

XVI Congreso Ibérico y
XII Congreso Iberoamericano
de Energía Solar
Madrid, España, 20-22 junio 2018
©Asociación Española de Energía Solar

EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL LINEAL

Madrid I. *, Montijo N. *, Bojórquez E. *, Perez-Enciso R. *, Taddei P. **, Alfaro J. **,
Cabanillas R. *, Calleja R. *

*División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n,
Hermosillo, C.P. 83000, Sonora, México, ricardo.perez@unison.mx.

**Universidad de Michigan, 500 S. State Street, Ann Arbor, MI 48109 USA.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento térmico de un concentrador solar tipo Fresnel lineal, ubicado en la Plataforma Solar de Hermosillo, para esto, se adaptó un receptor en forma de serpentín hecho de cobre y pintado de negro. Se realizaron pruebas calorimétricas mediante la utilización de un sistema diseñado especialmente para ese fin. El sistema está instrumentado con sensores de temperatura y caudal, y mediante un adquisidor de datos se registraron las mediciones, para poder determinar el calor absorbido por el fluido de trabajo, que en este estudio se utilizó agua. Se obtuvieron resultados consistentes con el análisis teórico, pues se alcanzaron potencias de alrededor de 7kW térmicos. De igual manera se analizó el comportamiento al variar el caudal desde 11 hasta 1.5 lt/min, donde se observó mayores pérdidas de calor por convección y radiación cuando se trabajó a bajos caudales.

PALABRAS CLAVE: Calorimetría, Caracterización Térmica, Concentración solar, Fresnel, Transferencia de Calor.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the thermal behavior of a solar concentrator type linear Fresnel located in the Solar Platform of Hermosillo, for this, a receiver was adapted in the form of a coil made of copper and painted black. Calorimetric tests were performed using a system specially designed for this purpose. The system is instrumented with temperature and flow sensors, and through a data acquisition, the measurements were recorded in order to determine the heat absorbed by the working fluid, which in this study was used water. Consistent results with the theoretical analysis were obtained, since thermal powers of around 7kW were reached. Likewise, the behavior was analyzed by varying the flow from 11 until 1.5 l/min, where greater heat losses were observed by convection and radiation when working at low flow rates.

KEY WORDS: *Calorimetry, Fresnel, Heat Transfer, Solar concentration, Thermal Characterization.*

INTRODUCCIÓN

El sistema energético actual, como se sabe, está basado en el uso de combustibles fósiles como principal fuente de poder. En las últimas décadas la preocupación por el cuidado del medio ambiente ha crecido bastante por lo que políticos, investigadores y público en general se han enfocado en este problema considerando temas como energía, medio ambiente y desarrollo sustentable. La investigación de nuevas fuentes de energía alternas renovables va en crecimiento y cada vez hay más interés en ellas ya que la demanda actual energética exige soluciones más viables, y los recursos de los que más se depende son el petróleo, carbón y gas natural con un 40.8%, 15.5% y 10.1% respectivamente (International Energy Agency, 2013) y como es de saberse estos recursos no se regeneran y las reservas de éstos son limitadas.

Este trabajo se enfocará en las energías solares, ya que este tema es de gran interés por parte la una Universidad de Sonora, con la justificación de que Sonora es una región que cuenta con un recurso solar más que necesario para la investigación y aprovechamiento de este tipo de tecnologías. La energía solar es por mucho el mayor recurso explotable, proveyendo más energía a la tierra en una sola hora que la necesaria para satisfacer la demanda energética mundial durante todo un año. (Lewis & Nocera, 2006). Las tecnologías cuyo principio se basa en aprovechar la radiación del sol se clasifican en sistemas de tres tipos, fotovoltaicos, fotoquímicos y fototérmicos.

Sistemas Fototérmicos con Concentración Solar.

Las aplicaciones térmicas están atrayendo cada vez más atención en el campo de la investigación de energía solar, debido a su alto rendimiento en la densidad de almacenamiento de energía y la eficiencia de conversión de energía (Tiana & Zhaob, 2013).

Estos sistemas tienen como objetivo concentrar la radiación del proveniente del Sol para aumentar la densidad de flujo radiativo mediante dispositivos ópticos que redirigen los rayos del Sol hacia un receptor, estos dispositivos pueden operar mediante refracción o reflexión. Esta energía concentrada se transmite a un fluido de trabajo, el cual puede solo aumentar su temperatura para su posterior uso en diferentes sectores, o pasar a la fase gaseosa en forma de vapor y ser aprovechado para transmitir su energía en forma de energía potencial a una turbina, la cual, a su vez, la transforma a energía eléctrica.

Sistema de Concentración Solar tipo Fresnel.

Esta constituido típicamente por una serie de espejos planos con una separación entre ellos, montados en una base plana; cada línea de espejos tiene cierta inclinación que depende del ángulo de incidencia de los rayos del Sol, la cual se va ajustando en el transcurso del día para ser dirigida hacia un receptor. Como se muestra en la Figura 1.

La tecnología de concentracion solar lineal tipo fresnel es aun joven, aun asi ya ha tomado lugar en el campo de los sistemas de concentracion solar (Ghodbane, 2016). En general y de acuerdo con las búsquedas bibliográficas, el rendimiento de este tipo de concentrador varía entre 30% y 40%. (Garcia, 2007).

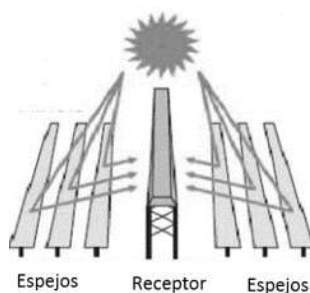


Fig. 1. Representación del funcionamiento de los sistemas lineales tipo Fresnel.

Hoy día en que muchas instituciones internacionales están invirtiendo y trabajando para desarrollar esta tecnología, por ejemplo, en Almería, la empresa alemana NOVATEC BIOSOL construyó la primera planta comercial de reflectores Fresnel en el mundo. Esta estación eléctrica tiene una capacidad de 1.4 MW, y desde marzo de 2009, su energía suministra las líneas eléctricas locales (Centrales à réflecteurs de Fresnel Outils solaire, 2012). La empresa Estadounidense Areva desarrollo una planta de 5 MW utilizando este tipo de tecnología en Bakersfield, California, además se prevee construir otra estación en Australia (Centrales à réflecteurs de Fresnel Outils solaire, 2012).

EQUIPOS Y METODOLOGIA.

Concentrador lineal Fresnel (CLF) de la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH).

El Concentrador Lineal Fresnel (CLF) (ver Figura 2), está compuesto de 11 líneas de espejos, cada línea de espejos consta de 2 espejos de 0.5 m de ancho por 2 m de largo, con una separación entre ellos de 0.1 m. Cada línea de espejos se mueve mediante un motor de pasos y una transmisión reductora. Los motores son controlados por medio de un Arduino MEGA. También cuenta con un receptor en forma de serpentín con tubos de cobre de 19 mm de diámetro, a una distancia de 4 m de altura respecto al nivel en que se encuentran los espejos. El receptor cubre un área de 1 m². En la zona del receptor se tiene un reflector secundario que permite aprovechar radiación solar desbordada.



Figura 2. CLF ubicado en la PSH de la Universidad de Sonora.

Sistema de Caracterización Térmica.

Para las pruebas experimentales, se construyó un equipo de calorimetría (Figura 3), el cual consiste en dos termo tanques de 150 L de capacidad, interconectados entre sí, mediante válvulas de bola para direccionar el fluido térmico (agua) y válvulas de flecha para regular el caudal. El equipo esta instrumentado con sensores que permitieran conocer las temperaturas y el caudal del agua. Para medir las temperaturas del agua a la entrada y salida del receptor, se utilizaron sensores tipo PT100 (Figura 4), y para la medición del caudal de agua se instaló un flujómetro Omega FPR303. La recolección de datos se realizó mediante un controlador NI MyRio y una computadora como interfaz, para acceder a los valores obtenidos (Figura 5). Además, una bomba con capacidad de operar a temperaturas de hasta 110 °C. Para evitar trabajar con temperaturas mayores a las permitidas por la instrumentación, se adecuo un radiador de automóvil como disipador de calor.

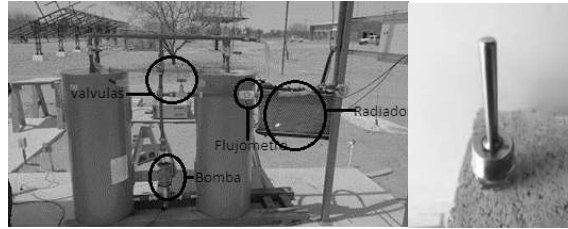


Fig. 3 (izquierda). Sistema para pruebas calorimétricas. Fig. 4 (derecha). Sensor de Temperatura PT100

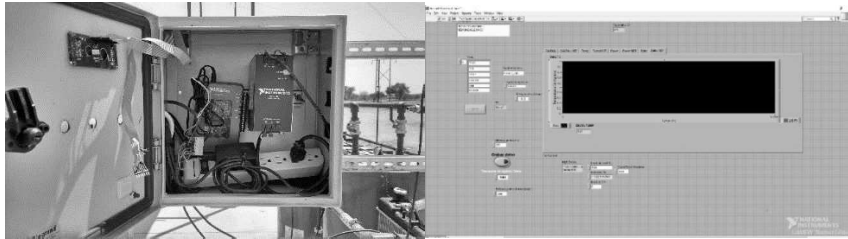


Fig. 5. Sistema de adquisición de datos.

RESULTADOS.

Eficiencia Térmica.

Para determinar la eficiencia térmica del CLF es necesario definir como calor emitido (Q_e) al calor por radiación reflejado por todos los espejos del concentrador, éste se puede determinar conociendo las propiedades geométricas y físicas de los elementos ópticos del sistema de concentración, de acuerdo con la ecuación 1:

$$Q_e = I_b A_e \rho_e \quad (1)$$

Donde: A_e es el área efectiva de captación (22m^2), ρ_e es la reflectividad de los espejos (0.90), I_b es la radiación solar directa DNI en W/m^2 .

Para determinar la potencia térmica absorbida (Q_c) en el receptor, se midieron las siguientes variables: el u las temperaturas de la entrada (T_{in}) y la salida (T_{out}) del fluido de trabajo (agua), y considerando su calor específico (C_p), se calculó por medio de la ecuación (2):

$$Q_c = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

Dependiendo de la capacidad que tenga el receptor para absorber la radiación solar concentrada, se puede determinar su eficiencia térmica (η_t) mediante la ecuación (3).

$$\eta_t = \frac{Q_c}{Q_e} \quad (3)$$

Para analizar los datos obtenidos en las pruebas calorimétricas, se generaron gráficos con esa información, donde se pueden observar los cambios de las características térmicas del sistema al hacer variar el caudal del fluido de trabajo. En este tipo de pruebas se trabajó en el rango de caudal que la bomba utilizada en el experimento proporciona, el cual es hasta los 11 lt/min.

En la Tabla 1 se muestra la variación de los parámetros medidos y calculados en el punto máximo donde el sistema logro la estabilidad por algunos minutos. Así como los valores calculados mediante las ecuaciones (1) y (2) del calor emitido y el calor absorbido. Donde es notorio que la disminución de la eficiencia del colector se debe al aumento en las pérdidas al ambiente, derivadas de la disminución del caudal; ya que el DNI permanece prácticamente constante.

Tabla 1. Variación de calor absorbido, diferencia de temperaturas y eficiencia óptica a diferentes caudales

Caudal (lt/min)	Delta T (°C)	DNI (kW/m ²)	Calor absorbido (kW)	Calor emitido (kW)	Eficiencia térmica (%)
11	10.5	950	7.4	18.81	39.34
9	11.2	950	6.6	18.81	35.08
7.5	13	950	6.2	18.81	32.96
6	14	950	5.8	18.81	30.83
4.5	18	950	5.2	18.81	27.64
3	26	950	5	18.81	26.58

Nota: se realizaron los cálculos con los valores de $A_e = 22\text{m}^2$, $\rho_e = 0.9$, $C_p = 4.18 \frac{\text{J}}{\text{g.K}}$.

Las pruebas calorimétricas se pueden observar en el Anexo 1.

Perdidas de Calor por Convección y Radiación

Para demostrar físicamente el comportamiento térmico del sistema se hizo el análisis de las pérdidas de calor, tanto por convección natural, como por radiación.

Para las pérdidas de calor convectivas, es necesario definir los números adimensionales: número de Reynolds (Re_D), número de Prandtl (Pr) y el número de Nusselt promedio ($\overline{Nu_D}$), utilizados para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección promedio ($\bar{h}$), los cuales se definen a continuación:

$$Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} \quad (4); \quad 4Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5); \quad \overline{Nu_D} = \frac{\bar{h} D}{k} \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del aire, u_∞ es velocidad del aire, D es el diámetro de la tubería, C_p es el calor específico del aire, μ es la viscosidad dinámica y k es la conductividad térmica, los cuales son representados en la tabla 2. Cabe mencionar que las propiedades fueron evaluadas a la temperatura de película $T_f = \frac{T_{amb} + T_s}{2}$, para esto fue necesaria la suposición de que el receptor se mantiene con una temperatura de superficie (T_s) constante a los diferentes valores de caudales analizados. La temperatura se midió con una cámara termográfica y la velocidad el aire por un anemómetro.

Tabla 2. Propiedades del aire a la presión de 1 atm.

Caudal (L/min)	Ts (°C)	Tamb (°C)	Tf (°C)	ρ (kg/m³)	μ (kg/m.s)	Cp (J/kg.°C)	K (W/m.K)	Pr
11	50	37	43.5	1.1144	1.93E-05	1007	0.0266	0.730
6	58	37	47.5	1.1005	1.95E-05	1007	0.0270	0.727
1.5	70	37	53.5	1.0804	1.98E-05	1007	0.0276	0.721

Datos obtenidos de la tabla A-15 del libro *Transferencia de Calor de Yunus A. Cengel*.

Teniendo los datos mostrados anteriormente en la tabla 2, y mediante una serie de pasos descritos a continuación, fue posible determinar el valor de las pérdidas de calor por convección del receptor.

1. Determinar los números de Reynolds y Prandtl con los datos obtenidos de la tabla 2 y los datos obtenidos experimentalmente.
2. Haciendo uso de la correlación propuesta por Churchill y Bernstein para flujo cruzado sobre cilindros, se puede determinar de manera teórica el número de Nusselt promedio.

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (7)$$

3. Con la definición del número de Nusselt dada en la ecuación (6) se determina el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección promedio ($\bar{h}$).
4. Se determinan las pérdidas de calor convectivo de acuerdo con la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = \bar{h} A_s (T_s - T_{amb}) \quad (8)$$

Para las pérdidas de calor por radiación, se determinaron mediante la ley de Stefan-Boltzmann, donde dichos cálculos se hicieron con la misma suposición anterior de que la temperatura de la superficie (T_s) del receptor se mantiene constante.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (9)$$

Donde ε es la emisividad de la superficie (pintura negra= 0.98), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann y A_s es el área de superficie.

Los cálculos teóricos de las pérdidas de calor por convección y radiación se ven plasmados en la Tabla 3, donde se puede observar el incremento de estos valores al reducir el flujo volumétrico de agua a través del receptor.

Tabla 3. Resultados de cálculo de pérdidas de calor en el receptor por transferencia de calor convectiva y radiativa.

Caudal (lt/min)	DeltaT (°C)	DNI (W/m^2)	Qe (kW)	Qconv (kW)	Qrad (kW)	Qtotal (kW)
11	10.5	970	7.4	3	1.8	12.2
6	15	970	5.8	6	2	13.8
1.5	31	970	3	12	2.3	17.3

El incremento del valor de pérdidas de calor se debe en su mayoría al incremento de la diferencia de temperaturas entre la superficie del receptor y los alrededores, debido a que la capacidad de remover calor del agua es insuficiente. Además, que las variaciones bruscas en la velocidad del aire tienen mayor efecto en el coeficiente de calor convectivo cuando se trabaja a caudales bajos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Podemos concluir que el sistema tiene un mejor comportamiento térmico si se manejan caudales altos, ya que se alcanzó una potencia absorbida de hasta 7.5 kW y una eficiencia térmica de casi 40%, mientras que a bajos caudales la eficiencia baja hasta un 26 %. Como podemos ver en la Figura 6, la eficiencia térmica tiene un comportamiento casi lineal contra el caudal, en el rango de caudales con los que se trabajó en este proyecto.

Para demostrar el porqué del decrecimiento de la eficiencia térmica, se hizo un análisis teórico de las pérdidas de calor convectivas y radiativas, para poder determinar si estas tienen un efecto significativo en el sistema, donde se pudo determinar que las pérdidas mayores se dan debido a la convección. Esto se debe, como se mencionó anteriormente, al incremento de la temperatura de la superficie del colector, pero también se debe en su mayoría a la velocidad del viento. En la figura 7 se puede observar como aumentan las pérdidas convectivas con el incremento de la velocidad del aire, y como éstas tienen más efecto al trabajar a bajos caudales.

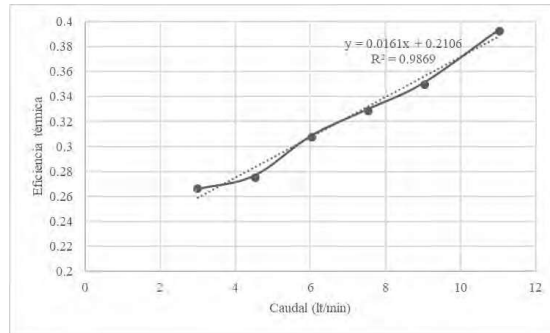


Fig. 6. Variación de la eficiencia térmica con respecto al caudal de trabajo.

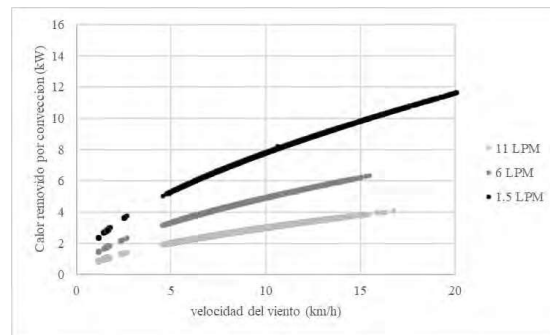


Fig. 7. Perdidas de calor convectivas a diferentes caudales y velocidad de viento.

Una última recomendación para evitar tantas pérdidas de calor convectivas es cubrir el receptor con algún cristal que permita el paso de toda la energía del sol reflejada, y que a su vez no permita el contacto directo con el aire. Esto puede mejorar el rendimiento del sistema aún más.

REFERENCIAS

- Cengel, Y. A. (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications. Mc Graw-Hill Education.
- Centrales à réflecteurs de Fresnel Outils solaire. (2012). Obtenido de : <http://outilssolaires.com/developpement-durable/energie-solaire/reflecteurs-fresnel> p156.
- G r i , P. 2007 . Outil s 'év u tion te hni o-é onomique et ' i à o n eption es centrales solaires thermodynamiques du futur. *Energétique et Environnement*, 35.
- Ghodbane, M. (2016). A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water:. *Case Studies in Thermal Engineering*, 176-186.
- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Prentice Hall.
- International Energy Agency. (2013). World Energy Outlook. Statics.
- Lewis, N., & Nocera, D. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar. *PNAS*.
- Tiana, & Zhaob. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 538,553.