

Artículo Original

Caracterización experimental de un concentrador solar Fresnel lineal

Experimental characterization of a linear Fresnel solar concentrator

*Pablo Dellicompagni¹, Santiago Gulino^{2,3}, Damián Perelló^{2,3},
Matías Trigo²

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina.

²Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA), Facultad de Ingeniería. Sgto. José León Gauto, Asunción, 001535, Paraguay.

³Centro de Innovación Tecnológica (CEINTEC). Paz del Chaco, Lambaré, 110708, Paraguay.

RESUMEN

Los concentradores solares lineales son una tecnología prometedora para la generación de energía térmica en el sector industrial. Estos sistemas pueden generar agua caliente o vapor, con temperaturas dentro de un amplio rango en función del proceso o demanda. En este trabajo se presenta el diseño, construcción, montaje y ensayo experimental de un concentrador Fresnel lineal de 1.44 m² de superficie de espejos. El equipo fue capaz de elevar la temperatura del agua a valores superiores a los 70 °C, para caudales inferiores a 1 l/min, desarrollando una potencia térmica de 2000 W. A su vez, el equipo ensayado desarrolló potencias superiores a los 5000 W para caudales elevados. Los resultados indican que los concentradores solares lineales son una tecnología viable para la generación de energía térmica en el sector industrial, y que la normalización o modularización en función de la capacidad de producción (l/m²día) permite proponer a esta tecnología como alternativa a los sistemas de calentamiento pasivo (calefones) disponibles en el mercado.

Palabras clave: energía solar, concentración solar, Fresnel lineal, generación térmica, agua caliente, caracterización hidrotérmica.

ABSTRACT

Linear solar concentrators are a promising technology for thermal energy generation in the industrial field. These systems can generate hot water or steam, with temperatures within a wide range depending on the process or demand. This work shows the design, construction, assembly, and experimental testing of a linear Fresnel concentrator with a collecting area of 1.44 m². The device was able to raise the temperature of water to values above 70 °C for flow rates below 1 l/min, developing a thermal power of 2000 W. Additionally, the concentrator developed thermal power output above 5000 W for higher flow rates. The results indicate that linear solar concentrators are a viable technology for the generation of thermal energy in the industrial field, and that standardization based on

*Autor correspondiente: Pablo Dellicompagni. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina. Email: pablodellicompagni@gmail.com; Santiago Gulino: santiqulino@gmail.com; Damián Perelló: dalperello@gmail.com; Matías Trigo: matias.a.trigo@gmail.com.

Fecha de recepción: enero 2024. Fecha de aceptación: febrero 2024



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons

production capacity ($\text{l/m}^2\text{day}$) allows this technology to be proposed as an alternative to passive heating systems (water heaters) available on the market.

Keywords: solar energy, solar concentration, linear Fresnel, thermal generation, water heating, hydrothermal characterization.

INTRODUCCIÓN

Los concentradores solares lineales son una tecnología ampliamente utilizada en la generación de energía solar térmica. Estos sistemas aprovechan la radiación solar concentrándola a través de sistemas reflectores en un receptor lineal situado a lo largo de un foco (Duffie y Beckman, 2013; Rabl, 1985). El receptor recibe la radiación solar concentrada y la convierte en calor a través del absorbedor, que puede utilizarse para generar electricidad, calentar agua o generar vapor para procesos industriales. Si bien la difusión de las tecnologías de concentración se realizó globalmente para generar electricidad en grandes escalas, en Sudamérica la tecnología Fresnel está siendo desarrollada y utilizada únicamente en las universidades, y no de forma comercial como en otros países (Gulino Godoy et al., 2020). Por otro lado, estas tecnologías comenzaron a encontrar un espacio de implementación vacante en el sector industrial con el aporte de energía térmica, ya sea a través de vapor o bien agua caliente (Beltagy, 2023; Aparicio et al., 2023). El aporte térmico en el sector industrial ha captado la atención de muchos investigadores y empresas en un contexto de transición energética hacia una matriz de generación-consumo predominantemente renovable y de reducción de costos, así como la disminución de la presión ambiental ante un escenario de calentamiento global drástico. Franco y Dellicompagni (2020) han desarrollado un concentrador cilíndro-parabólico de baja escala para implementarse en la industria hilandera-textil. El concentrador construido emplea como receptor-absorbedor un tubo de borosilicato al vacío combinado con un serpentín interior de cobre. Se logró generar agua caliente y vapor ($40\text{-}100^\circ\text{C}$) para caudales en un rango de $0.036\text{-}0.613$ l/min. Similar diseño de concentrador cilíndro-parabólico es el propuesto por Zima et al., (2020) cuyo absorbedor, en lugar de ser un serpentín, son dos conductos en U insertos en el tubo evacuado de manera ortogonal. Las simulaciones numéricas de este equipo predicen que es capaz de calentar agua a 55°C para una radiación incidente de 1000 W.

Otros autores optaron por sistemas de concentración solar Fresnel lineal para la generación de calor. Ghodbane et al. (2016a) diseñaron numéricamente un concentrador Fresnel con receptor trapecial y absorbedor de caños paralelos y validaron el modelo con mediciones experimentales. Este concentrador fue capaz de calentar agua a 80°C con una superficie de espejos de 1.65 m². Un estudio experimental más exhaustivo del mismo equipo lo realizan Ghodbane et al., (2016b), reportando eficiencias térmicas en torno al 29 % y temperaturas de estancamiento en el absorbedor alrededor de 100°C , con lo cual el estudio realizado sugiere que el equipo es capaz de generar vapor. Un sistema Fresnel, pero de foco puntual ha sido desarrollado por Oulhazzan et al. (2020), en el cual el absorbedor alcanza una temperatura de 255°C , haciendo uso de 90 espejos de 70 mm x 70 mm, conformando un área de colección solar de 2.83 m². Otro desarrollo, realizado por Babu et al., (2019) consiste en un concentrador Fresnel lineal en el que el ancho de los espejos es variable y el receptor es trapecial con absorbedor de tubos paralelos. El rango de temperatura logrado por este equipo es de $58 - 69^\circ\text{C}$, con un caudal másico de 0.025 kg/s (1.5 l/min). Además de aplicaciones para calentamiento de agua y eventual generación de vapor para procesos industriales, se encuentra en la literatura trabajos referidos al uso de sistemas Fresnel lineales para desalinización de agua (Navitski et al., 2023) como así para desecado de minerales, por ejemplo, fosfatos (Fadhel et al., 2023).

En este trabajo se muestran las etapas de diseño, construcción, montaje y ensayo experimental de un concentrador Fresnel lineal de 1.44 m^2 de superficie de espejos y receptor trapecial con absorbedor de 6 m de largo conformado en caño de acero sin costura. Las mediciones de magnitudes permiten la caracterización del equipo y la definición de la zona de trabajo en condiciones normales. Se determina que esta zona es aquella en la cual el concentrador eleva la temperatura del agua a valores superiores a los $70 \text{ }^\circ\text{C}$, para caudales inferiores a 1 l/min , desarrollando una potencia térmica de 2000 W . Adicionalmente, el concentrador desarrolla mayores potencias térmicas con mayores caudales, bajo condiciones de asoleamiento de día claro. Las mediciones de parámetros se realizaron con equipamiento electrónico de la firma Arduino, de bajo costo, pero con incertezas en la determinación de la potencia térmica no mayores al 1% en condiciones normales de operación.

MATERIALES Y METODOS

En las siguientes secciones se describe la metodología seguida para el diseño, construcción y ensayo del concentrador solar tipo Fresnel lineal prototipo.

Trazado de haces solares

Se empleó el software de uso libre denominado Geogebra® (<https://www.geogebra.org/>) para simular el trazado de haces incidentes en los espejos. La Figura 1 muestra el esquema de disposición de los espejos con respecto al absorbedor, ubicado a 1 metro de altura. Los haces solares (componente directa) inciden sobre los espejos y son redirigidos hacia el absorbedor. El trazado de rayos se realiza modificando el ángulo I de los haces solares, denominado perfil solar (Duffie and Beckam, 2013). Este perfil solar es la proyección del haz solar en el plano perpendicular a los ejes de los espejos y al eje del absorbedor a la vez, estando el concentrador Fresnel alineado con el eje Norte-Sur. Los puntos rojos corresponden a tutores empleados para modificar el perfil solar cada 20° , mientras que los puntos azules se emplean para modificar la inclinación de los espejos de manera individual, de tal manera que de los haces reflejados incidan en el absorbedor. Se observa en la Figura 1 que, de manera intencional, se posicionó el tutor del primer haz solar mostrándose que resulta necesario corregir la inclinación del primer espejo para redireccionar el haz reflejado hacia el absorbedor. Se obtiene así una relación entre el perfil solar y los ángulos de inclinación (β) de los espejos, como se indica en la Figura 2.

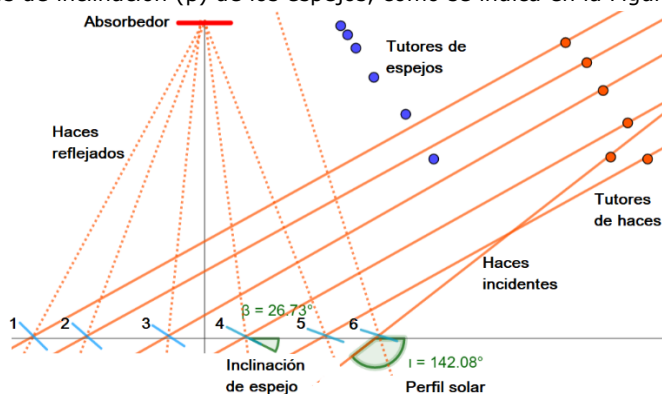


Figura 1: esquema de trazado de haces solares en Geogebra® para la obtención de ecuaciones de regresión entre el perfil solar I y el ángulo de inclinación de los espejos.

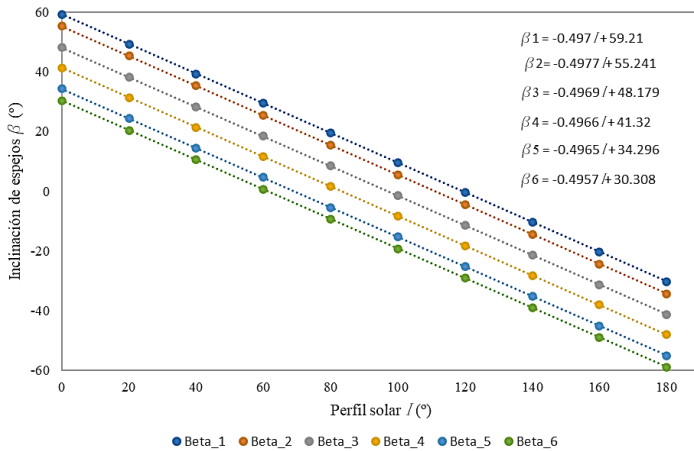


Figura 2: Relación entre el perfil solar I y el ángulo de inclinación de los espejos. Obtención de las ecuaciones de regresión.

La relación lineal entre ambas variables denota que la variación angular de la posición de los espejos es la misma para todos los espejos, conforme el sol desarrolla su trayectoria eclíptica. Las ecuaciones de regresión obtenidas se emplean para desarrollar el algoritmo de seguimiento solar de cada uno de los espejos.

Diseño del receptor

En cuanto al receptor, se trazó la geometría de la cavidad que aloja al absorbedor, considerando el diámetro y separación de los caños. El modelo geométrico sigue al propuesto por Flores Larsen et al. (2012) en el que la cavidad interior presenta una forma trapezoidal y los caños se alojan en la base menor del trapecio. La Figura 3a, b muestra la cavidad receptora y el absorbedor. Para formar la cavidad trapezoidal, se empleó acero inoxidable brillante de alta reflectancia $\rho=0.84$ (Echazú et al., 2000) y el cerramiento de esta se realizó con vidrio templado de 4 mm de espesor, cuya transmitancia solar espectral promedio es de $\tau=0.85$ (Dellicompagni, 2018). Los caños empleados para el absorbedor son de calibre Schedule N° 40 de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, revestidos con pintura negra mate de alta absorptancia $\alpha=0.90-0.95$ (Duffie and Beckman, 2013; Di Lalla et al., 2001). En el intersticio entre caños se colocaron superficies en V invertida, para lograr una segunda reflexión (puntos de incidencia en Figura 2a) de los haces solares y dirigirlos finalmente hacia los caños.

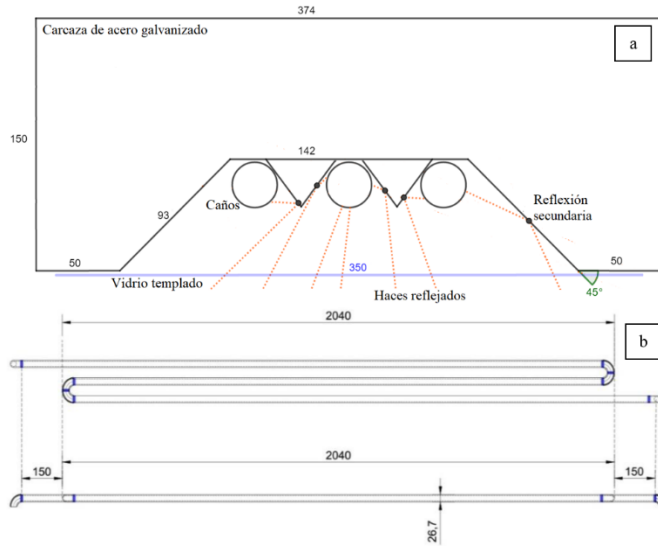


Figura 3: a. Esquema de la cavidad trapecoidal del receptor. Los haces solares inciden en los caños mediante la reflexión primaria (en los espejos) como la reflexión secundaria (cavidad trapecoidal y V invertidas entre caños). b. Desarrollo del absorbedor conformado por tres caños conectados en serie (vista en planta y lateral). Las dimensiones se muestran en milímetros, sin escala.

Fase constructiva y de montaje del receptor

Se procedió a construir el receptor siguiendo las medidas de los planos. El trabajo se encargó a empresas metalúrgicas que disponen de las maquinas herramientas necesarias para las tareas de plegado, soldadura, perforado, abulonado, entre otras. La Figura 4 muestra la secuencia de construcción del receptor. De forma paralela, se construyó el absorbedor empleando caños Schedule N° 40 de $\frac{3}{4}$ " de diámetro (Figura 4.a) y la estructura de soporte de este (Figura 4.b). La cavidad que aloja al absorbedor se construyó con chapa de acero pulida espejo, o brillante y se montó a la estructura de soporte mediante tornillos, en esta etapa también se colocaron las V invertidas. En Figura 4.d se observa la presentación del absorbedor en la cavidad para colocar los bulones de sujeción que soportan su peso, de manera que el absorbedor queda simplemente apoyado sobre planchuelas, al colocarse el receptor en su posición final. En Figura 4.e se observa el receptor montado, con la cavidad cerrada mediante vidrio templado de 4 mm de espesor. La hermeticidad de la cavidad se logró mediante sellos de silicona neutra y soportando el vidrio con perfiles L de aluminio anodizado. Entre los pasos d y e se colocó el aislante térmico en el interior de la carcasa envolvente, cómo así las tapas en los extremos del receptor, y un aislante adicional envuelto en papel aluminio, para evitar filtraciones desde el exterior (visibles en Figura 4.e).

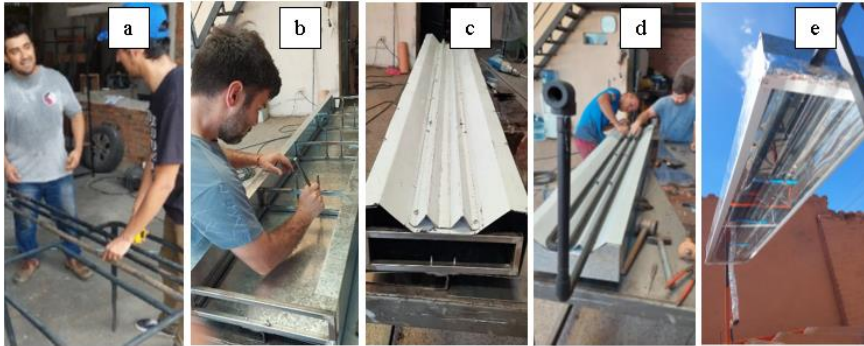


Figura 4: Secuencia de construcción y montaje del receptor. a. Construcción del absorbedor. b. Construcción de la carcasa envolvente y estructura de soporte del absorbedor. c. Construcción y montaje de la cavidad trapezoidal. d. Presentación del absorbedor en la cavidad y sujeción. e. Cerramiento de la cavidad y posterior montaje del receptor en estructura.

Concentrador solar Fresnel construido

El concentrador se muestra en la Figura 5, de forma completa habiendo integrado el receptor a la estructura que soporta los espejos, mediante un pórtico en forma de C invertida. El circuito hidráulico se integra al ingreso y egreso del fluido, donde se incorporaron las termocuplas de medición de temperatura y el caudalímetro. El abastecimiento de agua se realiza mediante la red corriente. Se emplearon dos gabinetes herméticos, uno donde se aloja el sistema electrónico de potencia para alimentar los motores paso a paso de seguimiento solar, y otro de menores dimensiones donde se aloja el sistema de adquisición de datos. El cableado de los sensores se realizó mediante cables tipo UTP de cuatro pares trenzados. El sistema de concentración cuenta con seis filas de espejos reflectores se adheridos a sus respectivas estructuras rotantes mediante silicona neutra. Cada uno de ellos es de 3 mm de espesor y sus dimensiones son 2 m de largo por 0.12 m de ancho, por lo que se tiene un área de captación solar de 1.44 m^2 , lo que le confiere al equipo una razón de concentración geométrica de 2.86, si se considera que solamente la mitad de la superficie externa caño absorbedor es alcanzado por los haces solares.



Figura 5: Receptor acoplado a la estructura de concentración solar mediante un pórtico. Se observa la entrada de agua fría y la salida de agua caliente/vapor, como así el gabinete de control de seguimiento solar y toma y adquisición de datos mediante sensores.

El centro de rotación de cada fila de espejos se encuentra solidaria a motores paso a paso individuales, modelo NEMA 17, cada uno con su correspondiente controlador TB6600 y abastecidos por una fuente de tensión continua de 24V – 10A. Se emplea una placa Arduino MEGA para el control de la posición de los espejos y el seguimiento solar. Las señales de los sensores de temperatura y caudal se colectan con una placa Arduino UNO y las mediciones se almacenan en una tarjeta microSD. El algoritmo de seguimiento emplea las ecuaciones de geometría solar relacionando el perfil solar y la inclinación necesaria de los espejos (descriptos en la sección *Trazado de haces solares*) correspondiente a cada hora de cada día en el que se opera el equipo, para una alineación de espejos Norte-Sur (Duffie and Beckman, 2013).

Descripción del instrumental de medición

En la Tabla 1 se muestran las variables medidas durante los ensayos de operación del concentrador solar, y los sensores empleados. Las señales generadas por los diferentes sensores se procesaron mediante una placa Arduino UNO, empleando un solo cuerpo de algoritmo que alberga los scripts individuales para cada sensor y sus correspondientes librerías. La transmisión de las señales se efectuó mediante cables UTP de 8 hilos de cobre sólido de 0.57 mm de diámetro.

Tabla 1. Descripción de instrumental de medición empleado.

Magnitud	Instrumento	Rango	Incerteza
Caudal máxico	Caudalímetro YSF-401 Arduino	0.3/6 l/min	10 ⁻³ l/min
Temperatura de entrada	Termocupla Max6675 Arduino	0/800 °C	10 ⁻² °C
Temperatura de salida	Termocupla DS18B20 Arduino	-55/125 °C	10 ⁻² °C
Temperatura ambiente	Sensor DHT22 Arduino	-40/80 °C	10 ⁻¹ °C
Humedad relativa de ambiente	Sensor DHT22 Arduino	0/100 %HR	10 ⁻¹ %HR

De la medición directa de las magnitudes descriptas en Tabla 1, se determina la potencia térmica según la Ecuación 1 y su correspondiente error relativo porcentual con la Ecuación 2.

$$P_t = \frac{\dot{m}}{60} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$e_{P_t, \%} = 100 \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} + \frac{\Delta T_{out}}{T_{out}} + \frac{\Delta T_{in}}{T_{in}} \right) \quad (2)$$

Donde \dot{m} , C_p , T_{out} y T_{in} son el caudal máxico de agua circulante, en l/min, el calor específico del agua establecido en un valor constante de 4186 J/kg°C, la temperatura de salida en °C y la temperatura de entrada en °C, respectivamente. Las magnitudes con Δ son las incertezas o el error cometido en la medición directa de cada una de ellas, indicadas en la Tabla 1.

Se realizaron mediciones con el concentrador alineado según el eje Norte-Sur. El caudal de agua se abasteció directamente de la red, regulando el mismo mediante válvulas esféricas dentro del rango de trabajo del caudalímetro. El sensor de temperatura de agua de entrada se colocó entre el ingreso al absorbedor y el caudalímetro. El sensor de temperatura de salida se instaló anterior a la válvula de salida. El sensor higrotérmico ambiental se montó de manera hermética contigua al gabinete que contiene al sistema de adquisición de datos. En figura 6 se muestran los sensores mencionados y su respectiva instalación.



Figura 6: Disposición de sensores. a. Termocupla Max6675, b. Termocupla DS18B20. c. Caudalímetro YSF-401, d. Sensor termohigrómetro DHT22. Todos los sensores son Arduino.

RESULTADOS

Se llevaron a cabo ensayos de caracterización bajo condiciones reales de funcionamiento, para los días 26/12/23 y 3/1/24. Se empleó una frecuencia de muestreo de 5 s en promedio para todos los sensores. Como se mencionó, el concentrador se alineó según el eje Norte-Sur y el caudal de agua de ingreso se reguló mediante dos válvulas esféricas. No obstante, se observaron variaciones en los registros de caudal, dado que la instalación de agua abastece otros usos domiciliarios, además de la dependencia del caudal con la presión de la red. En la Figura 7 se observa el registro de temperaturas y de la potencia térmica determinada según Ec. 1. Se observa que el sistema concentrador supera los 70 °C de temperatura en la salida, logrando una potencia térmica nominal del orden de 2000 W, para caudales normales o bajos. Las variaciones en la potencia térmica y el registro de picos elevados se deben principalmente a las variaciones instantáneas de caudal másico de agua, para condiciones de cielo claro o poco nublado. Los valores nulos de potencia se deben a que el caudal másico presentó valores por debajo del mínimo detectable del caudalímetro (0.3 l/min). La relación entre la potencia térmica desarrollada y el caudal másico se observa en la Figura 8. Se logra identificar una región de trabajo óptimo en el rango de 0-1 l/min de caudal, para desarrollar una potencia térmica hasta 2000 W y una temperatura de salida del rango de 75-80 °C. Para caudales superiores a 1 l/min, el concentrador desarrollado permite desarrollar mayores potencias, pero con

menor certeza debido a la mayor dispersión mostrada en la Figura 8. Dicha dispersión se asocia a las condiciones climáticas o de nubosidad de cielo lo cual disminuye el recurso solar (Figura 9) y a las variaciones instantáneas de caudal. Para el día 26/12/23 se registraron descensos acentuados en la temperatura de salida en correlación con la presencia de nubes pasantes. Para el día 3/1/24 se logró un perfil de temperatura de salida más estable, siendo la dispersión lograda netamente asociable a las variaciones de caudal másico.

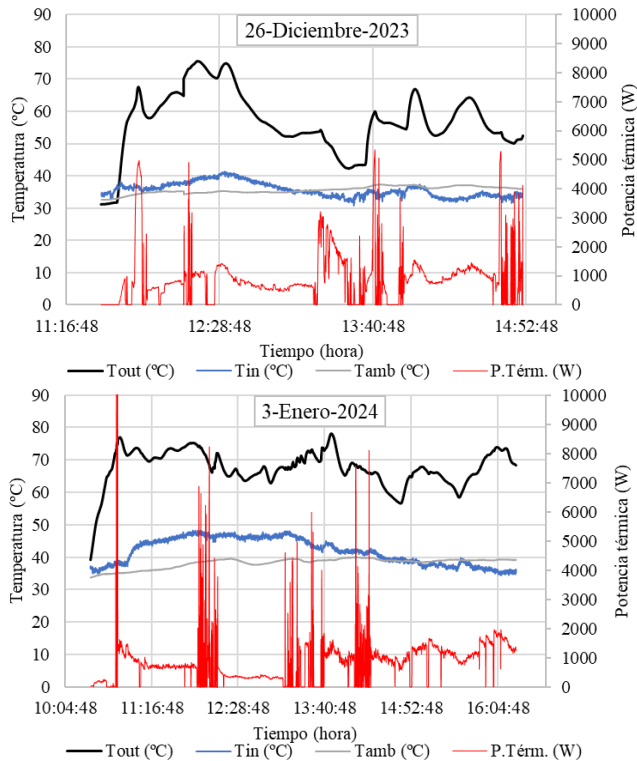


Figura 7: Registros de temperaturas y determinación de la potencia térmica de salida.

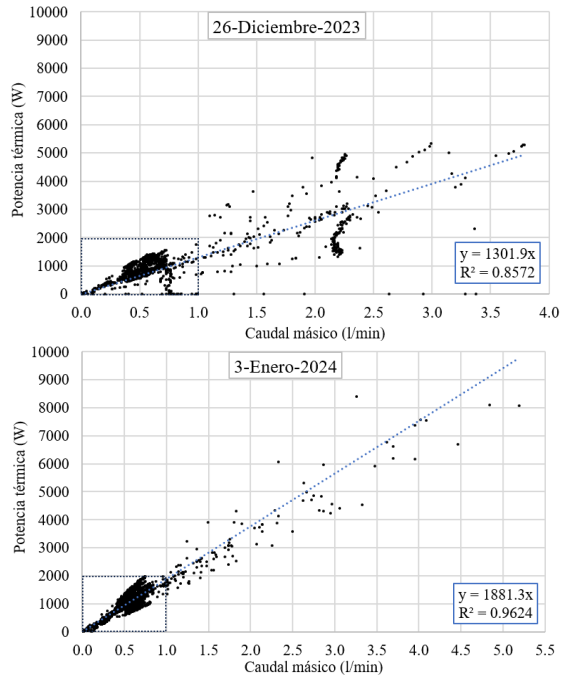


Figura 8: Relación entre potencia térmica desarrollada y caudal másico de agua. Se destaca en recuadro a trazos la zona de operación nominal del concentrador.

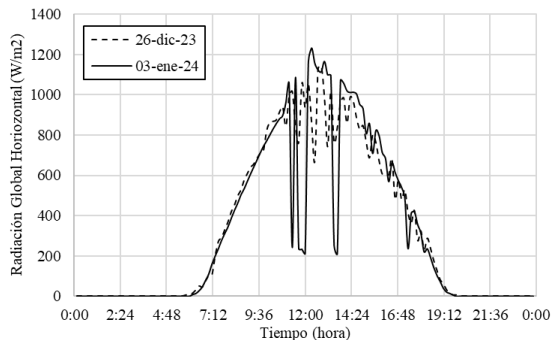


Figura 9: Radiación global sobre plano horizontal. Datos provistos por la Dirección de Meteorología e Hidrología, Asunción. Central automática Fecoprod.

Otra característica del concentrador solar a estudiar es la inercia térmica que posee el absorbente en los momentos en los que la radiación solar disminuye súbitamente por el paso de nubes. De los ensayos realizados, se contrasta el salto térmico del fluido al pasar por el absorbente ante condiciones variables tanto de radiación solar como de caudal másico. En la Figura 10 se observa que el salto térmico ($T_{out} - T_{in}$) se vio fuertemente reducido para el primer día de mediciones, y esto se debe principalmente al paso de nubes combinado con oscilaciones de

caudal hasta valores del orden de 4 l/min, lográndose un salto térmico inferior de 10 °C alrededor de las 13:26 horas. En el segundo día de ensayos, se observó un salto térmico bastante sostenido en el rango de 15-35 °C con muy baja fluctuación en los momentos cuando se registraron oscilaciones en el caudal, en el rango de 3-4 l/min. Este comportamiento da cuenta de una buena inercia térmica provista por el caño de acero de pared gruesa Schedule N° 40, al cerramiento de la cavidad con el vidrio templado y al aislante térmico del receptor, cuando ocurren variaciones repentinas en el caudal.

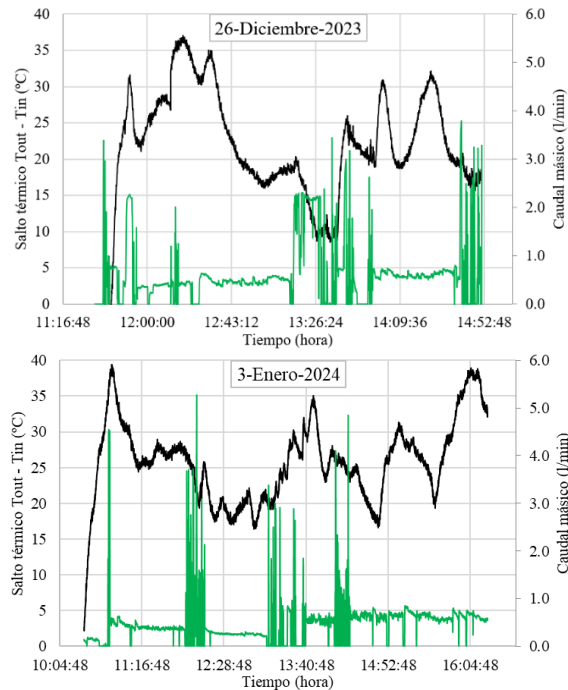


Figura 10: Variación del salto térmico para condiciones de variabilidad de caudal y paso de nubes.

En cuanto al volumen de agua caliente, se produjeron 120 l para el primer día de mediciones en 3.5 horas, y 160 l en el segundo día en 6 horas, como se muestra en la Figura 11. Estos valores de volumen de agua caliente indican que, si bien el equipo no generó vapor (dada su baja razón de concentración geométrica), tiene potencial aplicación en procesos que demande agua caliente o bien para el abastecimiento de agua caliente sanitaria. En este último caso, si se considera que un usuario consume 30 l diarios de agua caliente, el concentrador podría abastecer a 4-5 personas diariamente con condiciones de cielo claro.

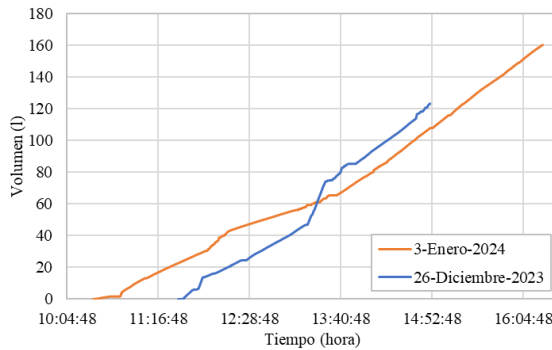


Figura 11: Volumen de agua caliente producido. Se observa un rango de producción de 120-160 l de agua caliente, pudiendo variar en función del caudal másico circulante y la radiación solar disponible.

La confiabilidad sobre las mediciones efectuadas se basa fuertemente en el error cometido. El resultado de la propagación del error (Ec. 2) para la determinación de la potencia térmica a la cual el equipo trabajó en los días ensayados se muestra en las Figuras 12 y 13. Se observa que el mayor error porcentual cometido se produce en aquellos momentos en los que la variación de caudal se manifiesta de forma repentina, alcanzando valores cercanos al 8.5 %. No obstante, el error se ve acotado a valores próximos al 0.5 %, llegando al 1 % en algunos casos, cuando el concentrador funciona en condiciones normales. Se observa en Figura 13, que mientras mayor sea la potencia térmica desarrollada, menor será el error relativo porcentual en la determinación de dicha magnitud.

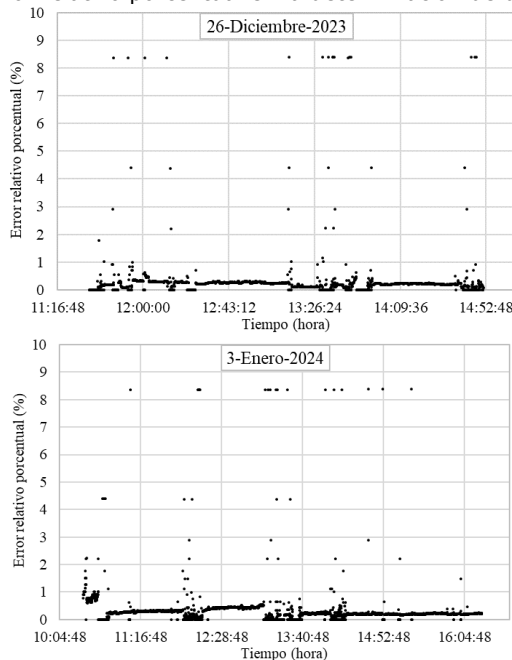


Figura 12: Error relativo porcentual de la potencia térmica, para los días de ensayos.

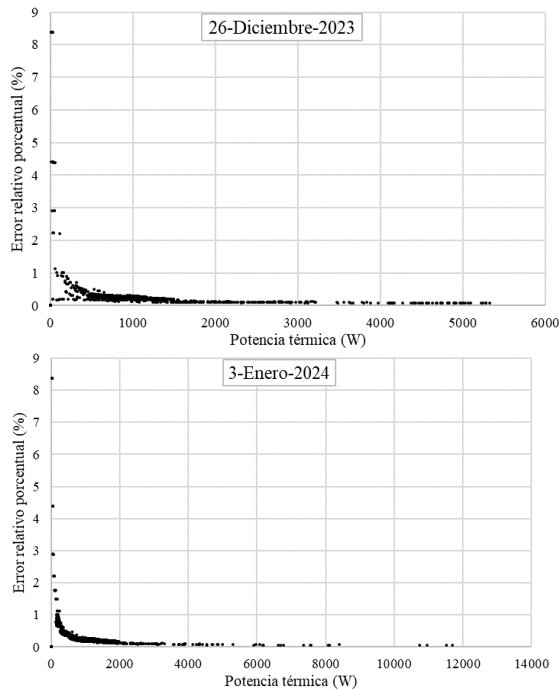


Figura 13: Error relativo porcentual, en función de la potencia térmica.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados a los que se arriban en este trabajo son comparables con aquellos expuestos por diferentes autores, considerando la escala de los prototipos desarrollados, el fluido térmico empleado (agua) y el diseño de la cavidad receptora. En la Tabla 2 se presenta una comparación entre trabajos encontrados en la literatura y el aquí presentado. La mayoría de los resultados se enfocan en la temperatura que alcanzan los distintos sistemas en el fluido caloportador cómo principal magnitud de referencia. No obstante, resulta de interés también hacer énfasis en la potencia térmica que estas tecnologías logran desarrollar, y de allí la determinación de la energía almacenable para su posterior uso.

Tabla 2: comparativa entre tecnologías y resultados con otros autores.

Autor	Tecnología	Receptor	Área de espejos (m ²)	Caudal de trabajo (l/min)	Temperatura (°C)	Potencia térmica (W)
Ghodbane et al. (2016a, b)	Fresnel lineal	Trapezoidal con tubos paralelos	1.65	0.9	80-100	-
Oulhazzan et al. (2020)	Fresnel puntual	Rectangular con serpentín	2.83	-	255 (absorbedor)	-
Babu et al., (2019)	Fresnel lineal	Trapezoidal con tubos paralelos	2 (variable)	1.5	58 - 69	-
Presente	Fresnel lineal	Trapezoidal con tubos paralelos	1.44	0-1 (1-4.5)	60-80	2000 (≥5000)

El sistema Fresnel aquí desarrollado presenta la ventaja con respecto a otros diseños de que, para una menor área de espejos, se logran temperaturas comparables y superiores en algunos casos. La obtención de agua caliente se presenta como una solución energética ante un amplio abanico de demanda tanto en el sector industrial como en el residencial o domiciliario. Haciendo una primera estimación normalizada en términos de superficie de espejos, el equipo aquí presentado posee una capacidad de producción de agua caliente de 80-110 l/m²día en función de las condiciones de asoleamiento. Este valor normalizado permitiría realizar una comparación directa con equipos de calentamiento de agua pasivos (colectores solares, comúnmente denominados calefones solares) dependiendo de la demanda necesaria para el diseño de instalaciones. Luego, resta determinar los costos de instalación, operación y mantenimiento cómo así la tasa de recupero de la inversión y el retorno de ganancias, estudio supeditado a trabajo futuro.

En este trabajo se mostraron las distintas etapas de diseño, construcción, montaje y ensayo de caracterización de un concentrador Fresnel lineal. Mediante el software Geogebra® se ha realizado el trazado de rayos para el diseño de la cavidad del receptor, como así la determinación de dependencia entre la inclinación de los espejos y el perfil solar. El diseño del receptor se realizó en base a experiencias anteriores de otros autores, quedando conformada la cavidad de forma trapecial y la envolvente rectangular. La distribución de los caños del absorbedor configura una longitud de 6 m en tres líneas paralelas, lo que permite una mejor ganancia solar dentro de la cavidad mientras el agua circula por el absorbedor. El cerramiento del receptor se realizó con vidrio templado.

Se realizaron ensayos bajo condiciones meteorológicas reales, en dos días diferentes. De los resultados, se observa que el concentrador calienta el agua a valores superiores a los 70 °C cuando se presenta cielo sin nubosidad y el caudal de agua se mantiene en valores inferiores a 1 l/min. Esto define una zona de trabajo en la que el concentrador desarrolla una potencia térmica cercana a los 2000 W. No obstante, para caudales mayores (del orden de 3-4.5 l/min) la potencia plausible de desarrollar supera los 5000 W. La variación repentina de caudal supone en la mayoría de los casos el descenso de la temperatura del agua de salida. En el caso aquí ensayado, se analizó el salto térmico del agua circulante, registrándose una buena estabilidad dentro de un margen aceptable de variación térmica, para cuando el caudal presentó variaciones repentinas. De la caracterización del equipo, se denota además que es posible almacenar entre 120 l y 160 l de agua caliente por día, para su posterior uso. Finalmente, el error cometido en la determinación de la potencia térmica ronda el 1% en condiciones normales de operación, con picos del 8 % ante situaciones de funcionamiento anómalas dadas por eventual nubosidad o variación brusca del caudal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA), las Dras. Inocencia Peralta y Graciela Velázquez por el soporte institucional para el desarrollo del proyecto. Al Centro de Innovación Tecnológica (CEINTEC) de la empresa INTEC Ingeniería S.A.E. por la disposición de herramientas, espacio y personal para realizar la construcción y los ensayos de caracterización del equipo.

Contribución de autores: PD.: Diseño, construcción y montaje del receptor, absorbedor y sistema de mediciones y adquisición de datos. Ensayos de caracterización y procesamiento de datos medidos. Análisis e interpretación de datos, redacción del manuscrito, revisión crítica del manuscrito y aprobación de su versión final. SG: Diseño y construcción del sistema de concentración. Diseño, construcción y montaje del receptor y absorbedor. Ensayos de caracterización y procesamiento de datos medidos. Confección de manuscrito, revisión crítica del manuscrito y aprobación de su versión final. DP: Diseño y construcción del sistema de concentración. Diseño, construcción y montaje del receptor y absorbedor. Programación de los adquirentes de datos. Ensayos de caracterización. Confección de manuscrito. MT: Diseño y construcción del sistema de concentración. Montaje de receptor. Programación de los adquirentes de datos. Ensayos de caracterización. Confección de manuscrito.

Conflictos de interés: No existe conflicto de interés de ninguna de las partes por la publicación de este artículo.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del programa PROCENCIA II, año 2023, mediante contrato N° 15/2023 – BINVO2-120. La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT.

Editora responsable: Graciela María Patricia Velázquez de Saldivar. Universidad del Cono Sur de las Américas, UCSA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, H., Dellicomagni, P., Cadena, C. (2023). Software para el estudio del desempeño térmico de sistemas de concentración solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. (Artículo en prensa, aceptado para su publicación en octubre de 2023).
- Beltagy, H. (2023). A secondary reflector geometry optimization of a Fresnel type solar concentrator. *Energy Conversion and Management*, 284, 116974.
- Dellicomagni, P. (2018). Diseño, construcción y ensayo de la etapa de generación eléctrica con un sistema solar térmico. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina.
- Di Lalla, N., Tarulla, R., Echazú, R. (2001). Películas selectivas de Cr₂O₃ negro para absorbedores fototérmicos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 5, ISSN 0329-5184.
- Duffie, J., Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Fadhel, A., Eddhibi, F., Charfi, K., Balghouthi, M. (2023). Investigation of a Linear Fresnel solar collector (LFSC) prototype for phosphate drying. *Energy Nexus*. 10, 100188.
- Flores Larsen, S., Altamirano, A., Hernández, A. (2012). Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator. *Renewable Energy*, Volume 39, Issue 1, 198-206.
- Franco, J., Dellicomagni, P. (2020). Concentrador solar cilindro-parabólico de bajo costo, para la provisión de energía térmica para pequeña y mediana industria. XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Ibero-americano de Energía Solar. Portugal, Lisboa. 5 de Noviembre de 2020 (online).
- Ghodbane, M., Boumeddane, B, Said, N. (2016a). A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water: Theoretical and experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 176-186.
- Ghodbane, M., Boumeddane, B, Said, N. (2016b). Design and experimental study of a solar system for heating water utilizing a linear Fresnel reflector. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 8 (3), 804-825.

- Gulino Godoy, S. V., Rodas, J., Gregor, R. (2020). Linear Fresnel Concentrator: A Review of its Implementation in South American Countries. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA), Montevideo, Uruguay, pp. 1-6.
- Navitski, P., Izzatillaev, J., Al Dor, A. A. T., Esley, I. S., Merheb, J., Oliveira, L, Sallam, K. A. (2023). Utilization of solar energy for water desalination and purification using solar concentrator. E3S Web of Conferences. 434, 01043.
- Oulhazzan, M., Saifaoui, D., Ettami, S., Lilane, A. (2020). Design and development of small-scale linear Fresnel solar concentrator for medium temperature applications. Materials Today: Proceedings 30, 1013–1020.
- Rabl, A. (1985). Active Solar Collectors and Their Applications. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University. New York, Oxford. OXFORD UNIVERSITY PRESS.