menor diámetro en el cono.

$$GCR = \frac{A}{a} \quad (1)$$

3. Proceso de fabricación. El concentrador solar se fabricó en acero 1018 en un torno convencional con un diámetro de volteo de 14 pulgadas. Para lograr un acabado fino en el cono, durante el proceso de maquinado se utilizó una velocidad de corte de 30 m/min y una

velocidad de husillo principal de 120 rpm. Estas condiciones controladas permitieron alcanzar una rugosidad superficial uniforme en el cono de $Ra = 3.2 \mu\text{m}$, la cual se confirmó al compararla con un patrón de rugosidades. Posteriormente, la superficie interior del cono se sometió a un riguroso proceso de lijado y pulido hasta alcanzar un acabado tipo espejo. Las condiciones de fabricación incluyen la selección de abrasivos, utilizando tamaños de grano específicos (200, 400, 600, 1000 y 1500).

El proceso de lijado comenzó eliminando imperfecciones y marcas de la superficie interior del cono. Para ello, se utilizaron inicialmente lijas de grano grueso y gradualmente se avanzó con las más finas. Cada paso se llevó a cabo durante 25 min, a 300 rpm en el husillo principal del torno y, posteriormente, se procedió con un pulido final durante 40 min, utilizando pastas de uso automotriz. Por razones de seguridad personal se usó una velocidad controlada de 400 rpm en el husillo principal del torno. Después de cada etapa, se hizo una inspección visual para detectar y corregir cualquier imperfección y, cuando fue necesario, se hizo un lijado y pulido adicional. La Figura 2 muestra el resultado del proceso de pulido del concentrador solar desde varios ángulos, destacando el acabado obtenido y la reflexión de la luz que genera un patrón concentrado.

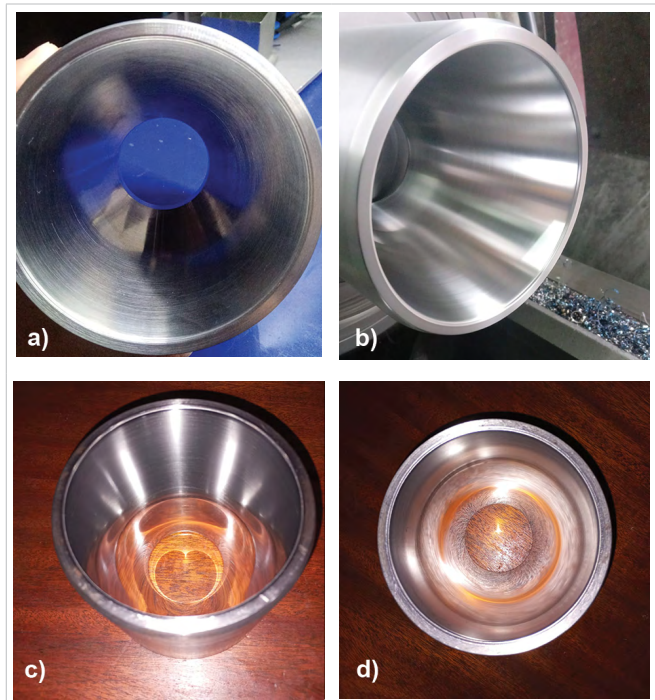


Figura 2. Cono concentrador: a) recién maquinado y con el primer proceso de lijado, b) en proceso de pulido, c) y d) con acabado tipo espejo en diferentes tomas fotográficas

Para el prisma se utilizó acrílico comercial en placa cuadrada de 102 mm y 38 mm de grosor, se mecanizó en un torno y fue sometido a un proceso de pulido similar al del cono concentrador, resultando en un material que permite el paso de luz sin desviaciones significativas ni pérdidas de intensidad [18]. Tomando en cuenta que el acrílico comercial posee una transmisión la luz cercana al 92.5 % (según la norma ASTM D-1003), el resultado final es un material óptico de alta calidad. En la [Figura 3](#) se aprecia la evolución que tuvo el acabado del prisma, considerando el maquinado, lijado y pulido.

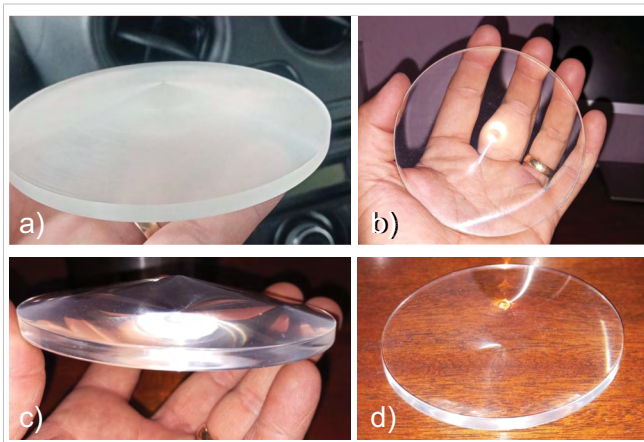


Figura 3. Prisma refractivo desarrollado: a) sin pulir, b) pulido en vista superior, c) pulido vista lateral y d) acabado final mostrado al colocarlo en una superficie.

4. Análisis experimental. En esta etapa de la metodología se utilizó una fuente de iluminación que distribuye uniformemente la luz, permitiendo simular las condiciones de radiación solar representativas. Dentro de las medidas que se implementaron para minimizar la interferencia de luz ambiental y otros factores, destaca el uso de materiales opacos y cortinas que bloquearon la entrada de luz no deseada y la proveniente de LED o luces indicadoras de aparatos electrónicos. Luego, se procedió al montaje experimental entre el prisma y el concentrador. Este proceso validó un acoplamiento preciso entre ambas piezas, ya que se diseñó con una tolerancia de ± 0.1 mm entre el cono y el prisma. Una vez ensamblados, el conjunto fue fijado en una mesa de trabajo para realizar las mediciones programadas para evaluar el rendimiento del sistema. La [Figura 4](#) muestra el montaje y fijación de los elementos del sistema.

Se buscó mantener el dispositivo de concentración de luz a una altura de 20 cm colocado horizontalmente sobre la mesa de metrología. Las mediciones de concentración

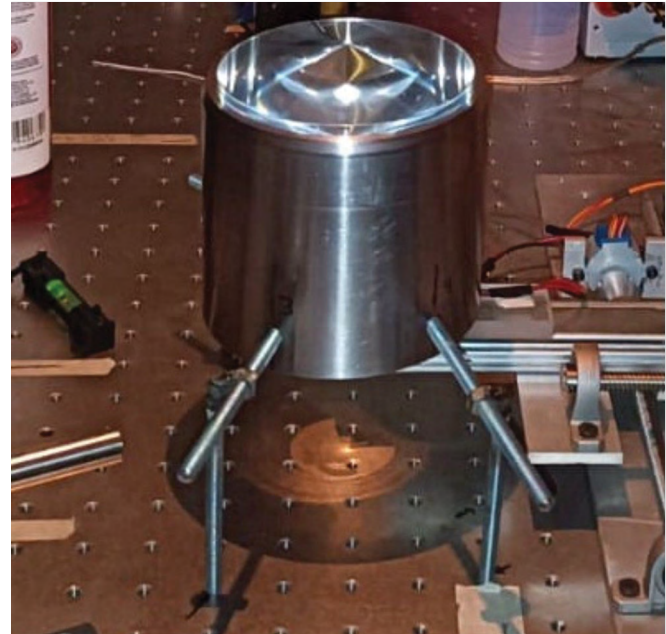


Figura 4. Montaje del prisma, cono concentrador y fijación del sistema a la mesa de trabajo.

de luz se realizaron mediante un microcontrolador de código abierto, soportado por el circuito ATmega328P de Arduino. Los criterios para seleccionar la tarjeta Arduino Uno R3 son su amplia disponibilidad, bajo costo y fácil programación, además de que proporciona una interfaz intuitiva para la implementación de algoritmos de control y adquisición de datos, lo que resulta fundamental en el desarrollo del sistema de instrumentación requerido en este proyecto. El microcontrolador controla la posición de un fotodiodo BPW34 altamente sensible a la luz. Con ello, colocando el fotodiodo en diferentes puntos del plano focal del cono, se obtuvieron mediciones digitales en el intervalo $[0, 1023]$, lo que se produce a través de un convertidor analógico-digital (ADC) con resolución de 10 bits integrado en el microcontrolador [19]. Estas mediciones digitales son números adimensionales identificados por la variable m y son los factores de proporcionalidad para estimar la irradiancia. Estos factores de proporcionalidad m provienen del voltaje v_f medido en el fotodiodo y se estiman de la siguiente manera. Primeramente, $m = 0$ corresponde a $v = 0$ V y $m = 1023$ corresponde a $v = 5$ V. Luego, la relación entre m y v_f resulta del proceso de escalamiento que hace el ADC, definido según se indica en la Ecuación (2), donde $f_{Round}(\cdot)$ calcula la parte entera de un número y para este caso $v_{ref} = 5$ V.

$$m = f_{Round}\left(1023 \frac{v_f}{v_{ref}}\right) \quad (2)$$

Por otro lado, la relación lineal entre los voltajes de referencia y los captados por el fotodiodo BPW34 se estableció con base en la hoja de datos del fabricante Vishay Semiconductores [20], que indica que la corriente generada por el fotodiodo es proporcional a la intensidad de luz incidente. Con estos datos se conformó una matriz cuadrada de 20×20, la cual fue extraída de la matriz de 35×35 que se genera desde el montaje experimental. Cada coordenada contiene las cantidades adimensionales m con valores en el intervalo [0, 1023]. Para la calibración del sistema se tomó como referencia el valor de $\hat{m}_{ref} = 45.47$ obtenido a partir del promedio de la matriz, con tamaño 20×20, que registra los factores de proporcionalidad con los que se calcula la concentración solar equivalente de las 12:00 horas del día, sin que en el montaje experimental esté incluido el cono concentrador. Luego, se asumió que dicho valor promedio de referencia de los factores de proporcionalidad corresponde a una irradiancia de 1000 W/m². Lo anterior se hizo conforme a lo recomendado en la norma ISO 9060:2018, la cual ayuda a establecer una irradiancia estándar para calibración de instrumentos de medición. Posteriormente, se determinaron los factores de proporcionalidad m en cada horario definido para estimar la concentración solar. Así, se trazó una curva representativa de la energía concentrada.

La [Tabla 1](#) muestra el valor promedio \hat{m} , calculado a partir de los valores m generados de las lecturas del fotodiodo realizadas en cada horario. También se expone su correspondiente irradiancia E , expresada en W/m², tomando como base $\hat{m}_{ref} = 45.47$ de aquellos valores m para estimar E a partir de la irradiancia estándar $E_{std} = 1000$ W/m².

TABLA 1

VALOR PROMEDIO \hat{m} DE LAS LECTURAS DEL FOTODIODO Y LOS VALORES CORRESPONDIENTES DE IRRADIANCIA SOLAR E

HORA	\hat{m}	E (W/m ²)
8:00	0.85	18.58
8:30	2.50	54.93
9:00	2.91	63.89
9:30	5.55	122.11
10:00	17.51	385.09
10:30	64.34	1414.94
11:00	112.32	2470.26
11:30	162.53	3574.50
12:00	158.85	3493.51

En la [Figura 5](#) se muestra el montaje experimental para estimar E y la forma en que se ajustó la posición de la lámpara de halógeno.

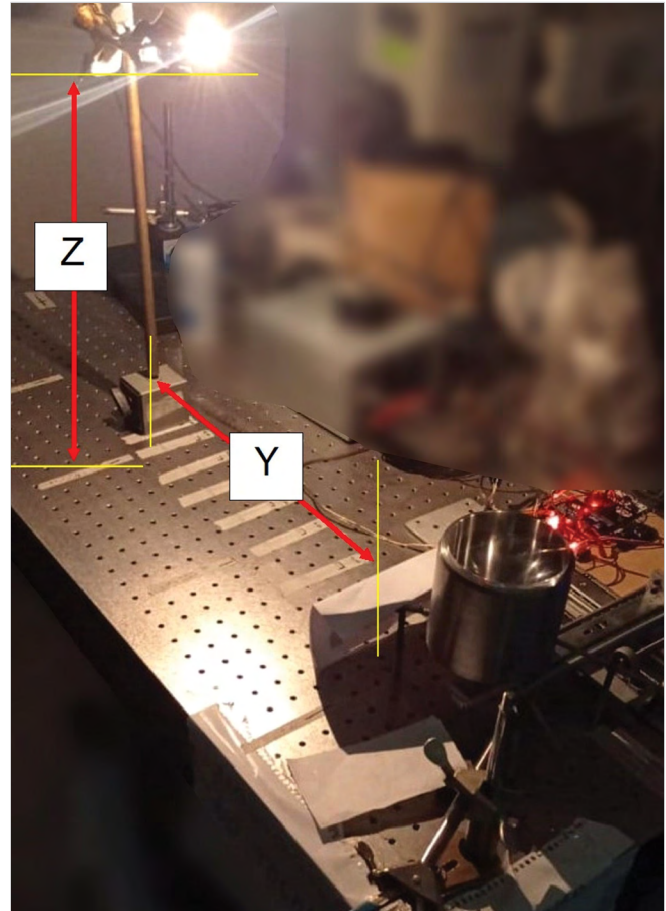


Figura 5. Montaje experimental del sistema.

El montaje experimental se describe a continuación.

1. Prisma. Posee una altura de 33.77 mm. Está acoplado al concentrador cónico mediante un ajuste justo con tolerancia ± 0.1 mm en el diámetro.
2. Concentrador cónico. Tiene una altura de 102 mm, con diámetro mayor de 100.1 mm y menor de 50.2 mm. Posee una ranura de 0.5 mm de profundidad que sirve como asiento del prisma.
3. Sistema de varillas con ajuste roscado. Se usa para mantener elevado el sistema concentrador-prisma a 20 cm de altura y con la base del diámetro menor paralela a la mesa de trabajo.

En la [Figura 5](#) se observa también la disposición de un foco de halógeno de 100 watts y la fuente de alimentación que suministró energía al sistema de control de posición del fotodiodo. La posición de la fuente de iluminación, que emula a la luz del sol, se calculó considerando la divergencia de 0.53° aproximadamente,

experimentada por rayos solares que llegan a la tierra [16] y que emulan el movimiento aparente del sol [9], [15]. Las alturas a las que se coloca la lámpara se muestran en la [Tabla 2](#). En esta tabla, la Z representa la altura de la lámpara y Y la distancia respecto al centro del concentrador. Esta disposición se muestra esquemáticamente en la [Figura 5](#).

TABLA 2
POSICIONES DE LA LÁMPARA DE HALÓGENO

HORA	Z (m)	Y (m)
8:00	0.27	0.47
8:30	0.33	0.43
9:00	0.38	0.38
9:30	0.43	0.33
10:00	0.47	0.27
10:30	0.50	0.21
11:00	0.52	0.14
11:30	0.54	0.07
12:00	0.54	0.00

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es necesario enfatizar que la calidad de los resultados se establece con base en la precisión de 10 bits del ADC en el Arduino UNO R3, lo que permite generar 1024 valores posibles a su salida, que ocurrirán en el intervalo [0, 1023]. Esto implica una resolución aproximada de 4.89 mV por paso de conversión, considerando que el voltaje de salida leído en el fotodiodo está entre 0 y 5 V. Este voltaje a su vez depende de la luz que incide en dicho fotodiodo. A partir de esto, y con base en los principios reconocidos en metrología, es posible determinar la incertidumbre en estas mediciones. En ese sentido, Morris [21] señala que la incertidumbre en las mediciones digitales puede considerarse proporcional a la resolución del ADC. Por otro lado, Webster y Eren [22] precisaron que la resolución del ADC afecta la precisión de las mediciones digitales en ± 0.5 veces el tamaño del paso del ADC, lo que en este caso equivale aproximadamente a ± 2.44 mV, considerando dos dígitos en la representación de estos voltajes expresados en milivoltios. Asimismo, considerando que la variable \hat{m} se está estimando con cálculo a centésimas, es decir, la cantidad más pequeña que puede representar es 0.01, $U_m = \pm 0.005$ resulta ser su incertidumbre implícita. Con ello, usando las Ecuaciones (3) y (4) se puede estimar E con incertidumbre, de manera que la incertidumbre para E es $U_E = \pm 0.11$ W/m².

$$E_U + E \pm U_E \quad (3)$$

donde U_E queda definida por

$$U_E = \pm \frac{U_m}{\hat{m}_{ref}} E_{std} \quad (4)$$

La recolección de datos se llevó a cabo para los diferentes horarios definidos, según las distancias indicadas en la [Tabla 2](#). Estos intervalos de medición, programados cada media hora, permitieron obtener una serie temporal de datos que se incluyen en las matrices de 35×35 con los factores de proporcionalidad de irradiancia. Estas matrices constituyen patrones de concentración solar a lo largo del día, según la [Figura 6](#). Estos patrones corresponden a los horarios indicados en la [Tabla 2](#).

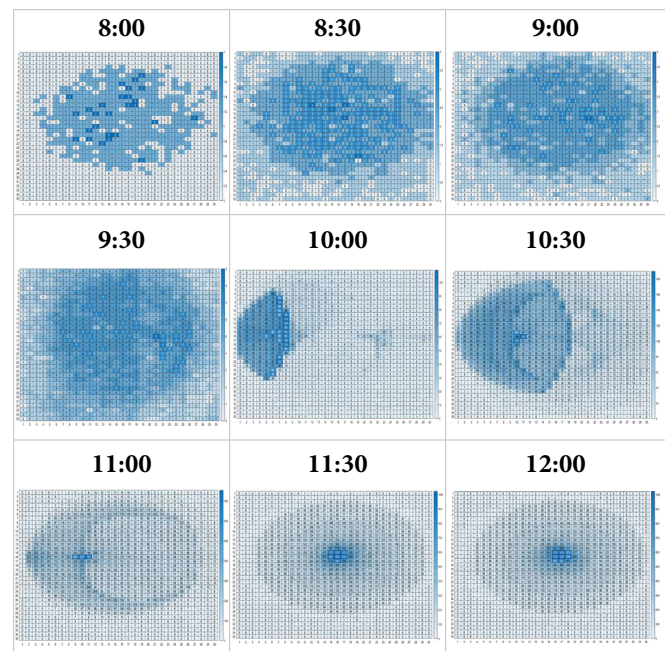


Figura 6. Factores de proporcionalidad de irradiancia correspondiente a los horarios definidos en la [Tabla 2](#).

Cabe destacar que el patrón generado por los factores de proporcionalidad indicados en la [Figura 6](#) para las 12:00 horas del día, corresponde con el patrón generado por la luz en la [Figura 7](#). Tras llevar a cabo las mediciones en los nueve horarios indicados en la [Tabla 2](#), se generaron los 9 patrones de concentración presentados en la [Figura 6](#). Los valores presentados en la [Tabla 1](#) se muestran graficados en la [Figura 8](#).

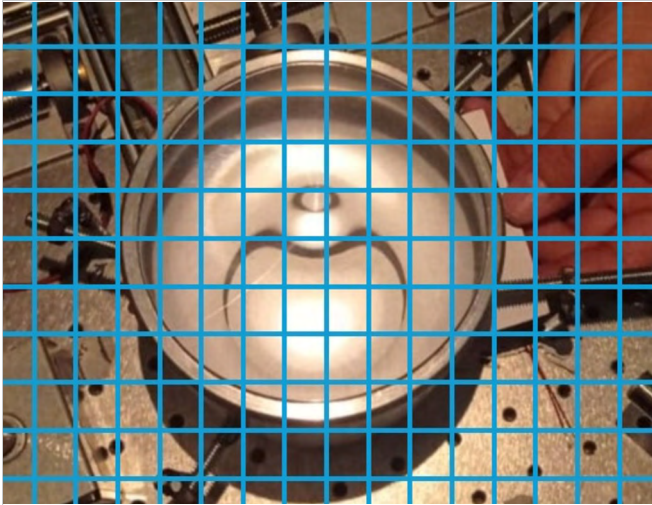


Figura 7. Patrón de concentración de luz correspondiente a las 12:00 horas.

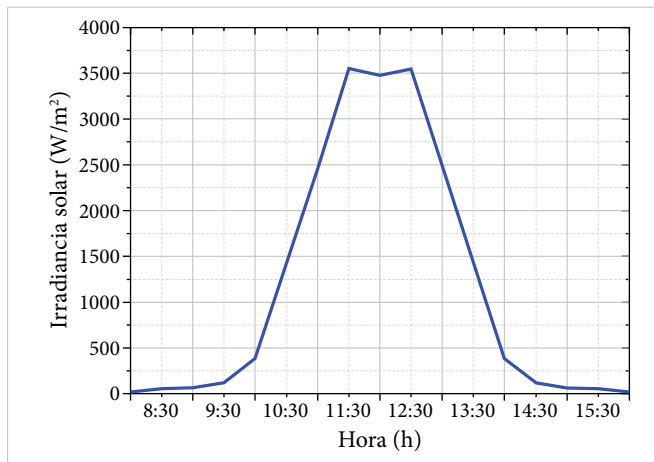


Figura 8. Curva de irradiancia solar en W/m² para el lapso de 8:00 a 16:00 horas.

Los resultados ofrecen una vista completa del comportamiento del sistema de concentración frente a la irradiancia solar y revelan a la vez patrones de concentración fundamentales para evaluar al sistema. La irradiancia solar proporciona información sobre el rendimiento del sistema de concentración refractivo-reflexivo en la captación y concentración de energía solar. Además, permiten comparar al sistema contra otros dispositivos similares bajo diferentes condiciones de iluminación, aportando información útil para la optimización futura de esta tecnología.

La evaluación de los sistemas de concentración solar, para una localidad geográfica específica, limita la comparación con sistemas solares usados en otras ubicaciones geográficas. Por ello, la comparación del sistema desarrollado en este estudio contra el de Luque-Zúñiga

et al. [15] se realizó usando los resultados reportados para los factores de concentración y la eficiencia lograda en condiciones de simulación. Note que ambos concentradores son de dimensiones diferentes y, en el desarrollado en este trabajo, se redujeron al máximo las imperfecciones en el interior del concentrador. Estas diferencias hacen que el prototipo desarrollado tenga una mayor concentración respecto al de Luque-Zúñiga et al. [15], lo cual se puede ver reflejado en la Figura 9. La eficiencia estimada para el primero resultó ser de 73.39 %, mientras que para el segundo se reportó de 69.36 %.

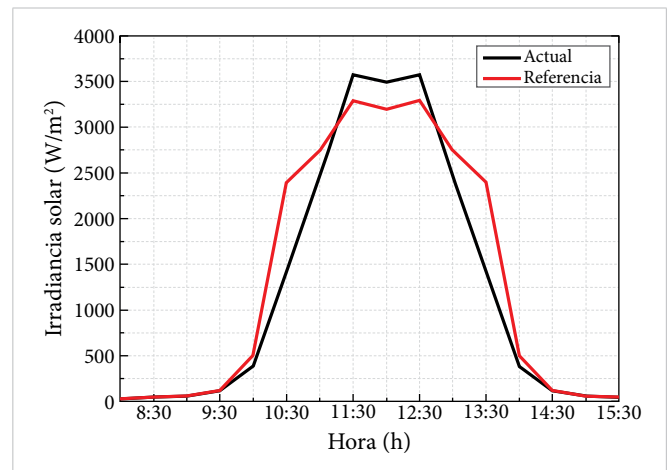


Figura 9. Comparación de la irradiancia solar estimada para el prototipo desarrollado contra la del prototipo de referencia.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la distribución de la concentración de luz alcanza su punto máximo en el centro del plano focal y disminuye gradualmente hacia los bordes. La eficiencia máxima estimada fue de 73.39 % en el punto focal central. Esta distribución de concentración es consistente con las expectativas y sugiere que el sistema desarrollado logra ser efectivo al concentrar la luz solar incidente. En comparación con el trabajo adoptado como referencia, se obtuvo un aumento de la eficiencia de 4.03 % aproximadamente. La eficiencia observada en condiciones controladas de iluminación sugiere un potencial uso en la captación eficiente y sostenible de energía solar en aplicaciones prácticas, por ejemplo, la concentración de calor para generar termoelectricidad. Sin embargo, es esencial reconocer que los resultados se obtuvieron en un entorno controlado de iluminación. Por tanto, es recomendable que se realicen otros experimentos en condiciones reales que incluyan factores relevantes como el clima. También, es necesario llevar a cabo pruebas adicionales en condi-

ciones más cercanas a la aplicación final para validar el rendimiento del sistema. Finalmente, este trabajo genera otras perspectivas para futuras investigaciones que estimen de forma cuantitativa la eficiencia del sistema ante las fluctuaciones y variaciones de la energía solar, según las condiciones climáticas.

REFERENCIAS

- [1] L. V. Kontrosh, V. S. Kalinovsky, A. V. Khramov y E. V. Kontrosh, "Estimation of the chemical materials volumes required for the post-growth technology manufacturing InGaP/GaAs/Ge with a concentrator and planar α -Si:H/Si solar cells for 1 MW solar power plants", *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, 2021, art. n.º 100186, doi: [10.1016/j.clet.2021.100186](https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100186).
- [2] X. Apaolaza-Pagoaga, A. Carrillo-Andrés, C. Rodrigues y F. Fernández-Hernández, "The effect of partial loads on the performance of a funnel solar cooker", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 219, parte C, 2023, art. n.º 119643, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119643](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119643).
- [3] A. K. Azad y S. Parvin, "Bibliometric analysis of photovoltaic thermal (PV/T) system: From citation mapping to research agenda", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2699-2711, 2022, doi: [10.1016/j.egy.2022.01.182](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.182).
- [4] H. Kaiyan, Z. Hongfei, T. Tao y X. Xiaodi, "Experimental investigation of high temperature congregating energy solar stove with sun light funnel", *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, n.º 12, pp. 3051-3055, 2009, doi: [10.1016/j.enconman.2009.08.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.009).
- [5] A. Menéndez-Velázquez et al., "Towards a luminescent solar concentrator with ultra-broadband absorption and spectral conversion for optimizing photovoltaic solar cell response: 'The photonic cannon shot'", *Optical Materials*, vol. 142, 2023, art. n.º 114005, doi: [10.1016/j.optmat.2023.114005](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114005).
- [6] A. H. Alami, A. Olabi, A. Mdallal, A. Rezk, A. Radwan, S. M. A. Rahman, S. K. Shah y M. A. Abdelkareem, "Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis", *Int. J. Thermofluids*, vol. 18, n.º 3, 2023, art. n.º 100340, doi: [10.1016/j.ijft.2023.100340](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100340).
- [7] H. Zheng, G. Wu, T. Tao, Y. Su y J. Dai, "Combination of a light funnel concentrator with a deflector for orientated sunlight transmission", *Energy Convers. Manag.*, vol. 88, pp. 785-793, 2014, doi: [10.1016/j.enconman.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.004).
- [8] A. Carrillo-Andrés, X. Apaolaza-Pagoaga, C. Rodrigues, E. Rodríguez-García y F. Fernández-Hernández, "Optical characterization of a funnel solar cooker with azimuthal sun tracking through ray-tracing simulation", *Solar Energy*, vol. 233, pp. 84-95, 2022, doi: [10.1016/j.solener.2021.12.027](https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.027).
- [9] G. Luque-Zuñiga, R. Vázquez-Medina, G. Ramos-López, H. Yee-Madeira y D. A. Pérez-Márquez, "Increase of solar harvest time with a double static concentration refractive-reflective system", *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2020, pp. 1-5, doi: [10.1109/ROPEC50909.2020.9258725](https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258725).
- [10] A. J. Grede, J. S. Price y N. C. Giebink, "Fundamental and practical limits of planar tracking solar concentrators", *Opt. Express*, vol. 24, n.º 26, pp. A1635, 2016, doi: [10.1364/OE.24.0A1635](https://doi.org/10.1364/OE.24.0A1635).
- [11] S. S. Salvi et al., "Technological advances to maximize solar collector energy output: a review", *J. Electron. Packag.*, vol. 140, n.º 4, 2018, doi: [10.1115/1.4041219](https://doi.org/10.1115/1.4041219).
- [12] A. Shahsavari y M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 275-291, 2018, doi: [10.1016/j.rser.2018.03.065](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065).
- [13] S. Gorjian et al., "A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors", *Energy Convers. Manag.*, vol. 222, 2020, art. n.º 113246, doi: [10.1016/j.rser.2018.03.065](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065).
- [14] F. Masood et al., "The compound parabolic concentrators for solar photovoltaic applications: Opportunities and challenges", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13558-13584, 2022, doi: [10.1016/j.egy.2022.10.018](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.018).
- [15] G. Luque-Zuñiga, R. Vázquez-Medina, G. Ramos-López, D. A. Pérez-Márquez y H. Yee-Madeira, "Simulation and Experimental Evaluation of a Refractive-Reflective Static Solar Concentrator", *Energies*, vol. 16, n.º 3, 2023, doi: [10.3390/en16031071](https://doi.org/10.3390/en16031071).
- [16] X. Xiaodi, Z. Hongfei, H. Kaiyan, C. Zhili, T. Tao y X. Guo, "Experimental study on a new solar boiling wa-

- ter system with holistic track solar funnel concentrator”, *Energy*, vol. 35, n.º 2, pp. 692-697, 2010, doi: [10.1016/j.energy.2009.10.033](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.033).
- [17] J. Li et al., “Thermodynamic investigation of spectral splitting hybrid system integrated Cassegrain concentrator and mid/low-temperature solar thermochemical storage”, *Renewable Energy*, vol. 217, 2023, art. n.º 119152, doi: [10.1016/j.renene.2023.119152](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119152).
- [18] D. Malacara, “Mathematical Representation of an Optical Surface and Its Characteristics”, en *Optical Shop Testing*, 3.ª ed., E. Malacara, ed. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007, cap. 18, pp. 832-851, doi: [10.1002/9780470135976.ch18](https://doi.org/10.1002/9780470135976.ch18).
- [19] Atmel Corporation, “8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash”, ficha técnica de ATmega328P, 2016 [Rev.: 7810D-AVR-01/15].
- [20] Vishay Intertechnology, “Silicon PIN Photodiode”, ficha técnica de BPW34 y BPW34S, 2024 [Rev.: 2.1, 23-ag.-11].
- [21] A. S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, 3.ª ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 1743-1744.
- [22] J. G. Webster y H. Eren, eds., *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement*, 2.ª ed. Boca Ratón: CRC Press, 2017.