

POTENCIA Y EFICIENCIA DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FRESNEL DE DOBLE REFLEXION

M. A. Flores¹, C. Cadena², L. R. Saravia² y O. Escalón¹

¹Sección de Energía, Escuela de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Tel. móvil: + (504) 9994.9693. e-mail: marcoaflores@yahoo.com

²Instituto de Investigación en Energía No Convencional, INENCO (UNSa-CONYCET)
Universidad Nacional de Salta, Argentina

Recibido 26/07/17, aceptado 21/09/17

RESUMEN. En este trabajo se determina la potencia y eficiencia de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión. Se hizo circular un fluido caloportador por un intercambiador de calor (serpentín) colocado en el volumen focal del concentrador y un recipiente receptor del aceite, para mantener un flujo constante se utilizó una bomba mecánica. En el proceso se midió la radiación solar, las temperaturas de entrada y salida del fluido. La eficiencia promedio del concentrador obtenida es de 16% y la potencia promedio de 335 W.

Palabras clave: Concentrador Fresnel, doble reflexión, temperatura, aceite térmico, potencia y eficiencia.

INTRODUCCIÓN

El concentrador solar de Fresnel en estudio, previamente fue diseñado y construido con el fin de ser utilizado como una cocina solar comunal, presentando muy buenas condiciones de operación (Saravia, 2002; Saravia y Flores, 2004), dispositivo del cual nos interesó conocer su potencia y eficiencia, con el fin de ser utilizado para aplicaciones agroindustriales.

Es sabido que para determinar la eficiencia térmica de los colectores solares, existen varios métodos, entre ellos el propuesto por Duffie y Beckman (1991) que utiliza de referencia la temperatura del fluido a la entrada del absorbedor o colector y Rabl (1985) que utiliza la temperatura media del fluido, metodología que es propicia para cuando la velocidad del fluido es variable durante el experimento. En ambos casos el procedimiento es el mismo (ASHRAE, 1987), se bombea un fluido térmico desde un reservorio, el cual se hace pasar por el colector y se regresa al reservorio para calcular el calor útil del colector (Saravia et al., 2006) utilizando la Ecuación (1),

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p\Delta t, \quad (1)$$

En donde:

\dot{m} : flujo másico del fluido de trabajo,

C_p : calor específico a presión constante en el instante que se mide la temperatura,

$\Delta t = (t_s - t_e)$ variación entre la temperatura del fluido a la entrada y la temperatura del fluido a la salida del absorbedor o colector.

Por otra parte, la Ecuación (2) se utiliza para determinar la eficiencia instantánea del concentrador, siendo necesario conocer el área efectiva del colector A_c , la radiación solar total G_t y el calor útil \dot{Q}_u .

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_t} \quad (2)$$

Para encontrar el calor útil (\dot{Q}_u) y la eficiencia (η), se utilizan las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. La metodología se describe a continuación: Cada cinco minutos se midió el flujo másico (\dot{m}), su temperatura en la entrada (t_e) y la salida (t_s) del serpentín instalado en el absorbedor; además, se midió la radiación global (G_t). Las temperaturas alcanzadas en el fluido caloportador suelen ser mayores a los 100°C, por lo que para evitar inversiones de energía en los cambios de fase, se usó aceite térmico, en nuestro caso de la marca de Shell®, del cual se conocen las propiedades físicas proporcionadas por el fabricante: Densidad (ρ) y capacidad calorífica (C_p) en función de su temperatura.

DESCRIPCIÓN DEL CONCENTRADOR Y EL EQUIPO DE PRUEBA

En la Figura 1, se muestra el concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, su estructura y el absorbedor. En el volumen focal del concentrador se puede observar el dispositivo utilizado para determinar la potencia y eficiencia del concentrador. El mismo consiste en una espira doble de aluminio, recubierta con pintura negra resistente a altas temperaturas.



Figura 1. Concentrador solar de Fresnel

En la Figura 2, se puede apreciar la doble espira por donde se hace circular el aceite térmico, a partir de cuyas variaciones de temperatura se determina la potencia y eficiencia térmica del concentrador. Para mantener con velocidad (aproximadamente) constante el flujo del aceite térmico, éste se hace circular por la serpentina mediante el uso de una bomba eléctrica de pequeña potencia. El aceite térmico estuvo almacenado en un depósito de 20 litros sin aislación térmica, manteniéndose a presión atmosférica. Desde el mismo, mediante la bomba sumergible, se inyecta el aceite a la serpentina. En la Figura 3, se observa el recipiente y el sistema de bombeo del aceite desde el recipiente hasta la espira.



Figura 2. Espira doble absorbidora colocada en el volumen focal del concentrador



Figura 3. Sistema de almacenamiento y circulación del aceite

La bomba eléctrica hace fluir el aceite térmico a la serpentina mediante mangueras instaladas para esa función. En las mangueras de acceso y salida del serpentín se instalaron termopares *Tipo K* para medir las temperaturas de entrada y salida. La radiación solar sobre el plano del concentrador se midió con un piranómetro *Kipp and Zonen CMP-6* y un voltímetro para transformar las lecturas del piranómetro en μV a W/m^2 .

Por otra parte, el caudal se midió con una probeta graduada de 2.000 ml. El tiempo fue medido, durante todo el experimento con un cronómetro electrónico. En la Figura 4 se puede observar las mangueras de conexión al serpentín ya instalado y también la conexión de los termopares.



Figura 4. Entrada y salida de aceite al espiral y termopares

ENSAYO EXPERIMENTAL

El primer paso para determinar la eficiencia del concentrador doble de Fresnel, consistió en medir la cantidad de energía que absorben 100 cm^3 el fluido de trabajo a lo largo del recorrido por el serpentín. Para ello se hace lecturas de la temperatura ambiente, temperatura en el fluido a la entrada y salida del serpentín, simultáneamente se registra la radiación solar incidente en el plano del concentrador y el tiempo necesario para que circulen los 100 cm^3 de aceite por el sistema.

El fluido de trabajo utilizado fue: aceite Shell Térmico B. En la Tabla 1, se muestran sus propiedades físicas del mismo a distintas temperaturas. Estos datos se tomaron de gráficos del fabricante utilizados en una publicación anterior.

Para determinar los valores de \dot{m} en cada instante, se utilizó la Tabla 1 con el fin de establecer la densidad del aceite a la temperatura de la medición y utilizando la Ecuación (3) se calculó su valor.

$$\dot{m} = \rho \phi \quad (3)$$

Donde ϕ es el caudal que fluye por el serpentín. Para C_p y ρ , se grafican los valores obtenidos de la Tabla 1, observando que tienen un comportamiento lineal. Mediante (3) y con los resultados de las regresiones se obtienen los valores que se necesitan para realizar los cálculos en (1) y (2).

En las figuras 6 y 7 se muestra el comportamiento lineal de los parámetros físicos que se requiere determinar en el aceite usado

En la Figura 7, se observa el calor específico C_p del aceite térmico. Puede notarse que a valores superiores a 165°C, pierde su propiedad de linealidad con respecto a la temperatura. Para el caso que nos ocupa, la temperatura máxima alcanzada por el aceite fue 166 °C, valor considerado aceptable para esta experiencia, porque su mayor rango de temperaturas no sobrepasa ése valor crítico, y su temperatura casi siempre permaneció en los niveles de su comportamiento lineal como se puede apreciar en la Figura 7. Para esta figura, como en otras que se presentarán, los puntos obtenidos de las mediciones son unidos mediante un cálculo empleado en Mathematica 7.0 (el Interpoler), generando valores entre los puntos, y haciendo que estos valores tengan un comportamiento suave entre ellos

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad Calorífica (kJ/kg)
0	880	1.8
50	845.5	2
100	811	2.17
150	776.5	2.36
200	742	2.45
250	707.5	2.73
300	673	2.92

Tabla 1. Propiedades del aceite Shell térmico B

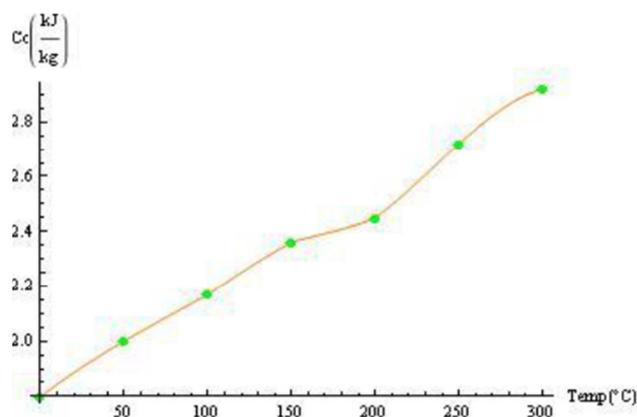


Figura 6. Densidad del fluido de trabajo en función de la temperatura

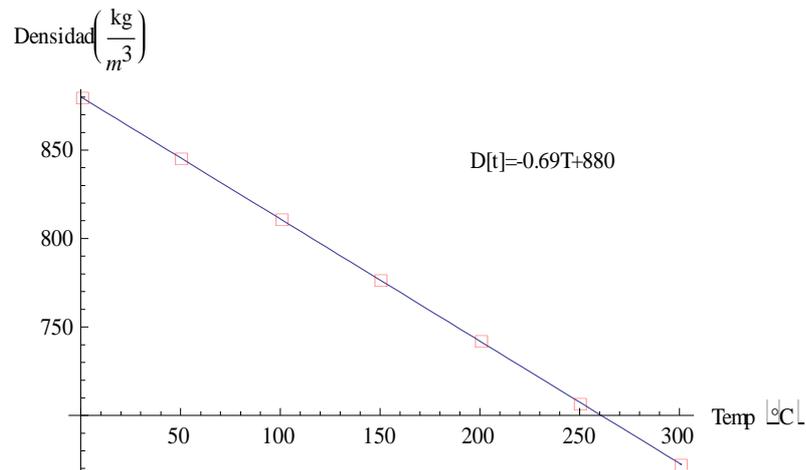


Figura 7. Capacidad calorífica del aceite en función de la temperatura

RESULTADOS

Se realizaron lecturas en intervalos de cinco minutos para todos los parámetros considerados: temperaturas en la entrada y salida del serpentín, temperatura ambiente, la radiación perpendicular al plano del concentrador y el tiempo requerido para circular por el serpentín 100 ml de aceite. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Hora H	T_{entrada} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{Salida} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ambiente} ($^{\circ}\text{C}$)	$t_{100\text{ml}}$ (s)	Radiación (W/m^2)
13:28	26	26	0	25	30	1,044.26
13:29	24	92	68	25	30	1,041.15
13:34	24	88	64	26	31.61	1,043.26
1339	26	100	74	26	43.83	1,044.26
13:44	27	117	90	24	49.1	1,040.97
13:49	27	122	95	28	53	1,037.05
13:54	28	130	102	29	54.71	1,041.56
13:59	29	124	95	29	57	1,048.24
14:04	30	123	93	25	51.69	1,036.93
14:09	30	132	102	24	52.59	1,034.70
14:14	31	141	110	25	64.07	1,035.40
14:19	31	152	121	24	67.89	1,034.23
14:29	32	141	109	25	60	1,026.96
14:34	33	144	111	25	70	1,030.07
14:39	33	158	125	26	70	1,022.57
14:44	34	166	132	27	70	1,021.34

Tabla 2. Resumen de las mediciones

En la ecuación (3) se observa que el flujo másico \dot{m} depende directamente de la densidad del aceite y de su flujo. En la Tabla 2, se observa que al aumentar la temperatura en la salida del fluido de trabajo, el tiempo para fluir 100 ml del aceite aumenta hasta en un 57%, estabilizándose a partir de una

temperatura de salida de 144 °, y hasta los 166 °C que fue máxima temperatura de salida obtenida. De lo anterior fácilmente se observa que al disminuir la densidad y el caudal, el flujo másico disminuye. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la radiación solar durante el desarrollo de las mediciones. Se observa que se mantuvo casi constante apenas por encima de 1,000 W/m².

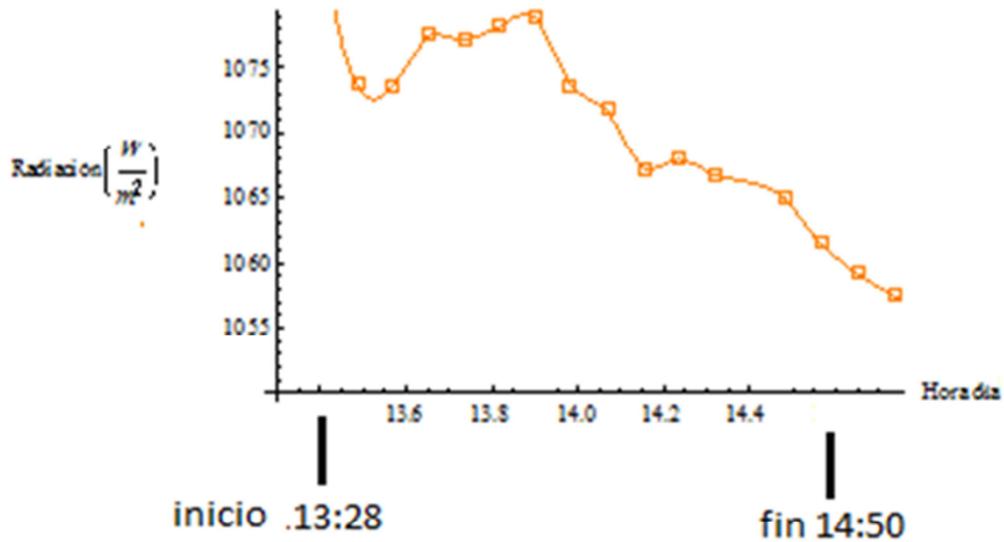


Figura 8. Radiación solar el día del experimento

En la Figura 9, se muestra el comportamiento de las temperaturas registradas. Como se puede apreciar, todas las temperaturas, a excepción de la temperatura ambiente, tienen una tendencia al alza conforme el tiempo avanza. También se observa un leve incremento en la temperatura de entrada del aceite a la espira, efecto debido a la recirculación del aceite por el serpentín. La línea superior (roja) corresponde a la temperatura de salida del aceite, la siguiente (azul) al Δt de la temperatura de entrada y salida del aceite, la siguiente (verde) a la temperatura de entrada del aceite y la inferior (naranja) a la temperatura ambiente.

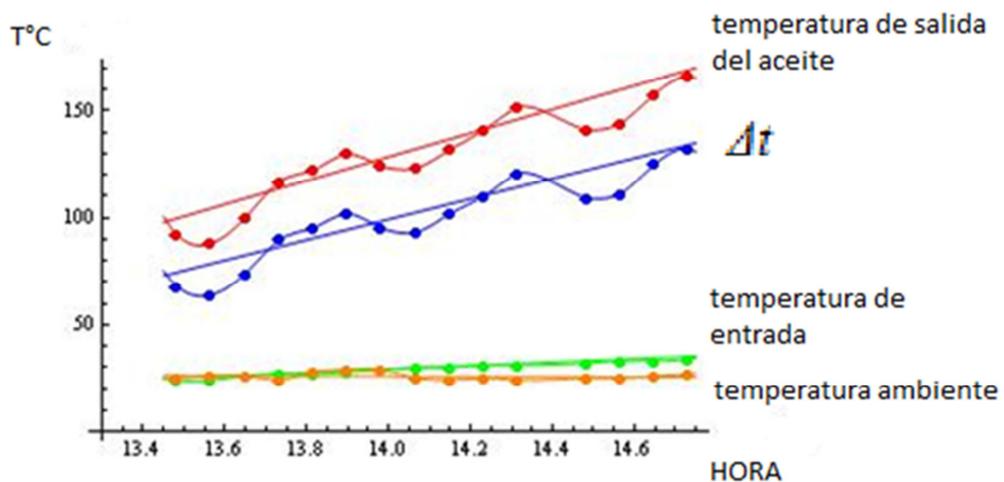


Figura 9. Temperaturas en función del tiempo

En la Tabla 3, se presentan los resultados de los cálculos realizados a partir de las variables de entrada en las ecuaciones (1) y (2).

Hora H	T _{entrada} (°C)	T _{Salida} (°C)	ΔT (C°)	T _{ambiente} (°C)	t _{100ml} (s)	Radiación (W/m ²)
13:28	26	26	0	25	30	1,044.26
13:29	24	92	68	25	30	1,041.15
13:34	24	88	64	26	31.61	1,043.26
1339	26	100	74	26	43.83	1,044.26
13:44	27	117	90	24	49.1	1,040.97
13:49	27	122	95	28	53	1,037.05
13:54	28	130	102	29	54.71	1,041.56
13:59	29	124	95	29	57	1,048.24
14:04	30	123	93	25	51.69	1,036.93
14:09	30	132	102	24	52.59	1,034.70
14:14	31	141	110	25	64.07	1,035.40
14:19	31	152	121	24	67.89	1,034.23
14:29	32	141	109	25	60	1,026.96
14:34	33	144	111	25	70	1,030.07
14:39	33	158	125	26	70	1,022.57
14:44	34	166	132	27	70	1,021.34

Tabla 3. Potencia y eficiencia del concentrador

El comportamiento de la potencia (calor útil) se muestra en el Figura 10 y el de la eficiencia (η) en la Figura 11, donde se observa que ambos valores decrecen conforme se incrementa la duración del experimento. Los valores puntuales de potencia y eficiencia, en las gráficas, están unidos mediante una línea continua obtenida con la función Interpolar de Mathematica 7.0, la línea recta entre ellos nos representa la tendencia decreciente de los valores en su conjunto, incluyendo la ecuación que predice su valor obtenido mediante una regresión lineal. En ambas gráficas, la función Interpolar no obtiene los valores cercanos al primer punto, situación debida a que la rutina que usa el programa en su línea de comando no genera valores para ese dominio en específico.

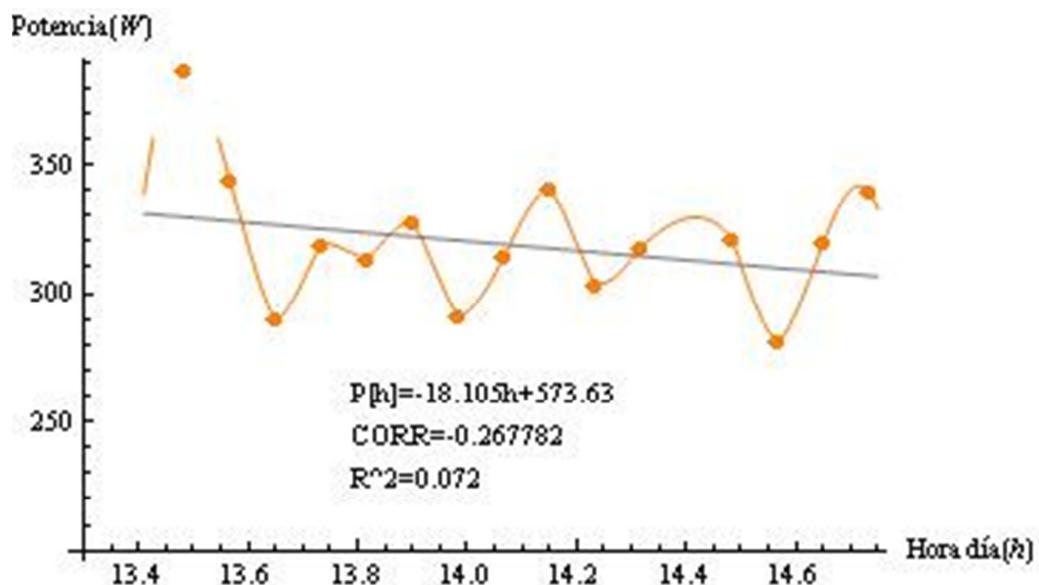


Figura 10. Potencia del concentrador en función del tiempo

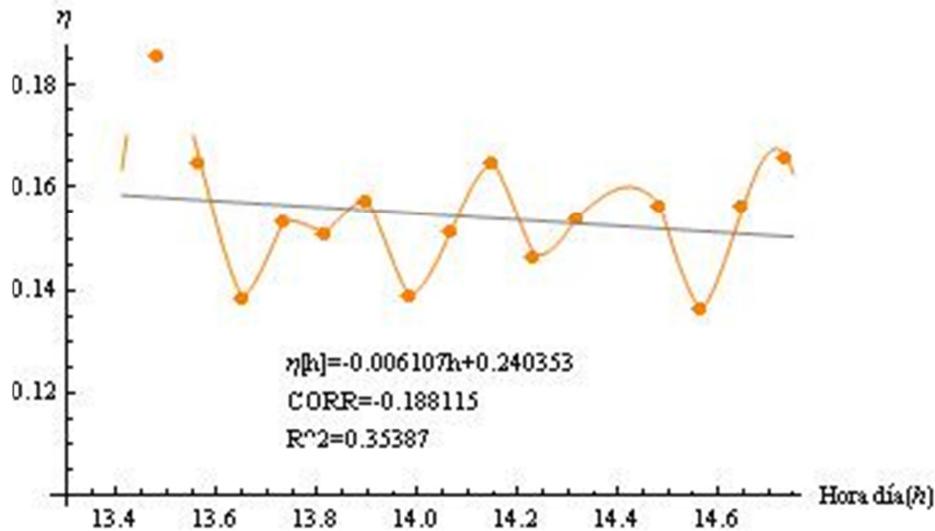


Figura 11. Eficiencia del concentrador en función del tiempo

En las figuras 12 y 13 se observa el comportamiento de la potencia y eficiencia del concentrador según la relación de cambio entre las temperaturas de salida y entrada del fluido de trabajo. Observando que para valores menores de Δt tanto la eficiencia como la potencia son mayores y lo contrario para Δt mayor.

La Figura 14 muestra la potencia del concentrador en función de la temperatura de salida t_s . Se puede observar que pese a dispersión de los datos, potencia es decreciente con respecto de la temperatura. La única explicación posible encontrada más allá de los posibles errores experimentales podría estar en los cambios de las propiedades del aceite como se explica a continuación.

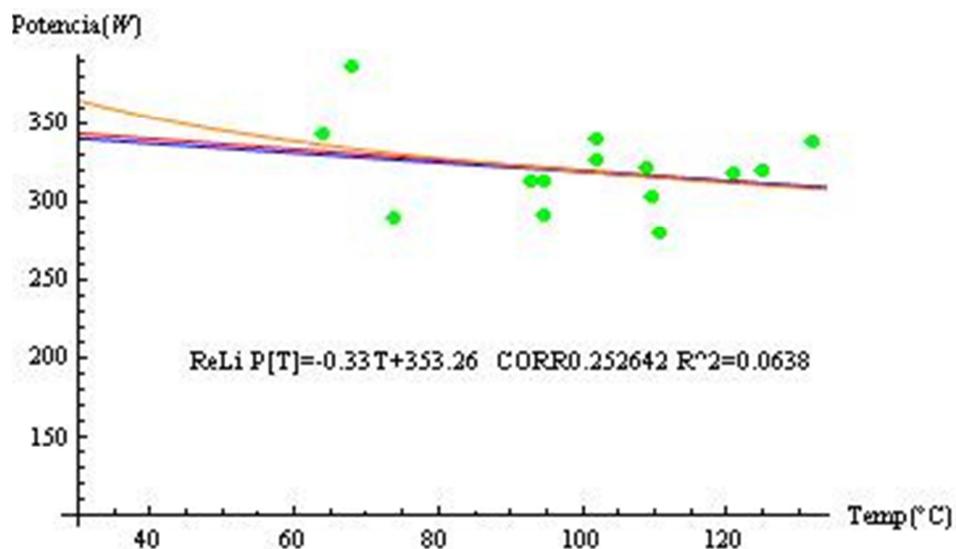


Figura 12. Potencia del concentrador en función de Δt

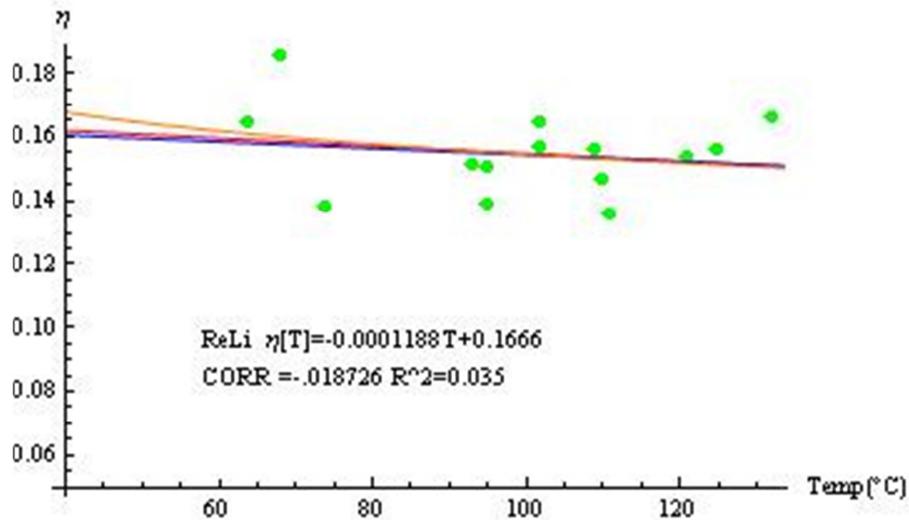


Figura 13. Eficiencia del concentrador en función de Δt

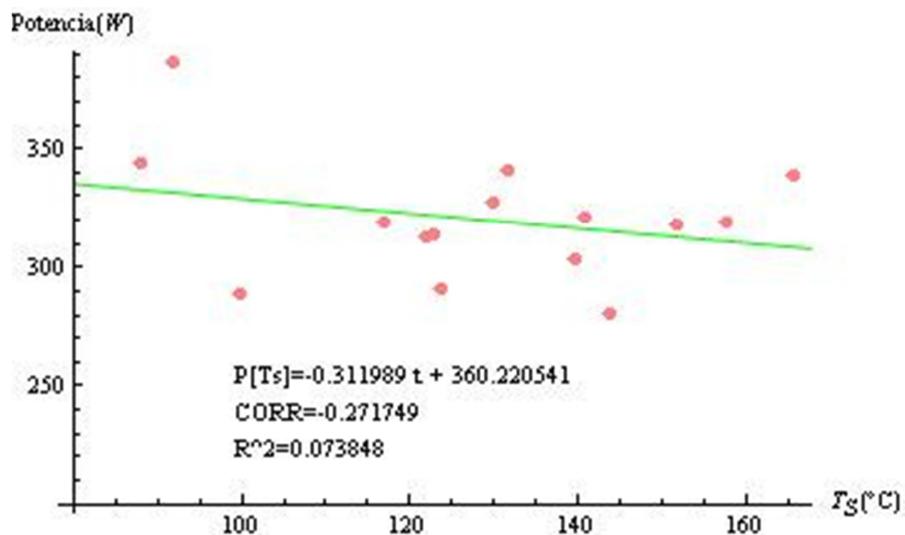


Figura 14. Potencia del concentrador en función de la temperatura de salida T_s

CONCLUSIONES

Analizando la ecuación (1), a simple vista se hubiese esperado que dado que el calor absorbido por el sistema es directamente proporcional a la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida Δt , a mayor Δt , se obtenga mayor potencia y por lo tanto una mejor eficiencia térmica de los dispositivos solares; sin embargo, se observa que a mayor Δt , la potencia y eficiencia del dispositivo disminuyen en aproximadamente un 9%, comportamiento debido a que a mayor Δt , el flujo de calor hacia el ambiente aumenta provocando una disminución de la eficiencia.

Tanto \dot{m} como C_p varían con respecto a los cambios de temperatura en el fluido de trabajo, por lo que se puede deducir que los cambios ocasionados en el flujo másico como en la capacidad calorífica debido a los cambios de temperatura (inversamente proporcional en el flujo y directamente proporcional para la capacidad calorífica) tienen mayor influencia o son de mayor peso en la potencia y eficiencia, que los producidos por las variaciones de temperatura Δt . Considerando los rangos de temperatura incluidos en los cálculos de éste trabajo, se encuentra que la densidad decreció en un 12% y la capacidad calorífica se incrementó en un 31%.

La densidad ρ y el caudal ϕ son inversamente proporcionales a Δt , por lo que el flujo másico \dot{m} es inversamente proporcional a Δt^2 , lo que explica por qué el calor útil \dot{Q}_u disminuye con el aumento de

la diferencia de temperatura y por lo tanto, la potencia y la eficiencia del concentrador solar de Fresnel.

La eficiencia térmica del Concentrador solar de Fresnel de doble reflexión tiene una eficiencia en el rango entre 15 y 16% lo que lo ubica en el valor esperado para un dispositivo solar.

AGRADECIMIENTOS

En éste trabajo se agradece la colaboración de Ricardo Caso Jefe del Taller y Carlos Fernández del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO-Física) de la Universidad Nacional de Salta, por su valioso apoyo en la construcción del concentrador y en el desarrollo de los experimentos realizados para éste trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Saravia, L. R. (2002). Concentrador con doble reflexión para cocina solar, Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 6, No. 1, 03.01 - 03.06.
- Saravia, L. R. y Flores, M. A. (2004). Concentrador con doble reflexión para cocina solar comunal (2da. Parte). Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 8, No. 1, 03.01-03.06, ISSN 0329-5184.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- Rabl A. (1985). Active Solar Collectors and their applications, pp. 103-104. Oxford University Press, New York.
- Saravia, L. R., Echazú, R., Condorí, M., Quiñones, J. E., Bustos, B. L. (2006). Banco de pruebas para determinar la eficiencia de concentradores solares tipo Fresnel. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, 03.113-03.119. ISSN 0329-5184.

ABSTRACT

In this paper the analysis of the thermal behavior of a Fresnel solar concentrator of double reflection is presented, by means of the determination of its power and efficiency. In order to be able to do this, the temperature of the chosen working fluid was measured at the inlet and outlet of a heat exchanger, as well as the solar radiation and the flow rate. This exchanger is located in the focal volume of the concentrator. The "absorber" consists of a rectangular spire, built in aluminum, and coated with matt black paint, resistant to high temperatures. The working fluid (thermal oil) was kept in a closed cycle; In order to maintain a constant flow, and this was driven by an electric oil pump.

Keywords: Fresnel concentrator, double reflection, temperature, thermal oil, power and efficiency.