

CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO DE MEDIANA ENTALPÍA: ENSAYOS DE OPERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

Dellicompagni P.; Franco J.; Aparicio H.; Linares, J. F.

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina.
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389 – e-mails: pablodellicompagni@gmail.com

Recibido 08/03/2024; Aceptado 30/06/2024

RESUMEN.- En el presente trabajo se muestran los resultados de la caracterización experimental de un concentrador solar cilindro parabólico para la generación de calor. Se muestran las fases de diseño, constructivas y los resultados de las mediciones de las variables de entrada y salida. El concentrador aquí expuesto se construyó con financiamiento de un proyecto de investigación tipo PICT. Se determinó que el equipo es capaz de generar vapor de agua a 120 °C con una potencia térmica de salida de 8000 W máximo, para caudales en el orden de 1.2 l/minuto. Tanto el proyecto marco, como el equipo propiamente dicho y los resultados se alinean a los presentes paradigmas de transición energética en los que el reemplazo -al menos parcial- de las fuentes de aprovechamiento termo energético basadas en combustibles convencionales aportan de manera directa a la mitigación de las causas del calentamiento global y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados experimentales se contrastan con modelos comerciales de concentradores de mediana potencia, encontrando así similitudes en cuanto a eficiencias y potencia térmica plausible de obtener, dentro del rango de temperaturas acotadas por procesos industriales. El concentrador desarrollado sirve como fuente de calor para futuros proyectos que demanden abastecimiento térmico de baja entalpía.

Palabras clave: Concentrador solar, caracterización experimental, potencia térmica, calor de procesos

MEDIUM-ENTHALPY PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTOR: OPERATION AND CHARACTERIZATION TESTS

ABSTRACT.- This article presents the experimental characterization process of a parabolic trough solar concentrator for heat generation. The design and construction phases, and the results of the input and output variable measurements are shown. The concentrator presented here was built with funding from a PICT research project. It was determined that the concentrator can generate steam at 120°C, with a maximum thermal power output of 8000 W, for mass-flow rates in the order of 1.2 l/minute. The framework project, the equipment itself, and the results are aligned with the current energy transition paradigms in which the replacement -at least partial- of conventional fuel-based thermo-energy sources contributes directly to the mitigation of global warming and the reduction of greenhouse gas emissions. The experimental results are contrasted with commercial models of medium-power concentrators, finding similarities in terms of efficiencies and plausible thermal power to be obtained, within the temperature range necessary in industrial processes. The developed concentrator plays a role as a heat source for future projects that demand low-enthalpy thermal supply.

Keywords: Solar concentrator, experimental characterization, power thermal output, heat for processes.

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética (TE) se define como aquel proceso dinámico o cuasi estático de reemplazo de las fuentes energéticas desde un esquema convencional a otro no convencional, o predominantemente no convencional, surgido por la toma de decisiones de actores políticos, sociales, públicos y privados (Svampa y Bertinat, 2022; Bertinat et al., 2020). Otra definición de la TE se relaciona con la mejora en la eficiencia de las tecnologías de aprovechamiento y transformación energética, independientemente de que estas fuentes sean convencionales o no convencionales, que permiten el ahorro energético o bien hacer uso reducido de las fuentes de energía logrando los mismos o mejores resultados (Garrido, 2022).

Además, la propuesta de TE cómo uno de los vectores hacia la descarbonización tiene su alcance a diferentes ámbitos, como ser la agenda política global de los Estados, organismos institucionales, centros de investigación científica, industrias e inclusive los medios de comunicación (González et al., 2023). Haciendo énfasis en el sector industrial, los índices globales (IEA, 2024) denotan que el 74 % de la matriz de consumo corresponde a la demanda de energía térmica, y que el 30 % de ese calor se requieren en procesos que ocurren a temperaturas por debajo de los 150 °C. Dentro de estos procesos se pueden mencionar a la pasteurización, esterilización, limpieza, secado, cocción, lavado, decapado, blanqueado, teñido, entre otros. Esto representa un importante potencial de descarbonización del sector industrial, sumado a que además de los proce-

Los mencionados, existen otros que ocurren hasta 400 °C. En este contexto, el Instituto de Tecnologías Sustentables (AEE INTEC, 2023) ha relevado más de 70 proveedores alrededor del mundo que planifican, financian, instalan y operan sistemas de abastecimiento de calor solar-térmico. A la actualidad, se documentan 494 sistemas termosolares a nivel mundial, con una superficie total de captación de 1072000 m² y una capacidad instalada de 856 MWth (Solar Thermal World, 2023). Entre los proveedores de sistemas térmicos para procesos industriales, en particular de concentración solar, se destacan dos: Solatom y Absolicom. El primero de ellos provee sistemas cilindroparábolicos (<https://www.absolicom.com/es/>), mientras que el segundo desarrolla tecnología Fresnel lineal (<https://solatom.com/>), pudiendo alcanzar temperaturas de 160 °C y 180 °C, respectivamente. Ambas tecnologías se presentan en el mercado de manera modularizada, de tal forma que con configuraciones serie/paralelo se pueden lograr diferentes ofertas energéticas para procesos térmicos. No obstante, si bien el desarrollo de tecnologías solares de concentración para aplicaciones industriales ha logrado avanzar hacia modelos construidos y funcionales, estas tecnologías solo están disponibles en el mercado bajo patentes privadas. Resulta necesario continuar con la investigación científica y desarrollo de las tecnologías de concentración, en un contexto regional y local. En este sentido, en este trabajo se muestran los resultados de desarrollo y experimentación de un sistema de concentración solar del tipo cilindroparábolicos en el marco de un proyecto de investigación tipo PICT N° 2019-01729. El equipo ensayado posee una longitud de 6 m por 2.2 m de apertura, con un área de captación solar de 11 m², capaz de generar vapor de agua a 120 °C y 2.4 bar de presión. La potencia térmica pico ronda entre 6000 W y 8000 W, para caudales entre 1 l/minuto y 1.2 l/minuto. En función del recurso solar y el caudal másico, los resultados indican que el equipo opera con una eficiencia solar-térmica en el rango de 50 % y 60 % promedio, alcanzando picos de hasta 75 %.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

En las siguientes secciones se describe la metodología abordada para el diseño, construcción y ensayo del concentrador cilindroparábolicos, como así las ecuaciones empleadas para el seguimiento solar, la determinación del rendimiento solar-térmico del mismo y el error cometido en la caracterización de la potencia térmica.

2.1. Diseño del reflector

El perfil parabólico de la superficie reflectora (Figura. 1) se conformó mediante el software Geogebra®, de libre acceso y de fácil uso. El trayecto parabólico delimitado por los puntos E y D corresponden a la zona de apertura o bien de colección solar dado por las dimensiones transversales de las chapas reflectivas a empleadas. Tal delimitación permite conferirle a la parábola dos lados menores de 1.1 m cada uno (distancias DC' y C'E). En consecuencia, como el diseño contempla el uso de dos planchas metálicas de 1.25 m x 2.5 m, y el concentrador consta de dos módulos colectores, el área de apertura será $A_p = 2.2 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 11 \text{ m}^2$. La distancia focal resulta en $C'F = 0.55 \text{ m}$, coincidente con la línea imaginaria que une D con E. Esto le confiere al equipo un cierto grado de modularidad compacta dado que evita una apertura excesiva tendiente a focos elevados como así una apertura baja con un foco cercano al vértice. En otras palabras, la apertura lograda con este diseño se considera adecuada.

El software Geogebra® permite obtener la ecuación $y=f(x)$ del perfil parabólico, a partir del cual se diseñó la estructura de soporte de la superficie reflectiva, la determinación de las longitudes de las

planchuelas metálicas y el posterior conformado de las costillas en taller (Figura. 2).

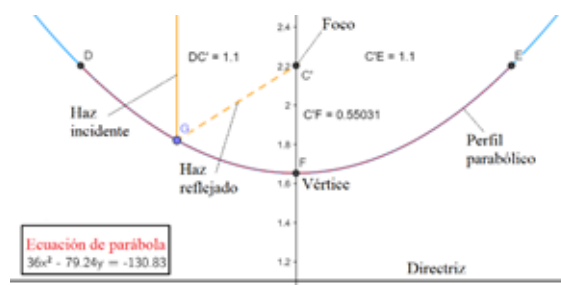


Fig 1. Perfil parabólico de la superficie reflectora, construido en Geogebra®.



Fig 2. Izq. Confección de soporte para superficie reflectora (costillas). Der. Set de costillas para un módulo de 5.5 m².

La estructura de montaje final se muestra en la figura 3. Se observan los dos módulos concentradores en la etapa previa al montaje de absorbedor y alineado de módulos.



Fig 3. Estructura de soporte de superficies reflectoras de ambos módulos, ancladas al suelo mediante ejes de rotación y rodamientos.

2.2. Diseño del absorbedor

El absorbedor consiste en un caño estructural redondo de 1/2" de diámetro nominal con un recubrimiento superficial de pintura negra mate de alta temperatura. Dicho caño se aloja en el interior de una cubierta cilíndrica de vidrio - borosilicato de 100 mm de diámetro y 1.25 m de largo. Se emplearon cuatro cubiertas para cubrir la longitud del absorbedor (6 m), dejando tramos sin cubrir como ser la entrada, la salida y la comunicación entre módulos, pero con aislación térmica de lana de vidrio. La figura 4 muestra parte del proceso de montaje de las cubiertas de vidrio, previo a

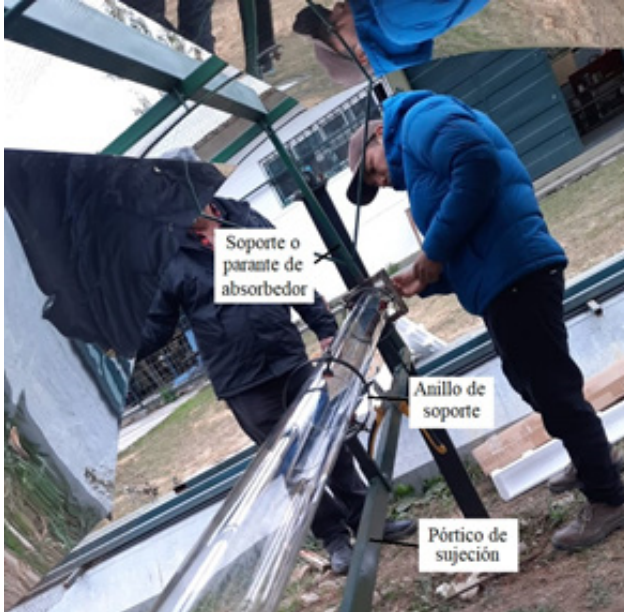


Fig. 4. Montaje de cubiertas de borosilicato, previo al montaje del caño absorbedor.

la inserción del caño absorbedor en su interior.

Si bien no se ha empleado software alguno para diseñar el absorbedor y su cubierta, se eligieron materiales disponibles en el mercado, a sabiendas que entre el caño absorbedor y la pared interior de la cubierta de vidrio habrá aire. No obstante, lograr que el caño metálico no esté en contacto directo con la atmósfera evita que la temperatura de este no se reduzca a valores muy por debajo del necesario. Este efecto de pérdidas excesivas por convección atmosférica se observó en Dellicompagni (2019) en ensayos de un cabezal trapezoidal prototipo, representativo de un sistema concentrador Fresnel lineal, con y sin cubierta en la cavidad del absorbedor.

De modo de sujetar la cubierta de vidrio, se adaptaron pórticos de sujeción transversales a cada uno de los módulos concentradores mediante parantes en los extremos. Luego, tomando dichos pórticos como base, se montaron anillos metálicos con almohadillas de silicona de alta temperatura de profundidad regulable, con el fin de lograr la concetricidad entre cuerpos de cubierta contiguas y entre éstas y el caño absorbedor. Los extremos libres se sellaron con papel aluminio, con el objeto de evitar corrientes de aire y suciedad en el interior.

2.3. Descripción del sistema de seguimiento

La orientación del concentrador (específicamente del eje de rotación) es Este-Oeste, es decir, el seguimiento solar se realiza variando solamente la inclinación del equipo conforme el movimiento aparente del sol se produce a lo largo del día. En este sentido, resulta necesario conocer el perfil solar sobre el plano Norte-Cénit-Sur, que no es más que la proyección del vector unitario representativo del haz solar en dicho plano. Para lograr el seguimiento solar, es necesario que el vector normal al plano de apertura de colección sea colineal al perfil solar. Siguiendo el planteo vectorial de Hongn (2017), la figura 5 muestra las componentes vectoriales del haz solar sobre el eje cenital y el eje Norte. La altura solar α varía conforme transcurre el día, así como también lo hace el ángulo acimutal del sol γ . En ángulo del perfil solar α_p es aquel comprendido entre el eje Norte y la proyección del haz solar sobre el plano Norte-Cénit.

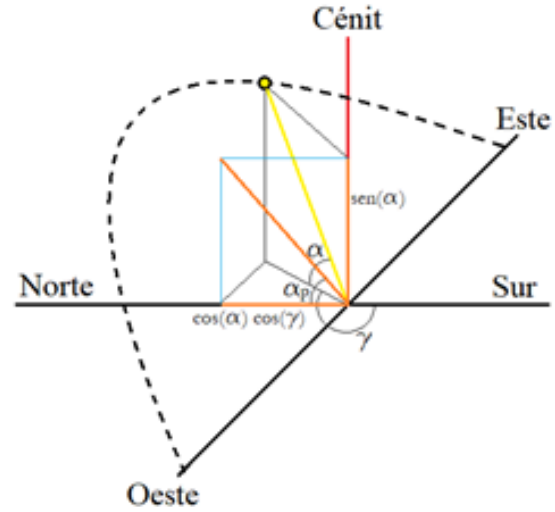


Fig. 5. Proyecciones del haz solar para la determinación del ángulo de perfil solar α_p .

Considerando el triángulo rectángulo formado por las componentes $\text{sen}(\alpha)$ y $\text{cos}(\alpha) \text{cos}(\gamma)$, el ángulo α_p se determina con la Ec. 1, para todas las situaciones en las que varía el acimut solar γ .

$$\alpha_p \begin{cases} 180^\circ - \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\text{tg}(90^\circ - \alpha)\text{cos}(\gamma)}\right), 0^\circ < \gamma \leq 90^\circ \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\text{tg}(90^\circ - \alpha)\text{cos}(180^\circ - \gamma)}\right), 90^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\text{tg}(90^\circ - \alpha)\text{cos}(\gamma - 180^\circ)}\right), 180^\circ \leq \gamma \leq 270^\circ \\ 180^\circ - \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\text{tg}(90^\circ - \alpha)\text{cos}(360^\circ - \gamma)}\right), 270^\circ \leq \gamma < 360^\circ \end{cases} \quad (1)$$

Para los ángulos acimutales límites (90° , 180° y 270°) el uso de sendas ecuaciones es indistinto. La altura solar α y el acimut solar γ se determinan mediante las ecuaciones horarias clásicas provista por la literatura (Duffie y Beckman, 2013). El ángulo γ requiere de una convención con respecto a la referencia a partir del cual es medido. Cómo se vio en la Fig. 5, γ se cuantifica tomando el eje Sur como referencia nula y de variación positiva en el sentido horario. Finalmente, la inclinación del concentrador β está dada por la Ec. 2, dando cuenta que si $\beta < 0$, el concentrador se encuentra orientado hacia el Sur; $\beta > 0$, orientado hacia el Norte; $\beta = 0$, la posición es cenital.

$$\beta = 90^\circ - \alpha_p \quad (2)$$

En la práctica se define un rango horario de trabajo, normalmente comprendido entre las 9 am y 15 pm, en los cuales β es siempre positivo, es decir el concentrador con seguimiento en el eje Este-Oeste está siempre orientado hacia el Norte, recibiendo los haces solares con un ángulo de incidencia θ dado por la Ec. 3 (Rabl, 1985), en la que δ es la declinación estacional y ω el ángulo horario solar.

$$\theta = \arccos\left(\sqrt{1 + \text{cos}^2\delta (\text{cos}^2\omega - 1)}\right) \quad (3)$$

Volviendo a la Ec. 2, la determinación horaria del perfil solar y de la inclinación teórica del concentrador permiten diagramar los algoritmos de seguimiento solar en la dirección de rotación sobre el eje Este-Oeste. Para ello se definió una inclinación objetivo β_0 que se contrasta con la inclinación actual β para la corrección de la posición cuando la diferencia entre ambos valores es de 1° , es decir la inclinación deseada (o próxima según el tiempo transcurrido) se aparta de la actual en una diferencia preestablecida de 1° . Para tal corrección posicional se emplea un motor paso a paso acoplado al eje de rotación por medio de

una caja reductora de engranaje y tornillo sin fin auto bloqueante. El código desarrollado contiene las ecuaciones horarias del movimiento aparente del sol, la estrategia de control posicional como así un script adicional que permite la corrección manual mediante trenes de pulsos activados con pulsadores. Además, un script se encarga de enclavar el motor paso a paso mientras éste no está recibiendo pulsos para la corrección posicional. Se emplearon placas Arduino Mega para la implementación de las rutinas de seguimiento.

2.4. Construcción del equipo concentrador

La figura 6 muestra al concentrador en su versión actual, mientras es ensayado en condiciones de cielo claro. Se observa el agregado de una malla metálica en la estructura para la protección antigrañizo. Las columnas o soportes principales se soterraron mediante zapatas prismáticas de hormigón armado de 30x30x50 cm³.



Fig 6. Concentrador cilindroparabólico bajo ensayo.

La estructura de soporte (tanto las costillas como los bastidores rectangulares) presenta vinculaciones isostáticas a través de configuraciones reticulares, lo que ayuda a las vigas centrales y transversales a absorber los esfuerzos de deformación. Los pórticos de ambos módulos se encuentran vinculados en la zona central del concentrador, permitiendo que el absorbedor se desplace libremente al expandirse y contraerse. Esto evita la flexión interna del caño metálico, disminuyendo el riesgo de rotura por acción mecánica sobre la cubierta de vidrio. La vinculación del absorbedor con la red de agua se realizó mediante una manguera flexible y la salida de agua caliente / vapor se encuentra liberada a la atmósfera. Tanto a la entrada como a la salida se instalaron válvulas manuales para el control del caudal y de la presión-temperatura de trabajo.

Las superficies reflectivas son de aluminio pulido de alta reflectancia adheridas a las costillas mediante silicona neutra y sujetas con remaches de aluminio, conformando así el perfil parabólico. Se previó una separación entre chapas en la banda central cerca del vértice parabólico para reducir la acción del viento al ser una zona de descarga aerodinámica, optimizar el área de colección solar y facilitar la limpieza.

2.5. Sistema de medición y adquisición de datos

Se realizó la medición de las temperaturas de entrada, salida y ambiente mediante termocuplas tipo K cada 1 minuto. El caudal másico se registró cada 5 segundos mediante un caudalímetro Arduino y la irradiancia directa normal (DNI) al haz se midió con un pirheliómetro Kipp & Zonen, con frecuencia minutal. La Tabla 1 resume la información pertinente a los sensores y los adquirentes de datos empleados. Dado que la frecuencia de muestreo del caudalímetro es diferente a la de los demás sensores, se procedió

a promediar su medición en intervalos de 1 minuto, para facilitar el post procesamiento de todos los datos.

Tabla 1. Descripción de instrumental de medición empleado.

| Magnitud | Sensor | Error | Adquisidor |
|---------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Temperatura | Termocupla Fluke - K | 0.1 °C | Digi Sense de doce canales |
| Caudal másico | Caudalímetro Arduino YF-S401 | 10 ⁻³ kg/s | Arduino UNO |
| DNI | Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 | 2 % | Campbell Scientific CR100 |

Con respecto al montaje de los sensores, las termocuplas se adosaron mecánicamente en los ductos de entrada y salida, asegurando una posición perpendicular de la punta de prueba con respecto al flujo másico. El caudalímetro se incorporó interrumpiendo el flujo de agua de entrada. La termocupla para medir temperatura ambiente se encuentra libre a la atmósfera evitando la incidencia solar sobre su punta de prueba. El pirheliómetro se encuentra montado en un seguidor EPLAB, modelo ST-1. En cuanto a los adquirentes de datos, el equipo Digi Sense es portátil, por lo que su ubicación es aleatoria. La placa Arduino UNO comparte ubicación con la electrónica de seguimiento solar dentro del gabinete de control. Finalmente, el adquirente Campbell Scientific se encuentra alojado en el edificio del INENCO, ya que el pirheliómetro está ubicado en la terraza. En figura 7 se presenta un esquema unifilar del sistema de medición y adquisición de datos.

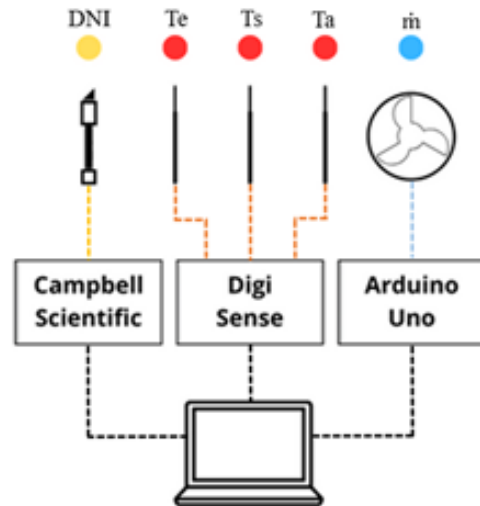


Fig 7. Esquema del sistema de adquisición de datos.

2.6. Rendimiento solar-térmico

Se define al rendimiento solar-térmico como la relación entre la potencia térmica desarrollada por el concentrador y la potencia solar que llega al área de apertura (Ec. 4).

$$\eta_{st,\%} = \frac{\dot{Q}}{A_p \text{ DNI} \cos\theta} = \frac{(1-X) \dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_p \text{ DNI} \cos\theta} \quad (4)$$

Siendo C_p la capacidad calorífica del fluido caloportador, establecido en 4186 J/kgK. X es un parámetro denominado factor de condensado y se interpreta como el porcentaje de agua líquida que el absorbedor no alcanza a vaporizar ya sea por excesivo cau-

dal másico o baja irradiación solar. Su determinación es de índole experimental colectando el condensado en un matraz graduado y determinando el tiempo que transcurre hasta coleccionar 0.5 l de condensado (Ec. 5). Se emplea la Ec. 6 para ello, donde \dot{m}_c es el caudal de condensado. Para el equipo en cuestión, $0.18 < X < 0.3$, para presiones por encima de la atmosférica.

$$\dot{m}_c = \frac{V_c \rho_c}{t} \quad (5)$$

$$X = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}} \quad (6)$$

Donde V_c es el volumen de condensado en m^3 , ρ_c la densidad en kg/m^3 y t el tiempo transcurrido en segundos.

El error relativo cometido en la determinación de la potencia térmica está dado por la Ec. 7, donde las magnitudes con Δ corresponden a los errores absolutos correspondientes a los instrumentos de medición, con $\Delta V_c = 2 \times 10^{-5} m^3$ y $\Delta t = 10^{-2} s$. El resto de los errores ya se indicaron en la Tabla 1.

$$e_{\dot{Q},\%} = \frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}} 100 = \left(\frac{2\Delta \dot{m}}{\dot{m}} + \frac{\Delta V_c}{V_c} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta T_s}{T_s} + \frac{\Delta T_e}{T_e} \right) 100 \quad (7)$$

3. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de mediciones directas e indirectas para dos días, 9/10/23 y 7/11/23. Las mediciones directas corresponden a las de temperatura de salida, caudal másico y DNI. Aquellas de índole indirecta corresponden a la determinación de la potencia térmica y el rendimiento solar-térmico.

En figura 8 se muestra la temperatura de salida. Se observa una cierta estabilidad entre $100^\circ C$ y $120^\circ C$, lograda por el cierre parcial de la válvula de salida a efectos de presurizar el absorbedor. Luego, la regulación se realizó mediante el cierre/apertura de la válvula de caudal de entrada. No obstante, este caudal presentó una alta variabilidad (figura 9) debido a que el equipo se conectó directamente a la red, y no a un sistema de bombeo y estabilización de flujo.

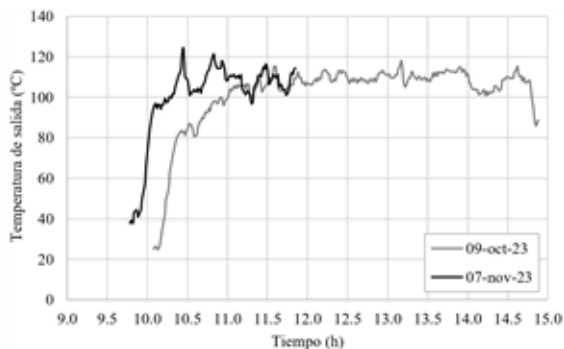


Fig 8. Temperatura de salida. Se observa el efecto de la presurización del absorbedor debido al cierre parcial de la válvula de salida.

Se destaca la rápida puesta en régimen térmico, con rampas promedio de calentamiento de $3.1^\circ C/minuto$ hasta alcanzar $80^\circ C$ y de $1.8^\circ C/minuto$ hasta la primera ebullición. El hecho de conferirle al equipo una baja inercia térmica para la entrada en servicio repercute en una desventaja en los casos de disminución de la irradiación solar por el paso de alguna nube, ocasionando la disminución repentina de la temperatura de salida.

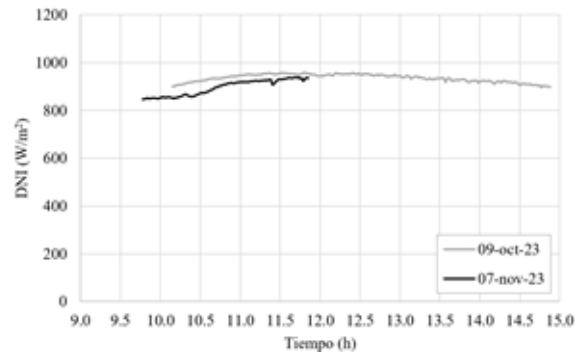


Fig 10. Registro de irradiación directa normal al haz. Se dispuso de buen recurso solar, sin atenuaciones por nubes migrantes.

De la determinación de la potencia térmica, se observa en figura 11 que el equipo es capaz de generar hasta $8000 W$ para caudales próximos a $0.02 kg/s$ ($1.2 l/min$). En ambas mediciones se observan dispersiones que no siguen la tendencia lineal entre la potencia y el caudal. Esto puede asimilarse a las variabilidades repentinas del caudal y el tiempo de retardo de apertura/cierre de las válvulas de entrada y salida para establecer el nuevo régimen térmico, ya que tales válvulas son de accionamiento manual, dependiendo del operario la detección de caudales anómalos, así como valores en la temperatura que podrían poner en riesgo al equipo.

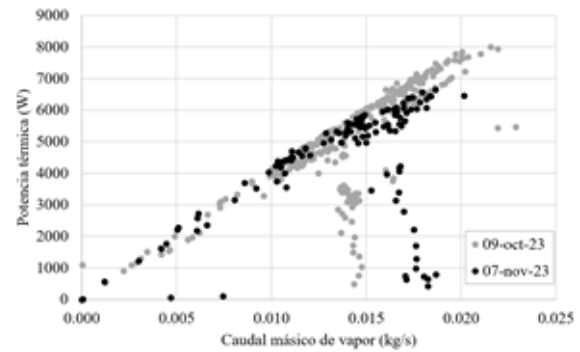


Fig 11. Variación de la potencia térmica con el caudal de vapor.

En figura 12 se muestra la eficiencia solar-térmica lograda por el concentrador. La alta variabilidad se corresponde con el caudal másico de vapor. Sin embargo, se observa que la eficiencia alcanza valores elevados, entre 65% y 75% , pudiéndose asumir una franja promedio entre 50% y 60% . Esto se podría atribuir al correcto trabajo realizado en el montaje de las chapas reflectoras, a la selección del diámetro del caño absorbedor y al cierre de los extremos de la cubierta de vidrio.

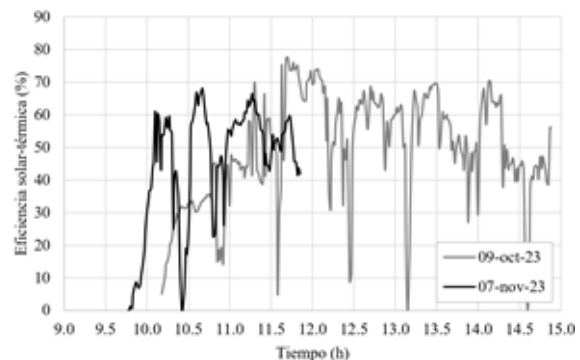


Fig 12. Eficiencia solar-térmica del concentrador ensayado.

La dependencia de la temperatura de salida con el caudal de entrada se observa en la figura 13. La permanencia de la temperatura por encima de la línea de ebullición (98 °C aproximadamente, a 1180 m.s.n.m.) es un indicativo del correcto funcionamiento del concentrador. No obstante, ante situaciones anómalas devenida por la variación del caudal y el retardo de la regulación, el equipo trabajó por debajo de las condiciones de evaporación y la baja producción de energía térmica. Esto se observa en ambos días de ensayos, al igual que en figuras anteriores.

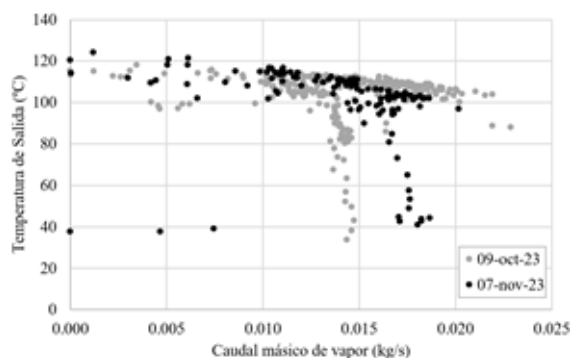


Fig 13. Dependencia de la temperatura de salida con el caudal másico.

El error cometido en la determinación de la potencia se muestra en la figura 14. Se observa una alta incerteza cuando la potencia térmica es inferior a los 3000 W, colocando como umbral aceptable un error del 25%. Este error se acota al 15 % cuando el concentrador genera una potencia superior a 6000 W.

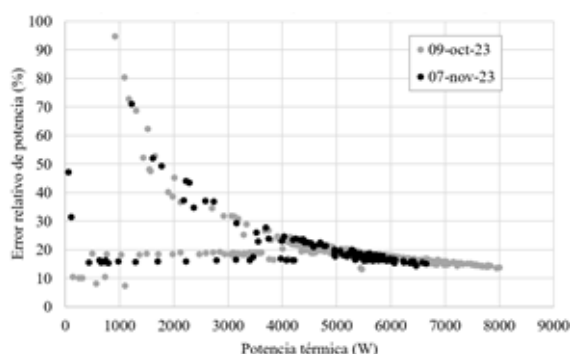


Fig 14. Error cometido en la medición indirecta de la potencia térmica.

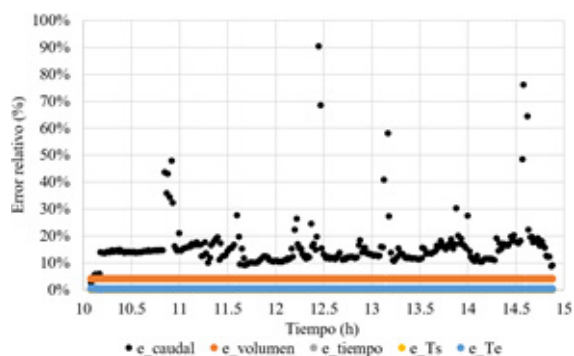


Fig 15. Desglose de errores relativos en la medición de magnitudes empleadas para la determinación de la potencia térmica, para ensayo del 9-Oct-23.

Resulta de interés entonces determinar cuál de los instrumentos de medición es el origen de tal elevado error. Tomando el desglo-

se del error relativo porcentual dado por la Ec. 7, y analizando los errores por separado para el día 9-Oct-23, se observa en figura 15 que la mayor dispersión la genera el caudalímetro presentando picos del 90 %, seguido por el error relativo en la medición del volumen de condensado, del orden del 4 %. Los errores relativos cometidos en la medición de las demás magnitudes tienen una inferencia menor en el error relativo global. Similar comportamiento se observa para el día 7-Nov-23. Se verifica entonces la relación entre la dispersión de la potencia térmica con la variabilidad brusca en el caudal medido.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El concentrador construido mostró buenas prestaciones de operación en cuanto a la potencia térmica desarrollada y la eficiencia solar-térmica lograda, para caudales relativamente bajos. Cabe destacar que los materiales empleados se obtienen en el mercado local nacional, con la salvedad de que el absorbedor no se encuentra sellado al vacío. Esto podría incrementar aún más las prestaciones de funcionamiento. Se destaca la sencillez constructiva y la facilidad de ensamblaje. Ahora bien, comparando con modelos comercialmente disponibles se encuentra que éstos poseen mayores prestaciones, ya que la diferencia radica en las técnicas constructivas, los materiales empleados, como así el know-how propio del sector empresarial. En Tabla 2 se muestra la comparativa entre modelos de concentradores pertenecientes a la firma Solatom y Absolicon, con el prototipo aquí propuesto.

Tabla 2. Comparativa entre concentradores comerciales y el presentado en este trabajo.

| Magnitud | Solatom FLT20 | Absolicon T160 | Presente |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Tipo | Fresnel | Cilindro parabólico | Cilindro parabólico |
| Esquema | | | |
| Fluido | Agua-vapor, aceite y aire | Agua-vapor, propilenglicol al 40% | Agua-vapor |
| Apertura, m ² | 26.4 | 5.5 | 11 |
| Potencia, kW _t | 14.5 | - | 6-8 |
| Eficiencia solar-térmica, % | - | - | 50-60 prom. 75 máx. |
| Eficiencia óptica, % | 63.2 | 0.766 | - |
| Temperatura de salida, °C | 180 | 60-160 | 80-120 |
| Caudal, l/minuto | - | 30 | 1-1.2 |

La caracterización del equipo indica que responde a la generación de potencia acorde a la apertura y a las eficiencias obtenidas con los modelos comerciales. La configuración de materiales puede ser optimizada, por ejemplo, empleando un caño de pared gruesa para el absorbedor, pinturas selectivas en el espectro infrarrojo y reemplazo de las chapas por vidrios curvos, aunque esto último es poco probable aun, en el contexto nacional. En términos de

absorbedores, se encuentra una buena solución con los tubos de vidrios de borosilicato ya que se logra reducir las pérdidas convectivas hacia la atmosfera. Idéntica solución planteada por el modelo T160 de Absolicon, al incorporar una cubierta de vidrio plano en la zona de captación solar, no siendo necesario generar vacío en el interior.

Se dispone del equipo concentrador en el campus experimental del INENCO, con el objetivo de generar vapor presurizado, apto para su uso en proyectos o experimentos que requieran calor como fuente de energía térmica. A futuro se plantea la continuidad de los ensayos a efectos de caracterizar los límites operativos del equipo, introduciendo mejoras en cuanto a los materiales empleados en el absorbedor, la incorporación de un sistema de bombeo y presurización de agua, como así la incorporación de amortiguadores de vibraciones ocasionadas por ráfagas de viento.

5. FUENTE DE FINANCIAMIENTO

El presente trabajo se encuentra financiado mediante un proyecto PICT (FONCyT), N° 2019-0129, denominado Generación de energía térmica con tecnología de concentración solar cilindro parabólica para procesos industriales en la región NOA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal técnico de la Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Téc. Emanuel Armata y Téc. Carlos Fernández, por el soporte brindado en las fases constructivas del proyecto. A la CPA-CONICET Lic. Constanza Ruiz López por el soporte en la medición de DNI.

REFERENCIAS

AEE INTEC. (2023). SHIP Plants Database. Disponible en <https://ship-plants.info>. (Último acceso: 04/03/2024).

Bertinat P., Chemes J., Forero L. (2020). Transición energética: Aportes para la reflexión colectiva. Transnational Institute. ISBN 9789070563776.

Dellicompagni P. (2019). Diseño, construcción y ensayo de la etapa de generación eléctrica con un sistema solar térmico. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas. Pp. 171 – 183. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80705>.

Duffie J., Beckman W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Garrido S. (2022). Transición energética en Sudamérica. Discusión conceptual, políticas públicas y experiencias locales. Lenguaje Claro Editora.

González F. D. F., Pedraza M. L., Cornú C. N., Mendieta Albarra-cín B. (2023). Nociones de transición energética en salta: una aproximación a cómo (re) producen sentidos los medios de comunicación locales (Argentina, 2023). Revista Avances en Energías Renovables. Trabajo presentado en la XLV Reunión de Trabajos de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. En prensa.

Hongn M. (2017). Estudio y evaluación de parámetros de funcionamiento para la tecnología Fresnel lineal de concentración.

International Energy Agency. (2024). Technology Position Paper: Solar Heat for Industrial Processes (SHIP).

Rabl A. (1985). Active solar collectors and their applications. Oxford University Press. New York, Oxford.

Solar Thermal World. (2023). Artículo: High level of dynamism on the SHIP world market in 2022. Disponible en: <https://solarthermalworld.org/news/high-level-of-dynamism-on-the-ship-world-market-in-2022/>. (Último acceso: 27/02/2024).

Svampa M., Bertinat P. (2022). La transición energética en Argentina (1ª edición). Siglo XXI.