

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN CIRCUITO TÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL CON ENERGÍA SOLAR

R. Stoll, J. Daghero, E. Podversic, C. Capozzuca, G. Paisio

Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba

Tel. 0358-46768842 e-mail: rstoll@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta la evaluación del desempeño de un circuito térmico para la generación de vapor de agua de baja entalpía destinado al uso industrial. Este circuito térmico forma parte de un sistema de captación de energía solar por medio de un concentrador cilíndrico parabólico (CCP). El circuito original fue modificado para mejorar su eficiencia energética y asegurar, con la incorporación de resistencias halógenas, una temperatura constante en el fluido térmico ante fluctuaciones de la radiación solar incidente. Se realizaron ensayos experimentales del circuito térmico sin conectarlo al CCP con el fin de evaluar las pérdidas de energía en cada uno de sus componentes. Con el sistema aislado, el fluido térmico alcanzó una temperatura del orden 150°C al ingreso del generador de vapor. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 1,3 kg/h con lo cual la eficiencia térmica global fue del 60 %. De esta manera, se logró una mejora sustancial en el aprovechamiento de la energía con relación al circuito térmico original.

Palabras clave: Energía solar, concentrador cilíndrico parabólico, circuito térmico, producción de vapor.

INTRODUCCIÓN

Después del siglo XX, muchos países se han centrado en fuentes de energía renovable para la producción de energía térmica y eléctrica. El objetivo general es reducir el impacto ambiental debido al aumento del uso de combustibles fósiles. La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras para satisfacer la demanda energética global futura.

Existen diversos tipos de industrias, como la química, alimentaria, textil y lavanderías, que requieren energía térmica para llevar a cabo sus procesos, como la generación de vapor o agua caliente a temperaturas medias a altas, que van desde aproximadamente 100 °C a 300 °C. Para abordar esta demanda, la energía solar de concentración y en particular, el uso de concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) se ha considerado como una alternativa verde a las fuentes convencionales de energía, brindando varias ventajas, como la reducción de costos y emisiones de gases de efecto invernadero.

La implementación de sistemas de energía solar concentrada ha emergido como un enfoque fundamental para potenciar la competitividad de la energía solar en comparación con las fuentes de energía convencionales y otras energías renovables. Los investigadores han trabajado en el desarrollo y perfeccionamiento de estas tecnologías con el objetivo de aumentar su eficiencia y accesibilidad.

Una de las motivaciones primordiales para invertir en esta tecnología radica en la seguridad energética que brinda al reducir la dependencia de los suministradores de combustibles fósiles. Al incorporar sistemas de energía solar concentrada, las industrias pueden diversificar sus fuentes de energía y disminuir su vulnerabilidad ante las variaciones en los precios y la disponibilidad de combustibles fósiles (Ktistis et al., 2013).

Además de los beneficios económicos que ofrecen, estos sistemas desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático global al reducir el consumo de combustibles fósiles y, por ende, la contaminación ambiental. Esto contribuye a crear un entorno de vida más saludable y sostenible, lo cual es especialmente relevante en un contexto en el que la conciencia sobre la protección del medio ambiente y la búsqueda de soluciones energéticas más limpias están en constante aumento.

Asimismo, la energía solar concentrada se presenta como una fuente de energía verde versátil, con aplicaciones que incluyen la extracción de componentes valiosos de materiales vegetales y biomasa residual, la deshidratación de productos agrícolas, la recuperación de agua a través de la desalinización, la descontaminación, así como la cocción y el horneado de alimentos. A pesar de estos avances, se requieren investigaciones adicionales para mejorar la eficiencia, estabilidad, fabricación y disponibilidad de estos sistemas, así como para optimizar su diseño con el fin de reducir los costos de estos sistemas (Barba et al., 2019).

Históricamente, el mercado de Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) en todo el mundo se centraba en aplicaciones que requerían temperaturas por debajo de los 100 °C, y utilizaba principalmente colectores de placa plana y colectores de tubo de vacío. El uso de concentradores cilíndricos parabólicos o sistemas Fresnel lineales para la generación de vapor destinado a la industria era poco común en el pasado. Sin embargo, en los últimos años, esta tendencia ha experimentado un cambio significativo. La creciente demanda del sector industrial ha impulsado un notable crecimiento en los proveedores de tecnología de concentración solar para generación de vapor. En el año 2022, se proyectó la implementación de al menos 30 proyectos con una capacidad total de 32,3 MW, marcando un aumento significativo en comparación con los 10 proyectos y 8 MW que se pusieron en funcionamiento en 2021. Este cambio refleja la creciente aceptación y adopción de sistemas de concentración solar en aplicaciones industriales, lo que indica una evolución positiva en la percepción y la confianza en estas tecnologías para satisfacer las necesidades energéticas de la industria a nivel global. (Solarthermalworld, 2023).

En Argentina, se han realizado estudios con CCP con aplicaciones industriales utilizando un fluido caloportador con el fin de aprovechar la energía térmica. Dri et al (2009) utilizaron un CCP en un ciclo de refrigeración por absorción. Las mediciones realizadas permitieron determinar su curva de eficiencia y deducir el coeficiente de remoción de calor y coeficiente global de pérdida del sistema de concentración. Los resultados obtenidos permitieron realizar una implementación en TRNSYS para simular el comportamiento del sistema en distintos escenarios climáticos.

El Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha estudiado la tecnología de concentración solar desde el año 2013, Daghero et al (2013) diseñaron un módulo de CCP replicable para ser utilizado en la generación de vapor para la extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas y medicinales.

Posteriormente, Daghero et al (2015) evaluaron experimentalmente el rendimiento térmico del CCP de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91). Se determinó que el rendimiento óptico del concentrador alcanzó al 70 % siendo este valor similar al obtenido por otros autores. Este resultado confirmó que la industria regional puede desarrollar y construir este tipo de concentradores con buenos rendimientos. A partir de esta conclusión, Garnica et al (2018) diseñaron y desarrollaron un circuito térmico que permite transmitir la energía captada a un generador de vapor utilizando un fluido de transferencia térmica a base de aceite nafténico de grado alimenticio cuyo nombre comercial es Paratherm NF (Paratherm, 2023). En las evaluaciones realizadas sobre este sistema en estado estacionario el fluido térmico alcanzó una temperatura promedio de 124 °C a la salida del receptor. El salto térmico en el mismo fue de 23 °C por lo que la eficiencia del concentrador alcanzó el 67 %. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 0,53 kg/h de lo cual se infirió que el rendimiento del circuito térmico fue del 19 %. Se concluyó que, si bien el concentrador tiene una muy buena eficiencia, es necesario trabajar en la optimización del circuito térmico ya que la solución tecnológica adoptada disipaba el 80 % de la energía útil colectada por el receptor afectando así al rendimiento global del sistema (Stoll et al, 2019).

Además, como parte de los objetivos planteados, el GES desarrolló un mecanismo que proporciona un movimiento azimutal al CCP. Este mecanismo consta de dos ruedas dentadas y fue construido utilizando una impresora 3D. La incorporación de un sistema de control a este mecanismo permitirá el seguimiento solar (Ortiz et al, 2022)

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados al circuito térmico que fue modificado con el objetivo de disminuir las pérdidas de calor mejorando la aislación térmica e incorporando un sistema de precalentamiento capaz de mantener la temperatura constante del fluido térmico ante fluctuaciones de la radiación solar incidente.

EL CIRCUITO TÉRMICO

Existen varias alternativas tecnológicas para generación de vapor de uso industrial mediante un CCP (Akbarzadeh & Valipour, 2018). Entre las opciones más viables tecnológicamente en la región está el uso de agua líquida que se convierte en vapor en la generación directa de vapor (GDV) y el uso de un generador de vapor (GV) en donde la energía colectada por el CCP es transferida al agua mediante un fluido térmico.

El uso de la GDV permite generar vapor directamente a través del campo solar, eliminando la necesidad de un generador de vapor y simplificando la configuración de la planta, lo que reduce los costos de inversión. En comparación con el fluido térmico, el vapor puede generarse a temperaturas más altas. También se ha encontrado que el agua/vapor tiene la máxima eficiencia global en comparación con otros fluidos. Sin embargo, el uso de agua líquida como fluido de trabajo presenta desafíos como la falta de un almacenamiento adecuado de energía térmica, la alta presión de funcionamiento, el control sofisticado debido al flujo bifásico y la alta caída de presión en la sección de sobrecalentamiento debido a la baja densidad del vapor (Ktistis et al, 2013).

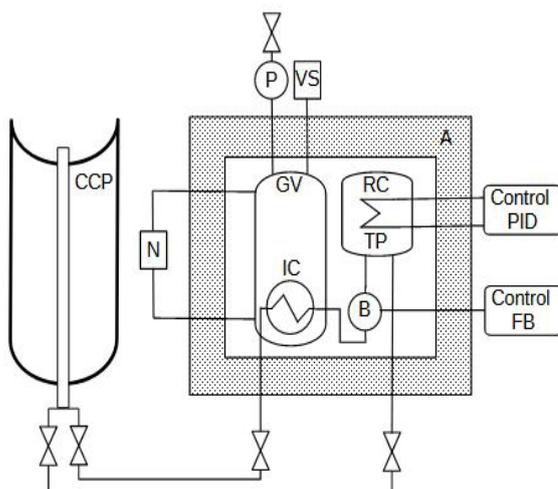
Por estas razones, el GES decidió desarrollar un GV. Se optó por utilizar un fluido térmico, cuyo nombre comercial, es Paratherm NF. Se trata de un aceite nafténico de grado alimenticio, diseñado para operar libre de mantenimiento, con alta durabilidad en sistemas cerrados de fase líquida hasta 300 °C, baja viscosidad y alto coeficiente de transferencia térmica. Las principales propiedades de este fluido se muestran en la Tabla 1 (Paratherm, 2023).

Tabla 1: Principales propiedades del fluido térmico Paratherm NF

Temperatura máxima de operación	332°C
Punto de ebullición (101kPa)	371°C
Temperatura máxima de película	343°C
Punto de inflamación Pensky-Martens (D93)	149°C
Presión de vapor en temperatura máxima de operación	17 kPa
% de expansión del volumen por encima de la temperatura máxima de operación por cada 100°C	9,9
Densidad (100°C)	831 kg/m ³
Viscosidad (100°C)	3,1 mPa-s
Calor Específico (100°C)	2,2 Kj/Kg-°K

La primera versión de este circuito térmico fue presentada en una publicación anterior (Garnica et al 2018). Debido a la baja eficiencia térmica del mismo se decidió modificarlo manteniendo los componentes principales. Se trabajó en la mejora de la aislación térmica y en la incorporación de resistencias calefactoras en el tanque pulmón (TP)

El diagrama del circuito modificado y su conexión con el CCP se muestra en la Fig. 1a. El circuito cuenta con un generador de vapor (GV) construido en acero inoxidable con intercambiador de calor (IC) con forma de serpentina por cuyo interior circula el fluido térmico. El generador está provisto de un manómetro (P), un medidor de nivel de agua (N) y una válvula de seguridad tipo resorte (VS). Entre el generador de vapor y la bomba (B) se ubica un tanque pulmón (TP) que permite contener la expansión volumétrica del fluido térmico por efecto del aumento de la temperatura. Las resistencias calefactoras (RC) incorporadas al tanque pulmón tienen la función de mantener la temperatura constante del fluido térmico a la entrada de intercambiador de calor (IC) ante cualquier fluctuación de la radiación solar incidente. El accionamiento de estas resistencias es realizado por dos relés de estado sólido que son automatizados por un dispositivo de control (CONTROL PID) tipo PID modelo N1100, marca Novus. El generador de vapor (GV), la Bomba (B) y el tanque de pulmón (TP) se encuentran en un recinto que está aislado térmicamente (A). La bomba de circulación es de tipo engranaje Marca Venturi Serie A92. La misma fue seleccionada por el bajo caudal requerido y cuenta con sellos de Viton para aumentar su resistencia a la temperatura. Esta bomba tiene un caudal máximo de 8 l/min y es accionada con un motor trifásico de 0,5 Hp. Para variar el caudal la bomba tiene incorporada en su alimentación un variador de frecuencia modelo ATV11, marca Schneider Electric, el cual permite modificar la velocidad de rotación del motor y, por ende, el caudal del fluido. En la Fig. 1b se muestra el prototipo de circuito térmico en una prueba de resistencia a presión del GV. El TP es el depósito de color rojo, debajo se aloja la B. La salida de B está conectada al IC que se encuentra en el interior del GV. Estos elementos se encuentran montados en una sección de la caja aislada (A), que tiene un recubrimiento de madera de fenólico de 10 mm de espesor y está compuesta de placas de tergopol de alta densidad de 50 mm de espesor.



(a)



(b)

Figura 1: Circuito Térmico. (a) Diagrama del Circuito Térmico acoplado al CCP y (b) prototipo de Circuito Térmico construido.

EL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CIRCUITO TÉRMICO

En la primera versión de este sistema se incorporaron dos resistencias eléctricas comerciales de 1500 vatios que son utilizadas para agua caliente sanitaria (ACS) tal como se muestra en la Fig. 2. Durante las primeras pruebas con estas resistencias se observó la generación de vapor en el TP debido a la evaporación del fluido térmico y la degradación prematura del mismo por la excesiva temperatura de las superficies de las resistencias calefactoras. Para tratar de resolver este problema se contactó al proveedor del fluido térmico quien sugirió modificar el sistema de calentamiento dado que la densidad de potencia aplicada superaba los 35 KW/m² permitidos para este tipo de fluido térmico (Chromalox, 2023). Esta información, no estaba disponible en la hoja de especificaciones técnicas del fluido térmico. Además, el proveedor recomendó mantener al TP presurizado para evitar el problema de la evaporación del fluido ya que presenta una baja presión de vapor.



Figura 2: Sistema de calentamiento con resistencias de ACS

A partir de esta situación se buscaron alternativas para precalentar el fluido. Se eligió la opción de calentarlo por medio de resistencias halógenas insertas en tubos de acero que atraviesan el TP. Estas resistencias son elementos de costo accesible y de disponibilidad en el mercado local. Se seleccionaron resistencias de 400 W ya que su longitud era adecuada para las dimensiones del TP. En la Fig. 3 se muestra el montaje realizado para evaluar el correcto funcionamiento de la resistencia halógena en un recipiente de características geométricas iguales al TP del circuito térmico



(a)



(b)

Figura 3: pruebas del sistema de calentamiento de circuito térmico construido. (a) Termocupla colocada en la superficie del cilindro calefactor y (b) Ensayo de prueba del sistema de calentamiento con resistencias halógenas

En la Fig. 3a se observa el interior del recipiente donde se colocaron tubos de 25 y 32 mm. En la Fig. 3b se observa el ensayo realizado utilizando el tubo de 25 mm.

La temperatura alcanzada por el fluido estanco fue de $180,7^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de la superficie del tubo sumergido fue de 298°C . Este valor resultó menor a 343°C , valor especificado por el fabricante como máxima temperatura de film (Paratherm, 2023). También se determinó que el flujo de calor por unidad de superficie fue de $32,8 \text{ KW/m}^2$, valor que está por debajo de la densidad de potencia máxima admisible de 35 KW/m^2 (Chromalox, 2023). Dado que estos resultados fueron satisfactorios, se decidió no realizar el ensayo con el tubo de 32 mm.

Modificación del sistema de calentamiento de circuito térmico

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos, se realizó la modificación del sistema de calentamiento. Tal como lo muestra la Fig. 4a se adosaron 4 resistencias halógenas de 400W al TP, cada una de ellas alojadas en un tubo de acero de 25 mm de diámetro soldadas al TP con una aleación de cobre-zinc. En la Fig. 4b se observa el detalle de la disposición de la resistencia halógena dentro un segmento de tubo de 25mm, la resistencia se sujeta mecánicamente mediante arandelas metálicas, por fuera de esta arandela se colocaron juntas de un material denominado cobre aislante de 2,5mm de espesor para evitar las pérdidas de calor generado por la resistencia. Para el accionamiento del sistema de calentamiento, se acoplaron eléctricamente dos resistencias halógenas en paralelo a cada uno de los dos relés de estado sólido previamente descritos. Si bien este sistema de calentamiento soluciona el problema de degradación del fluido térmico, su desempeño energético es menor que la propuesta inicial de este trabajo debido a que existe una cámara de aire como medio de transferencia de calor entre la resistencia y el fluido. Esta propuesta dificulta su evaluación experimental porque la energía consumida por las resistencias halógenas no es la misma energía que se transfiere al fluido térmico.



(a)

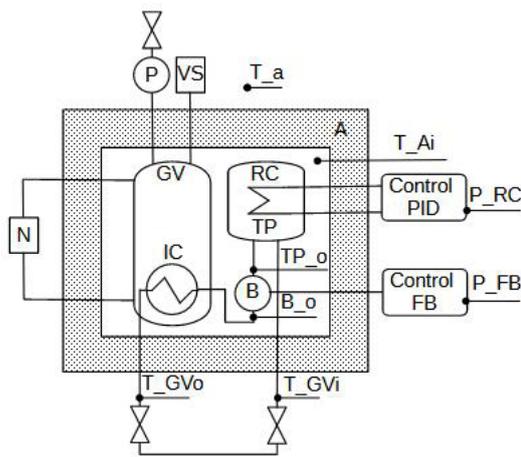


(b)

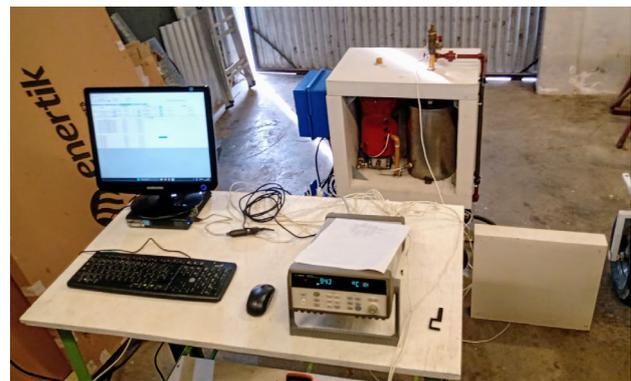
Figura 4. Modificación realizada del sistema de calentamiento en el TP. (a) El Tanque pulmón con los cuatro tubos cilíndricos soldados. (b) Detalle de la disposición de las resistencias halógenas.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL CIRCUITO TÉRMICO MODIFICADO

Con el fin de evaluar los intercambios de energía en cada uno de los componentes del circuito térmico, se realizaron ensayos experimentales sin conectarlo al CCP tal como se muestra en el esquema de la Fig. 5a. Para estos ensayos se utilizaron termocuplas calibradas tipo T, insertadas en vainas de acero inoxidable. Para mejorar la transferencia de calor entre las termocuplas y las vainas se utilizó grasa siliconada. Para la medición de la temperatura ambiente (T_a), una de las termocuplas fue colocada al reparo de cualquier fuente térmica. También se midió la temperatura dentro del recinto aislado (T_{Ai}), la temperatura del fluido térmico a la salida del tanque pulmón (TP_o), a la salida de la bomba (T_Bo), a la salida generador vapor (T_GVo), y la temperatura del fluido que retorna al tanque pulmón (T_GVi). Todas las señales se relevaron con un registrador de datos Agilent 34972A y los datos se registraron cada 30 segundos. Además, se colocaron dos vatímetros digitales monofásicos que fueron contrastados por un vatímetro digital YOKOGAWA modelo WT11. Los vatímetros digitales miden el consumo de las resistencias calefactoras (P_RC). Para determinar el caudal de vapor generado se utilizó un medidor de nivel en el GV, para ello se tomó lectura del nivel a intervalos regulares de tiempo y con la diferencia de nivel se estableció la cantidad de vapor generado. En la Fig. 5a se muestra la ubicación de las termocuplas, mientras que en la Fig. 5b se muestra una imagen del sistema ensayado con una de las tapas de aislación retiradas para mostrar el interior del habitáculo.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Esquema del circuito térmico con identificación de los sensores. (b) Imagen del sistema ensayado.

La eficiencia de estado estacionario del circuito térmico modificado se obtuvo realizando ensayos con las resistencias calefactoras accionadas, sin liberación del vapor generado. Para este ensayo se llenó el TP hasta cubrir todas las cavidades cilíndricas adosadas con 5 litros de fluido térmico. En la Fig. 7 se muestra la curva de temperatura del TP en función del tiempo.

Para evaluar el intercambio de energía en cada elemento del circuito térmico, se realizaron dos tipos de ensayos, uno de ellos se realizó sin la aislación colocada, y el otro con aislación. Los ensayos consistieron en llevar al sistema a régimen estable y luego desactivar las resistencias para dejarlo enfriar hasta una temperatura de 100°C , durante este tiempo se registraron las temperaturas en cada parte del circuito térmico.

Se determinaron los intercambios de energía en cada parte del circuito térmico con el sistema en estado estacionario. El flujo másico del fluido térmico fue fijado en 2,4 l/min, este valor de caudal es el que

produce una mayor remoción del calor del tubo receptor del CCP donde será utilizado este dispositivo. Las Fig. 6 y 7 muestran la evolución de las temperaturas registradas en cada parte del circuito sin aislación y con aislación térmica respectivamente. También se nota el efecto de la aislación en la temperatura máxima alcanzada por el fluido térmico y el tiempo que alcanza el régimen permanente, esta situación ocurre cuando la temperatura T_{GVo} se mantiene constante.

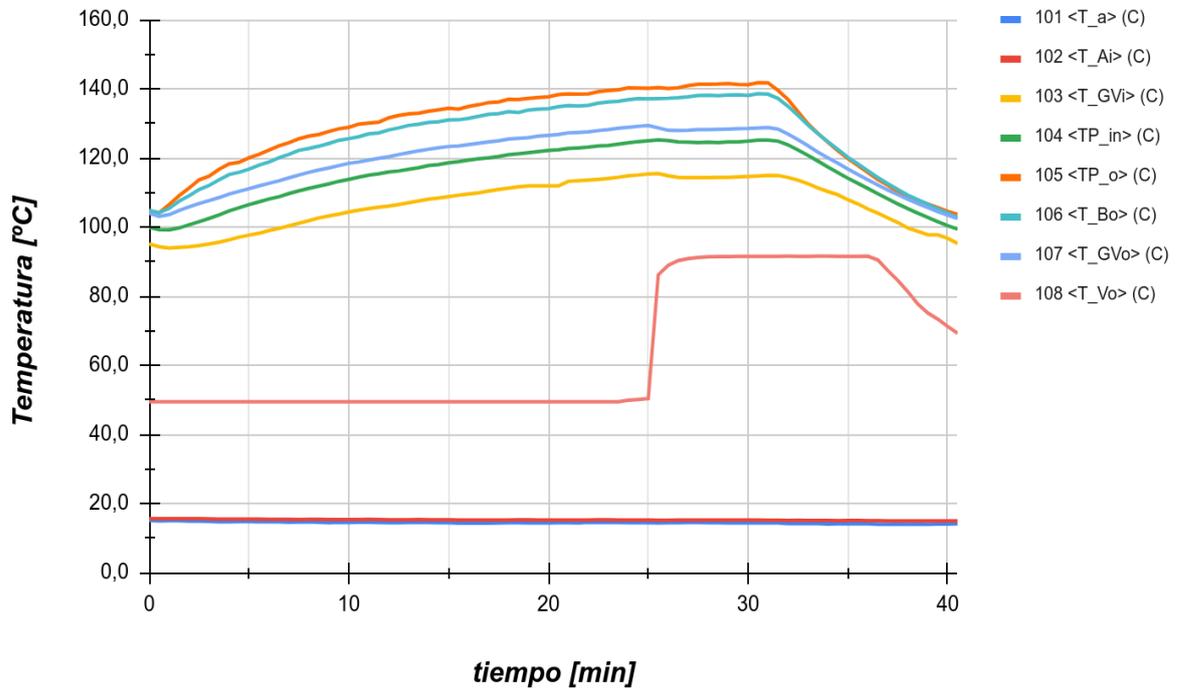


Figura 6. Evolución de la Temperaturas en el circuito térmico sin aislación

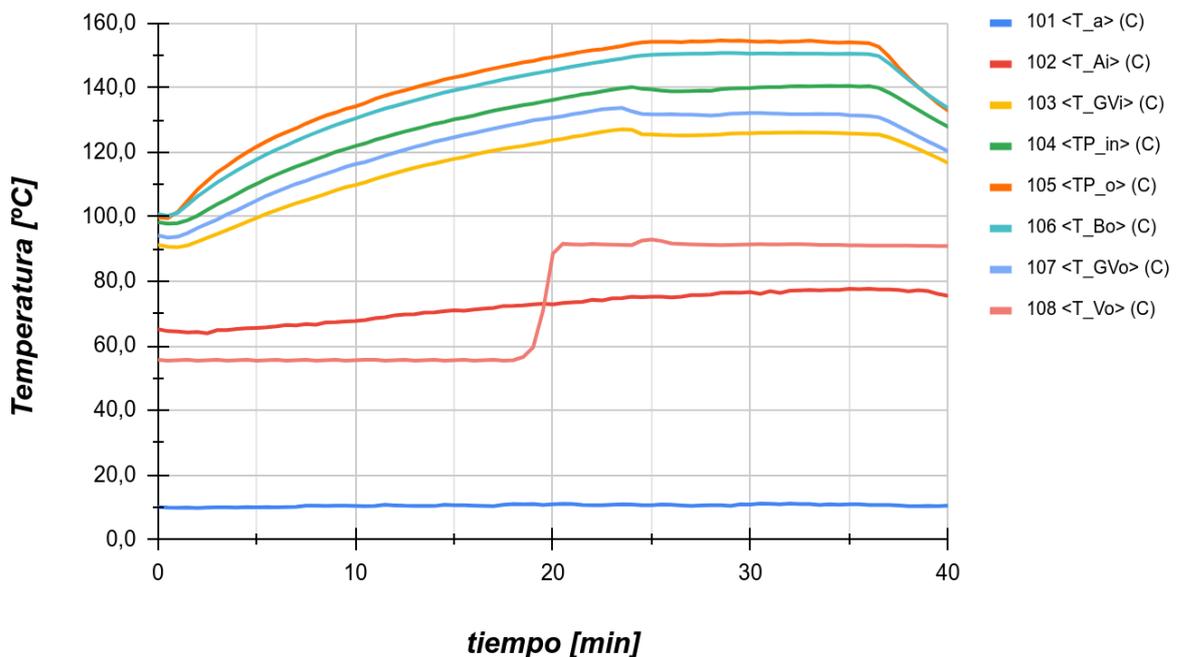


Figura 7. Evolución de la Temperaturas en el circuito térmico con aislación

En la Tabla 2, se muestran los porcentajes del total de energía intercambiada de cada elemento del circuito térmico. Para determinar la energía intercambiada en cada parte del circuito se utilizaron las Ec. (1), (2) y (3). Considerando que el caudal en el mismo en cualquier parte del circuito térmico se pudo

establecer qué porcentaje de energía es intercambiada en cada elemento, para ello se utilizaron las temperaturas medidas en régimen estable antes y después de cada elemento considerado. El elemento que recibe energía es el tanque pulmón (TP) con las resistencias halógenas adosadas. La bomba (B), y el circuito hidráulico pierden energía al medio ambiente durante el funcionamiento mientras que en el generador de vapor (GV) la energía es entregada para la generación de vapor.

$$E_{PB} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(B_{-o} - TP_{-o})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (1)$$

$$E_{GV} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(T_{GV_o} - B_{-o})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (2)$$

$$E_{CHE} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(T_{GV_o} - T_{GV_i})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde \dot{m}_{th} = Flujo másico del fluido térmico [kg/s] y $C_{p,th}$ = Calor específico del fluido térmico [J/kg.K].

Tabla 2: Resumen del porcentaje de energía intercambiada por cada elemento del circuito térmico.

Elemento del circuito térmico	Sin aislación	Con Aislación
Bomba (E_{PB})	18,6%	13%
Generador de vapor (E_{GV})	31%	65,5%
Circuito hidráulico exterior (E_{PCHE})	50,4%	21,5%
Vapor generado	0,36 kg/h	1 kg/h

En la Tabla 2 se puede observar que la aislación térmica A permite duplicar la energía entregada al generador de vapor (GV) con respecto al sistema sin aislación ya que disminuye la energía perdida por la bomba B y por el circuito hidráulico. esto permite tener más energía disponible para la producción de vapor respecto al circuito térmico sin aislación.

El cálculo de la eficiencia térmica global del circuito térmico en estado estacionario se llevó a cabo mediante la Ec. 4, que representa la relación entre la potencia de entrada (700W), proporcionada a través de las resistencias eléctricas, y la tasa de disipación de energía por unidad de tiempo del vapor generado, que equivale a la energía térmica contenida en el vapor generado (1,3 kg/h). Considerando las propiedades termofísicas del agua se obtuvo que el aprovechamiento de la energía eléctrica provista fue de un 60%.

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \lambda}{P_{RC}} \cdot 100 \quad (4)$$

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró desarrollar un circuito térmico que permite la circulación de un fluido a alta temperatura por medio de equipos y accesorios disponibles en el mercado local y resistentes a las condiciones de trabajo. Sin embargo, es importante considerar que el fluido térmico utilizado presenta una capacidad de absorber energía por unidad de superficie aproximadamente 3 veces menor comparado con el agua. Esto es una limitante para la utilización de resistencias calefactoras utilizadas en ACS.

Asimismo, en los ensayos de calentamiento de la propuesta inicial de circuito térmico se notó que el material aislante con el que estaban construidas las resistencias no soporta la temperatura de trabajo de este equipo. Del mismo modo, los sellos de grilón utilizados para sujetar las resistencias no lograron mantener la estanqueidad del TP durante las sucesivas pruebas.

Es importante revisar la hoja de seguridad del fluido Paratherm NF ya que es un fluido con baja presión de vapor y que provoca lesiones si se inhala periódicamente. Es por eso que debe considerarse su estanqueidad y la seguridad durante la manipulación en una instalación que lo utilice. También debe considerarse la expansión volumétrica del fluido debido al aumento de temperatura, en donde en este sistema fue de alrededor de 10% del volumen del fluido.

Los ensayos experimentales mostraron que es posible la generación de vapor de agua de baja entalpía alcanzando, en estado estacionario, valores de temperatura en el fluido térmico del orden de 150°C, suficientes para lograr la ebullición del agua en el generador de vapor. Se obtuvo que el aprovechamiento de la energía provista al generador de vapor con aislación es del 60 %, con lo que el efecto del aislamiento térmico mejora sustancialmente el desempeño del sistema. Se propone como trabajo a futuro evaluar el desempeño del generador de vapor conectado al CCP.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto que financió el proyecto a través de la convocatoria “Programas y Proyectos de Investigación”. Período 2020 - 2023 y al proyecto PICT SSPR 2021.

REFERENCIAS

- Akbarzadeh S., Valipour M. (2018). Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collectors: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 92 198-218
- Barba F., Gavahian M., Es I., Zhu Z., Chemat F., Lorenzo J. Khaneghah A. (2019). Solar radiation as a prospective energy source for green and economic processes in the food industry: From waste biomass valorization to dehydration, cooking, and baking. *Journal of Cleaner Production* 220 1121-1130
- Chromalox [en línea] Technical Information - Watt Density & Heater Selection - Guidelines. Dirección URL:< [Chromalox Watt Density and Heater Selection](#)> [consulta: 19 de mayo de 2023].
- Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.(2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* 7th ed., John Wiley & Sons,
- Daghero J., Garnica J., Barros J., Rodriguez R. (2013). Concentrador Cilíndrico-Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor para la Extracción de Aceites Esenciales de Plantas Aromáticas y Medicinales. *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 1. pp 02.37-02.44.
- Daghero J., Garnica J., Buitrago A., Dubini D., Lorenzo C., Manero C., Marticorena M., Martinez M., Sayago U. (2015) Concentrador Cilíndrico Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor de Uso Industrial. *Evaluación Óptica y Térmica de un Prototipo*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 19, pp.03.45-03.54. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2015
- Dri F., Busso A., Gea M. (2009). Ensayos de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico con Fluido Caloportador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 13 03.157-163
- Garnica, J., Daghero, J., Longoni, D., Ortiz, M. (2018). Circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial utilizando un concentrador cilíndrico parabólico. *Diseño, desarrollo y evaluación térmica*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 22, pp 02.13-02.23 Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2018
- Ktistis, P. K, Agathokleous, R.A., Kalogirou, S. A.,(2021). Experimental performance of a parabolic trough collector system for an industrial process heat application, *Energy*, Volume 215, Part A, 119288, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119288>.
- Ortiz M. , Stoll R., Daghero J. Podversic, E. y Cortes S. (2022) Desarrollo de un Mecanismo para el Seguimiento Solar Utilizando una Impresora 3D. *Acta de la XLIV Reunión de Trabajo de la*

Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Vol. 9, pp 156-166 2022 ISBN 978-987-29873-1-2

Paratherm [en línea] Fluido de Transferencia Térmica.

Dirección URL <<https://grupoararat.com/pdf/Paratherm/Paratherm-nf-spanish-72.pdf>> [consulta: 29 de Setiembre de 2023]

Solarthermalworld [en línea]: Concentrating solar heat capacity quadruples in 2022. Dirección URL:<<https://solarthermalworld.org/news/concentrating-solar-heat-capacity-quadruples-in-2022/>> [consulta: 14 de agosto de 2023]

Stoll R., Garnica J., Daghero J. (2019) Evaluación térmica de un concentrador solar usado para la generación de vapor de uso industrial. 7° Congreso de Ciencias Ambientales. COPIME 2019. Buenos Aires, 11 de Octubre de 2019 [7° Congreso de Ciencias Ambientales COPIME 2019 - FAPyD \(unr.edu.ar\)](https://www.unr.edu.ar) [consulta: 14 de agosto de 2023]

PERFORMANCE EVALUATION OF A THERMAL LOOP USED IN STEAM GENERATION FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS WITH SOLAR ENERGY

ABSTRACT

In this work the performance of a thermal loop for steam generation of low enthalpy for industrial process heat is presented. This thermal loop is part of a prototype of a parabolic trough collector system. The original thermal loop was modified to improve its energy efficiency and ensure, with the incorporation of halogen resistors, a constant temperature in the thermal fluid. Experimental tests were carried out without connecting the circuit to the solar collector in order to evaluate the energy losses in each of its components. With the insulated system, the thermal fluid reached 150°C at the entrance of the steam generator. The steam flow rate in steady state condition was 1.3 kg/h, and the overall thermal efficiency was 60%. In this way, a substantial improvement was achieved in the use of energy compared to the original thermal loop.

Keywords: solar energy, parabolic trough collector, thermal loop, steam production