

**CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO-PARABÓLICO DE BAJO COSTO, PARA LA PROVISIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA PEQUEÑA Y MEDIANA INDUSTRIA.****Franco J.\*, Dellicompagni P.\***

\* Instituto de Investigación en Energía No convencional (INENCO) Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina  
[francojudita@gmail.com](mailto:francojudita@gmail.com), [pablodellicompagni@gmail.com](mailto:pablodellicompagni@gmail.com)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2021>

## RESUMEN

En este artículo se muestra el desarrollo local de un prototipo de concentrador cilindro parabólico y los resultados experimentales de los primeros ensayos que permiten definir la eficiencia del colector y la energía térmica capaz de abastecer. El concentrador está construido principalmente con caño estructural. Esta estructura sostiene una chapa de aluminio de alta reflectancia. Como receptor se utiliza un tubo de vidrio evacuado, del mismo que se utiliza en los colectores "Chinos". El fluido caloportador (agua) circula por un serpentín de cobre, ubicado en interior del receptor. Como caso práctico se analiza la viabilidad de uso del dispositivo diseñado para la aplicación en la industria textil, en particular en una hilandería de la región, que utiliza agua caliente a diferentes temperaturas, en distintas etapas de la fabricación de tejidos. Para ello con los datos de consumo real, y los resultados experimentales del presente prototipo, se dimensiona el campo de colectores necesario para cubrir las necesidades de la fábrica. Se realiza un análisis comparativo con la posible instalación de un sistema del tipo de heat pipe para la misma fábrica

**PALABRAS CLAVE:** Concentrador solar, aplicaciones industriales, bajo costo

## ABSTRACT

This article shows the local development of a cylindrical parabolic concentrator prototype and the experimental results that allows defining the efficiency of the collector and the thermal energy capable of supplying it. The concentrator is mainly built with structural pipe. This structure supports a high reflectance aluminum sheet. An evacuated glass tube is used as the receiver, the same one used in the "Chinese" collectors. The heat transfer fluid (water) circulates through a copper coil, located inside the receiver. As a practical case, the feasibility of using the device designed for application in the textile industry is analyzed, particularly in a textile factory which uses hot water at different temperatures, at different stages of fabric manufacturing. For this, with the actual consumption data, and the experimental results of the present prototype, the necessary collector field is dimensioned to cover the needs of the factory. A comparative analysis is carried out with the possible installation of a heat pipe type system for the same factory.

**KEYWORDS:** Solar concentrator, industrial application, low cost

## INTRODUCCIÓN

La transición energética es un camino hacia la transformación del sector energético mundial de combustibles fósiles a carbono cero para el 2050. Las energías renovables y las medidas de eficiencia energética pueden alcanzar el 90% de las reducciones de carbono requeridas. La tecnología termosolar podrá satisfacer más de la mitad de la demanda de calor directo en la industria y los edificios en el escenario de transformación de energía. (IRENA 2019).

Las tecnologías de concentración solar son aptas para generar vapor a altas presiones y temperaturas (muy superiores a 400 °C), aunque la mayoría de los sistemas térmicos para generación de calor industrial son plantas pilotos de pequeña – media escala. Solo un tercio de los 140 proyectos a nivel global tiene un área de colección superior a 500 m<sup>2</sup>, y los cuatro proyectos más grandes (todos de placas planas) representan el 49% de la capacidad térmica instalada.

La mayoría de proyectos de concentración solar (CSP) se basan en la tecnología de cilindro parabólico (CPC) o de torre solar con heliostatos (TC), usando aceite sintético o sales fundidas, ya que ambas tecnologías están comercialmente probadas y disponibles (Gauché et al., 2014).

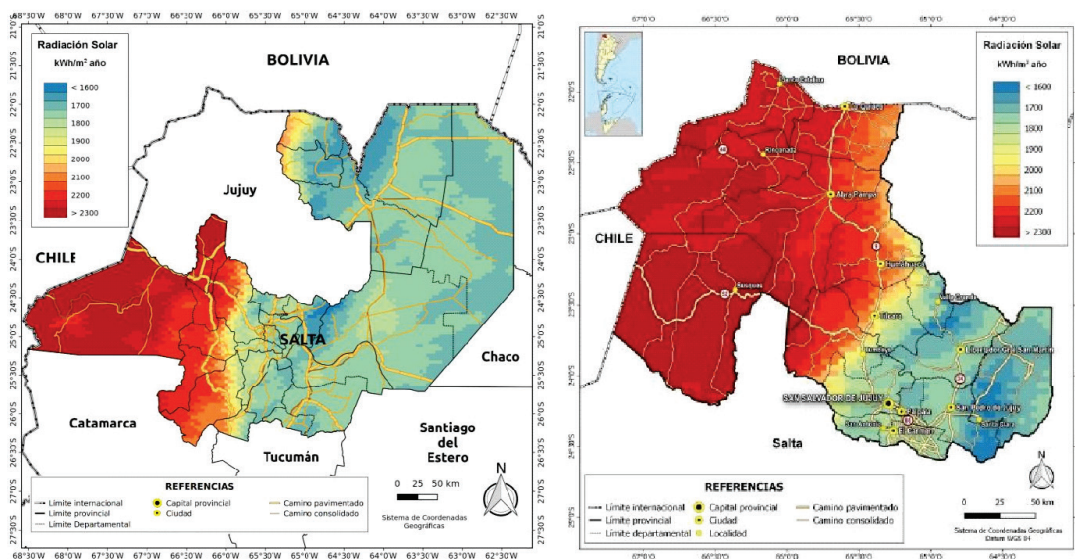


Fig. 1: Irradiación solar acumulada anual. Izq.: Atlas de irradiación de Salta. Der.: Atlas de irradiación de Jujuy.

La Puna Argentina pertenece a una de las siete regiones de mayor irradiación solar del mundo en particular la región norte que comprende a las provincias de Jujuy y Salta (Sarmiento et al., 2019; Carmona et al., 2018). Los valores de irradiación acumulada anual, mensual y de día característico han sido cuantificados por el grupo de trabajo perteneciente al INENCO (Figura 1). La irradiación acumulada anual supera los 2300 kWh/m<sup>2</sup>. La radiación solar en el NOA muestra un alto potencial para usar CSP como proveedor de energía térmica (Sarmiento et al, 2019) por lo que resulta de gran interés poder desarrollar un sistema que sea versátil para diferentes usos.

El desarrollo de tecnologías de concentración solar en Argentina es aún escaso en mediana y gran escala. No obstante, algunos grupos han desarrollado prototipos de concentradores Fresnel lineal y cilindro parabólicos, empleando materiales de industria completamente nacional en escalas de baja potencia térmica. Con la experiencia adquirida resulta viable el desarrollo de tecnologías de concentración para el aprovechamiento a mayor escala.

En este artículo se muestra el desarrollo local de un prototipo de concentrador cilindro parabólico y los resultados experimentales de los primeros ensayos que permitirán definir la eficiencia del colector y la energía térmica capaz de abastecer. El concentrador que se muestra en la Figura 2 está construido principalmente con caño estructural. Esta estructura sostiene una chapa de aluminio de alta reflectancia. Como receptor se utiliza un tubo de vidrio evacuado, del mismo que se utiliza en los colectores "Chinos". El fluido caloportador (agua) circula por un serpentín de cobre, ubicado en interior del receptor.

Como caso práctico se analiza la viabilidad de uso del dispositivo diseñado para la aplicación en la industria textil, en particular en una hilandería de la región, que utiliza agua caliente a diferentes temperaturas, en distintas etapas de la fabricación de tejidos. Para ello con los datos de consumo real, y los resultados experimentales del presente prototipo, se dimensiona el campo de colectores necesario para cubrir las necesidades de la fábrica.



Fig. 2: Sistema de concentración cilindro parabólico. superficie reflectante y absorbedor.

### CASO DE ANÁLISIS: HILANDERÍA

#### Flujograma del Proceso (provisto por la empresa)

la Figura 3 muestra el flujograma con las operaciones elementales de producción. En el cual las operaciones pintadas con rojo son aquellas que consumen agua caliente, mientras que el color verde indica consumo de agua a temperatura ambiente.

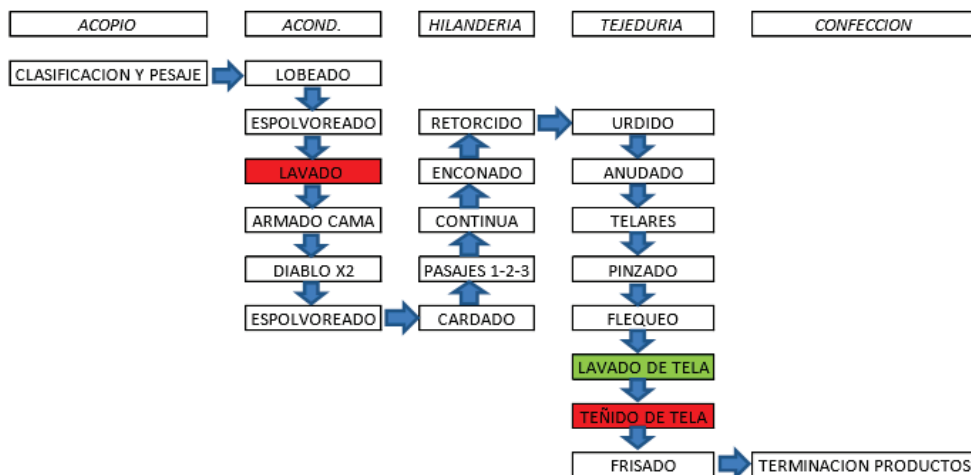


Fig. 3. Flujograma de operaciones elementales de producción.

Tabla 1. Características de consumo de agua y temperatura requerida de los procesos.

Operación	Frecuencia	Agua caliente	Tmax requerida	Tiempo requerido p/ Tmax	Operaciones por día	Agua caliente
Teñido	1 por semana	3.5 m <sup>3</sup> /operación	100 °C	75 min	2	7 m <sup>3</sup> /día
Lavado de fibra	1 por semana	2.5 m <sup>3</sup> /operación	50 °C	20 min	2	5 m <sup>3</sup> /día

Los procesos de lavado y teñido de la fibra son los que requieren una gran cantidad de agua caliente a diferentes temperaturas. Actualmente se provee de agua caliente por medio de una caldera que funciona con gas envasado y alta presión, esta caldera calienta el agua a una temperatura de 120°C y provee vapor para calentar el agua de las piletas de lavado y la batea de teñido.

En el caso del lavado, se hace burbujear vapor en la pileta llena de agua hasta obtener la temperatura de trabajo a 50 °C. Para el teñido, el vapor de agua proveniente de la caldera circula por un intercambiador inmerso en la batea y calienta el agua hasta los 90 °C.

OBJETIVO

Se propone desarrollar un concentrador solar de fabricación local para suplir la demanda de agua caliente de la empresa. Se caracteriza el concentrador construido para obtener los parámetros relativos a la eficiencia. Se realiza una simulación con los parámetros reales de funcionamiento para los requerimientos de agua caliente de la empresa y se compara con lo producido por un equipo de colectores del tipo heat pipe. Se hace un análisis comparativo de producción de agua caliente y costos de ambos sistemas.

CONCENTRADOR SOLAR DE BAJO COSTO

Descripción

El sistema de concentración propuesto se construyó con materiales de bajo costo. La estructura de soporte es de caño estructural de 20 x 20 mm. La superficie reflectante es de chapa aluminizada de alta reflectancia, cuya deformación parabólica se realizó con una distancia focal de 1.25 m. Se emplearon dos chapas de 2.5 x 1.25 m cada una, resultando en una superficie de apertura de 5.41 m<sup>2</sup>. El absorbedor, instalado en el foco, consiste en un tubo evacuado en cuyo interior se incorpora un serpentín helicoidal de cobre, por el cual circula el fluido caloportador (HTF; agua). Este sistema no posee seguimiento solar, por ahora, dado que es un prototipo experimental. Toda la estructura se apoya sobre dos soportes que permiten al conjunto ser rebatido manualmente en sentido longitudinal, a efectos de mantener el enfoque solar y la concentración de los haces en el absorbedor.

Ensayos de caracterización

A efectos de estudiar el performance del equipo y determinar las características de funcionamiento, se realizaron ensayos de rutina. Los principales parámetros estudiados fueron el rendimiento global, curva de temperatura vs. caudal, potencia térmica nominal, energía térmica recolectada, rango de temperatura de funcionamiento óptimo, capacidad de aprovisionamiento de agua caliente, coeficiente global de pérdidas, entre otros.

Las variables mensuradas fueron las siguientes; temperatura de entrada y salida del HTF, irradiancia global sobre plano de apertura, caudal másico de circulación y temperatura ambiente. Para la medición de temperaturas se emplearon termocuplas tipo K y termómetro marca Fluke 54 II, resolución 0.1 °C. El caudal másico se registró con un caudalímetro Sea modelo YF-S401, previamente calibrado mediante una placa Arduino Uno. La irradiancia se midió con un piranómetro marca LICOR modelo Li-200, conectado a un datalogger LogBox-AA.

Resultados experimentales

El rendimiento global se determina mediante la Ec. 1, donde m es el caudal másico en kg/s, Cp es la capacidad calorífica en J/kg°C, Tout y Tin son las temperaturas de salida y entrada del HTF en el absorbedor en °C, G es la irradiancia global horizontal medida en W/m<sup>2</sup> y A es la sección de apertura solar en m<sup>2</sup>.

$$\eta = \frac{m * Cp * (Tout - Tin)}{G * A} \tag{1}$$

Se consideró la irradiancia global dado que el instrumental empleado mide esa variable. Esto conlleva a determinar una eficiencia menor a la que podría determinarse habiendo medido la irradiancia directa normal al haz. No obstante, la Figura 4 muestra la curva de rendimiento instantáneo del concentrador ensayado, para día claro.

En la ecuación de regresión lineal se observa una eficiencia óptica de 23% aproximadamente. Siendo la eficiencia global no mayor al 25%. Esto se relaciona con las características constructivas del equipo; los haces solares reflejados no inciden en su totalidad en el absorbedor, ya que la superficie reflectante es metálica. Además, puede deducirse de la misma curva un coeficiente global de pérdidas promedio de 20 W/m<sup>2</sup>°C. No obstante, y de acuerdo a los resultados esperados, el equipo es capaz de proveer agua a temperaturas dentro del rango deseado de 70-100 °C, como se observa en la Figura 5. Para ello, se define el rango óptimo de caudal por equipo, que corresponde a 0.025 - 0.291 kg/min.

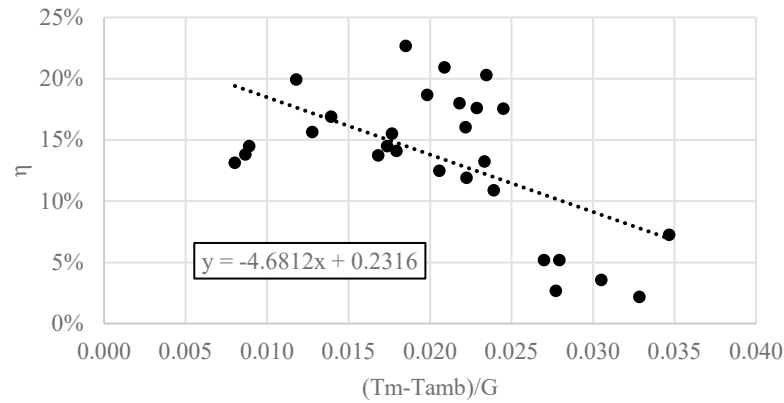


Fig. 4. Curva característica de rendimiento global.

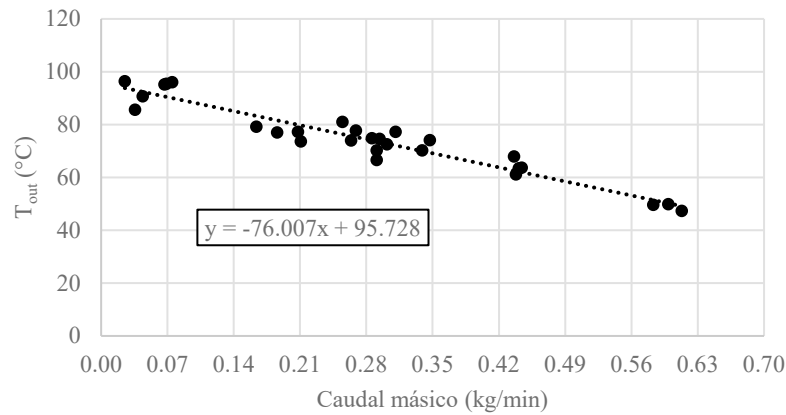


Fig. 5. Dependencia de la temperatura de salida con el caudal másico.

La caracterización del equipo propuesto en este trabajo constó además de la determinación de otros parámetros que se indican en la Tabla 2. Interesa resaltar la potencia térmica del equipo individual, cuyo valor máximo supera los 1000 W, siendo su promedio del orden de 800 W, y de la capacidad de abastecimiento de agua caliente, proyectada a un régimen de funcionamiento de 80 horas, que para una eficiencia diaria cercana al 20%, el equipo es capaz de generar 180 kg de agua caliente.

Tabla 2. Parámetros característicos del equipo concentrador.

Parámetro	Unidad	17/2/2020	28/2/202
Duración de ensayo	Minutos	122	97
Energía solar incidente	MJ	42	33
Energía térmica colectada	MJ	7.4	4.5
Rendimiento térmico diario	%	18	13
Potencia térmica máxima	W	1259	1196
Potencia térmica promedio	W	871	773
Producción de agua caliente	kg	46	2
Producción proyectada a 8 horas	kg	179	104

Prediseño de la instalación para agua caliente

La provisión de agua caliente para el proceso de limpieza y para la caldera se realizará desde un tanque de acumulación térmica de 3500 litros, el cual se aislará térmicamente para disminuir las pérdidas de energía hacia el ambiente. La energía térmica será dispensada mediante agua, a la cual se le adicionará un líquido anticongelante,

normalmente conocido como glicol. Es ésta agua la que circulará por el campo solar de colección. Por lo tanto, se tiene dos circuitos separados, por un lado circula el fluido caloportador, por el otro el agua de consumo. La transferencia térmica se realizará mediante un intercambiador de calor, según se aprecia en la Figura 6.

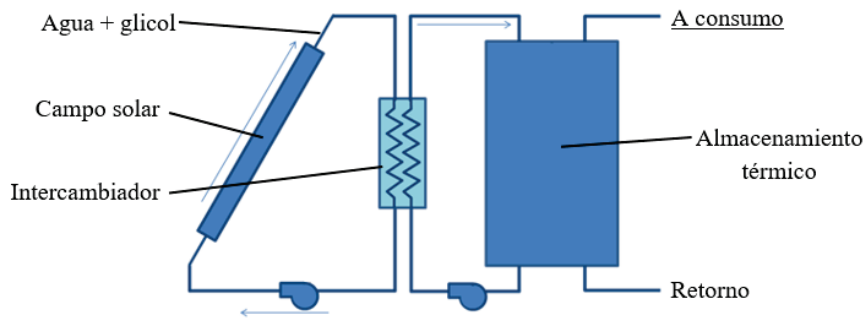


Figura 6. Esquema de instalación del campo colector-almacenamiento

Con colectores heat pipe. Se dimensiona el sistema para que sea capaz de proveer agua caliente a 90 °C, con su retorno al tanque de almacenamiento a 50 °C. El llenado del tanque está estipulado en tres ciclos solares, a través de un caudal másico de 0.03 kg/s, resultando una potencia térmica de 5 kW<sub>t</sub> para el calentamiento de la masa de agua. Si se considera que el sistema intercambiador-almacenamiento posee un rendimiento térmico del 90%, el sistema de colección solar deberá aportar una potencia térmica de 5.5 kW<sub>t</sub> en el fluido caloportador.

El campo solar se dimensiona en base a la superficie de colección necesaria, al rendimiento de los equipos colectores, a la potencia (o energía) térmica que el sistema deberá suplir y a la irradiación global de la locación. El rendimiento global de los equipos de captación solar depende de diversos factores que van más allá de la orientación con respecto al Norte y de la inclinación. En valores promedios, los fabricantes garantizan una eficiencia óptica en el rango del 60 – 80 % para una irradiancia global de 800 W/m<sup>2</sup> estables mientras dura el ensayo de calidad. Para el presente pre diseño, se consideró eficiencia menor, de un 40%, a efectos de considerar los días y estaciones del año en los que la irradiancia no llega al valor nominal de laboratorio.

Tabla 3. Determinación del número de equipos heat pipe necesarios.

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
Caudal másico hacia el tanque	$\dot{m}$	0.003	kg/s	$\dot{m}=\text{cte}$
Poder calorífico	$C_p$	4205	J/kg°C	$C_p=\text{cte}$
Rendimiento global de colector	$\eta_c$	40	%	$\eta_c=\text{cte}$
Irradiancia global de diseño	$G$	800	W/m <sup>2</sup>	$G=\text{cte}$
Potencia térmica en almacenamiento	$P_t$	5	kW	$P_t=\dot{m} \cdot C_p \cdot (t_d-t_r) \cdot 10^{-3}$
Eficiencia de almacenamiento+intercambiador	$\eta$	90	%	$\eta=\text{cte}$
Temperatura agua de retorno	$t_r$	50	°C	$t_r=\text{cte}$
Temperatura de agua de despacho	$t_d$	90	°C	$t_d=\text{cte}$
Potencia térmica del campo solar	$P_s$	5.5	kW	$P_s = P_t \cdot 100 / \eta$
Área total de colección	$A_c$	17.22	m <sup>2</sup>	$A_c = P_s \cdot 100 / (\eta_c \cdot G)$
Área de colección por equipo	$A_i$	1.9	m <sup>2</sup>	$A_i=\text{cte}$
Número de equipos	$N^\circ$	9	Equipos	$N^\circ = A_c / A_i$

Con concentradores cilindro parabólicos. Tomando como partida a la capacidad de almacenamiento de agua caliente que se necesita para los procesos (3500 kg, según Tabla 1) y la capacidad de producción energética de un solo equipo (7.4 MJ proyectado a 8 horas, según Tabla 2), se determina del número de equipos necesarios para abastecer de agua caliente al tanque principal. El procedimiento de cálculo se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Determinación del número de concentradores necesarios.

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
Capacidad de almacenamiento	m	3500	kg	$m=cte$
Poder calorífico	$C_p$	4205	J/kg°C	$C_p=cte$
Energía necesaria en tanque	$E_t$	589	MJ	$E_t=m \cdot C_p \cdot (t_d - t_r) \cdot 10^{-6}$
Eficiencia de aislación de tanque	$\eta_a$	95	%	$\eta_a = cte$
Eficiencia del intercambiador de calor	$\eta_i$	95	%	$\eta_i = cte$
Temperatura agua de retorno	$t_r$	50	°C	$t_r = cte$
Temperatura de agua de despacho	$t_d$	90	°C	$t_d = cte$
Energía desde campo solar	$E_s$	652	MJ	$E_s = E_t \cdot 10^4 / (\eta_a \cdot \eta_i)$
Energía proyectada a 8 horas	$E_p$	7	MJ	$E_p = cte$
Cantidad de días para arranque	n	7	Días	$n = cte$
Número de equipos	$N^\circ$	13	Equipos	$N^\circ = E_s / (E_p \cdot n)$

### COMPARACIÓN CON SISTEMAS COLECTORES HEAT PIPE

Los sistemas de colección solar para calentamiento de agua con mayor comercialización son aquellos que se componen de tubos evacuados. Dentro de ésta categoría, son comunes los del tipo heat pipe, o split. En esta sección se realiza la comparación entre un sistema heat pipe típico (modelo Hissuma Solar, [www.hissuma-solar.com.ar](http://www.hissuma-solar.com.ar)) y el concentrador aquí propuesto.

#### Performance de operación

La Figura 7 muestra la curva de rendimiento global de ambas tecnologías. Se observa que el prototipo en estudio presenta menor eficiencia y esto se debe a las razones ya especificadas en párrafos anteriores. Esta eficiencia es factible de ser mejorada con algunas modificaciones constructivas..

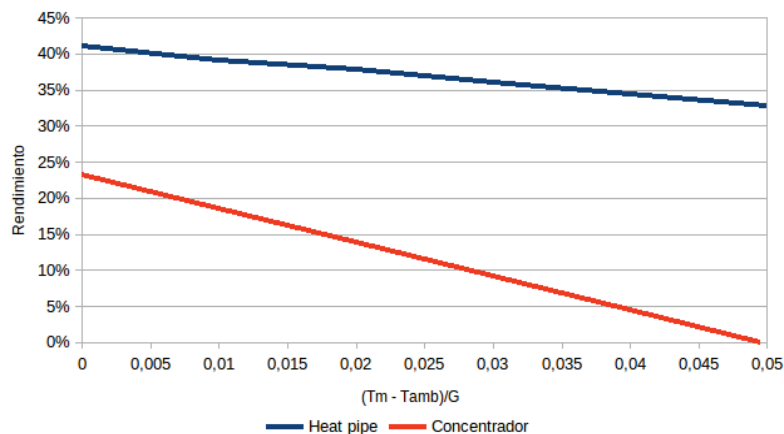


Figura 7. Comparativa entre curvas de eficiencia de ambas tecnologías.

Como ventaja del prototipo concentrador, se puede mencionar el bajo rango de caudal másico, 0.025 - 0.291 kg/min, o bien 1.5 - 17.5 kg/hora. Un sistema heat pipe tipo demanda un rango de caudal de 120 - 500 kg/hora, para que su operación sea óptima y no presente riesgos. Esta diferencia de caudal repercute directamente en el dimensionado de las bombas de impulsión y su consumo eléctrico, como así en las secciones mínimas de las cañerías de circulación y la pérdida de carga.

Costos

La comparación de ambas tecnologías según su costo se muestra en la Tabla 5. Se consideraron solo los costos de equipamiento, ya que los de montaje, operación y mantenimiento son idénticos. Puede verse que el sistema propuesto, mediante concentradores de bajo costo, es ligeramente más costoso que uno formado por colectores tipo heat pipe. La diferencia radica fundamentalmente en el sistema de seguimiento solar.

Tabla 5. Costo de equipamiento en USD, por tecnología.

Parámetro	Heat pipe	Concentrador
Número de equipos	9	13
Costo por equipo	944	641
Intercambiador	2200	2200
Campo solar	8500	8073
Almacenamiento y bombeo	2623	2623
Sistema de tracking	0	2502
Total	14268	16039

CONCLUSIONES

En el presente artículo se planteó la necesidad de transición energética en una industria textil, modificando el proceso térmico de aprovisionamiento de agua caliente para los procesos de lavado y teñido de las fibras. Se conoce la demanda energética (volumen de agua, temperatura, etc) y en base a estos datos se dimensionó un campo solar compuesto por concentradores cilindro parabólicos de bajo costo. Para caracterizar ésta tecnología, se construyó un primer prototipo el cual fue ensayado bajo condiciones reales de irradiación que permitió determinar la curva de eficiencia instantánea, la potencia térmica, el rendimiento global, el rango de temperatura y caudal óptimos, entre otros.

De los ensayos experimentales, se determinó que el equipo concentrador construido presenta una eficiencia relativamente menor a un equipo de colección pasiva o heat pipe. Esto se debe principalmente a las características de diseño: la superficie reflectante se conforma de dos chapas de alta reflectancia, montadas sobre una estructura curvada parabólicamente. Esto produce deformaciones en las chapas, ocasionando que no todos los haces reflejados inciden en el absorbedor. Este efecto óptico puede verse en la curva de regresión lineal de la Figura 4, siendo la eficiencia óptica de 23%. Por otro lado, se encontró que el coeficiente global de pérdidas ronda los 20 W/°Cm<sup>2</sup>, el cual es elevado en comparación de otras tecnologías. Y esto se debe a que no todo el calor es transferido al agua en circulación y la mayor parte de la pérdida térmica se produce por el extremo abierto del absorbedor. Como ventaja del diseño propuesto se puede mencionar el caudal de operación, el cual oscila en un rango del 1.5 - 17.5 kg/min para garantizar el rango óptimo de temperatura, muy por debajo del necesario para equipos comerciales. Esto trae aparejada la reducción de los costos de bombeo, o bien el empleo de una bomba de alto caudal para alimentar varios equipos de concentración en simultáneo.

La principal ventaja de éste diseño es su costo por equipo individual. Los valores obtenidos resultan promisorios para continuar con la puesta a punto y mejora de la eficiencia. Esto conlleva a un mejor performance de operación, con mayores caudales de trabajo, mayor capacidad en potencia y energía de aporte. La mejora de tales parámetros reducirá el número de equipos necesarios, y así la reducción significativa del costo total, pudiendo competir directamente con las tecnologías actuales. No obstante, la diferencia entre costos totales de ambas tecnologías es ligeramente inferior a los USD 2000, y se debe principalmente al sistema de seguimiento solar. Esto significa que puede lograrse el seguimiento solar implementando motores paso a paso y circuitería de control de bajo costo.

Como trabajo futuro resta mejorar el diseño constructivo de la superficie concentradora, de tal modo de asegurar un mayor porcentaje de haces solares incidentes en el absorbedor, disminuir las pérdidas térmicas implementando aislación en el conducto de salida como así el uso de aditivos o distintos fluidos caloportadores con mejores propiedades termofísicas.

#### REFERENCIAS

International Renewable Energy Agency (2019). Renewable energy auctions: Status and trends beyond price. ISBN 978-92-9260-190-4.

Gauché P., Brent A., Von Backström T. W. (2014). Concentrating solar power: Improving electricity cost and security of supply, and other economic benefits. *Development Southern Africa* 315:692–710.

Sarmiento N., Belmonte S., Dellicompagni P., Franco J., Escalante K. and Sarmiento J. (2019). A solar irradiation GIS as decision support tool for the Province of Salta, Argentina. *Renewable Energy*. 132, 68-80.

Carmona F., Orte P. F., Rivas R., Wolfram E. and Kruse E. (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground-based measurements and ERES\_SYN1deg data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 21, Issue 3, 211-217.