

BANCO DE PRUEBAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE CONCENTRADORES SOLARES TIPO FRESNEL #

L. Saravia, R. Echazú, M. Condori
J. E. Quiñones, B. L. Bustos

INENCO - Instituto UNSa - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 - A4408FVY Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 - e-mail: echazur@inenco.net

RESUMEN: Se presenta el diseño, detalles constructivos, instrumentación y puesta en marcha de un banco de pruebas para la medida de eficiencia de concentradores solares. El equipo funciona con un ciclo cerrado de aceite térmico impulsado por una bomba de engranajes, entre un serpentín ubicado en el foco del concentrador y un depósito precalentado. Durante la operación se miden temperaturas, radiación solar y caudal. Se muestran las primeras medidas y se discuten los resultados.

INTRODUCCIÓN

Existen varios procedimientos para determinar la eficiencia térmica de un colector solar y que sólo difieren ligeramente, como por ejemplo en la elección de la temperatura de referencia a utilizar. El más difundido utiliza a la temperatura del fluido a la entrada del colector como referencia (Duffie y Beckman, 1991), pero también hay procedimientos que utilizan la temperatura media del fluido (Rabl, 1985). Esta última suele ser más conveniente para aplicaciones donde la velocidad del flujo difiere de las condiciones de ensayo. Los pasos básicos de estos procedimientos son los mismos (ASHRAE, 1987). Un fluido es bombeado a través del colector y se determina el calor útil del mismo, expresado en vatios, por la ecuación:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (1)$$

donde \dot{m} es el flujo másico del fluido, C_p su calor específico, T_o y T_i las temperatura de salida y entrada del área de absorción del colector respectivamente. Además, se registran la radiación total sobre el plano del colector G_T y la temperatura ambiente. La eficiencia instantánea del colector se define por:

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

donde A_c es el área efectiva de colección. Para la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) se necesita determinar el producto $\dot{m}C_p$ del fluido. A baja temperatura se suele realizar una medición directa del caudal del fluido y tomar el valor de su calor específico de la bibliografía. Este procedimiento se dificulta cuando se trabaja con colectores concentradores, donde las temperaturas de trabajo por encima de la temperatura de ebullición del agua son habituales, y se suelen utilizar aceites térmicos. A menudo estos parámetros no pueden ser medidos con razonable seguridad como para permitir una medición confiable de la eficiencia del colector. Esto sucede especialmente con la capacidad calorífica y la densidad de los aceites utilizados que cambian sus valores fuertemente con el aumento de la temperatura. Para su determinación se suelen utilizar las tablas de propiedades provistas por los fabricantes para aceites nuevos. Con el uso del aceite, estos valores publicados tienen que ser sujetos a continuas verificaciones. Lo mismo sucede cuando el aceite se contamina, por ejemplo con vapor de agua.

Este producto puede ser medido directa y seguramente con un calorímetro. Este es un calentador de resistencia eléctrica calibrado, el cual se coloca en un circuito de ensayo térmico en serie con los colectores. Una de las primeras propuestas de calorímetros se hicieron en el Argonne National Laboratory (Reed, 1978) y en el Enrico Fermi Institute (Collares-Pereira, 1981). En el presente trabajo se presenta un banco de ensayos simples construido en el INENCO, para determinar la eficiencia térmica de un colector concentrador tipo Fresnel. En la sección siguiente se describen el banco de pruebas y los pasos básicos que se han seguido al aplicar esta técnica.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

El banco de pruebas que se presenta, mide la energía radiante absorbida en un serpentín ubicado en el foco del concentrador.

Por el interior del serpentín circula aceite térmico impulsado por una bomba en circuito cerrado con un recipiente de acumulación y con un equipo automático se miden las temperaturas del depósito, de entrada y salida al serpentín y la ambiente. Se mide también la radiación solar global en el plano del concentrador y el caudal.

Como fluido de intercambio se empleó aceite Shell Térmico B, que habitualmente es usado en calderas. En la tabla 1 se muestran las propiedades físicas de interés para este trabajo, a distintas temperaturas. Estos datos se tomaron de gráficos del fabricante para una publicación anterior. (Echazú R. Et. Al., 2003)

Temperatura (C)	Densidad (Kg/m ³)	Capacidad Calorífica (KJ/Kg)	Conductividad Térmica (W/mC)	Número de Prandtl
0	880	1.8	0.134	1200
50	845.5	2	0.131	114
100	811	2.17	0.127	15.5
150	776.5	2.36	0.123	11.8
200	742	2.45	0.12	11
250	707.5	2.73	0.116	10
300	673	2.92	0.112	7

Tabla 1: Propiedades del aceite Shell Térmico B, a distintas temperaturas

El serpentín se construyó con caño de cobre de 120 mm de diámetro por 1 mm de pared, formando un espiral de 230 mm de largo, de modo que sus dimensiones externas sean iguales a la del calderín propio del concentrador ensayado. Este serpentín se encuentra en el interior de un vaso de vidrio de precipitados como se describe en Saravia et al 2001.

En la figura 1 se muestra un esquema fuera de escala del equipo:

Se utilizan dos depósitos para el aceite, uno de 20 litros, sin aislación térmica, a presión atmosférica, desde el cual se bombea hacia el circuito (azul en la figura) y otro de 12 litros, aislado térmicamente y presurizado por la bomba, desde el que se impulsa el aceite al serpentín mediante una conexión flexible (en rojo)

La salida del serpentín, por medio de otra conexión flexible, retorna al tanque (magenta)

Para la circulación se utilizó una bomba de aceite de motor de automóvil (Fiat 600) acoplada a un taladro eléctrico de 800 W. La bomba de engranajes, construida en aluminio, con el eje y los engranajes de acero, está sumergida en el depósito de aceite y conectada con caños de cobre de 6 mm de diámetro a una T, la que por medio de una llave esférica permite recircular parte del aceite, para regular el caudal.

El taladro de velocidad variable permite también regular el caudal. Con este objeto se desmontó el dispositivo electrónico que trae incorporado en la llave y se lo colocó en el tablero del equipo, agregándole un mecanismo con un tornillo de paso fino (0.8 mm) para mantenerlo fijo en la velocidad seleccionada.

El tanque presurizado está rodeado por cuatro resistencias de cuarzo de 400 W, conectadas en serie de dos en dos, para precalentar el aceite hasta la temperatura inicial requerida. Como las resistencias calientan la pared del tanque por radiación, éste se pintó con pintura negra para alta temperatura y se colocó externamente un reflector de aluminio. Todo esto se encuentra rodeado por una capa de lana de vidrio de 50 mm y encerrado en un gabinete de chapa galvanizada.

Las conexiones externas, entre los tanques, entre el tanque menor y serpentín, y el retorno desde el serpentín al tanque mayor, se ejecutaron con manguera de poliamida reforzada con nylon.

Se midieron las temperaturas con termocuplas tipo K conectadas a un data logger Adam 6018 M, la radiación solar sobre el plano del concentrador con un radiómetro LI 250 y el caudal con una probeta graduada de 2000 ml y cronómetro.

La corriente entregada a las resistencias se mide con una pinza amperométrica y la tensión con un voltímetro de corriente alterna, para el cálculo de la potencia de la calefacción.

Las figuras 2 y 3 son fotografías del equipo que permiten apreciar los detalles.

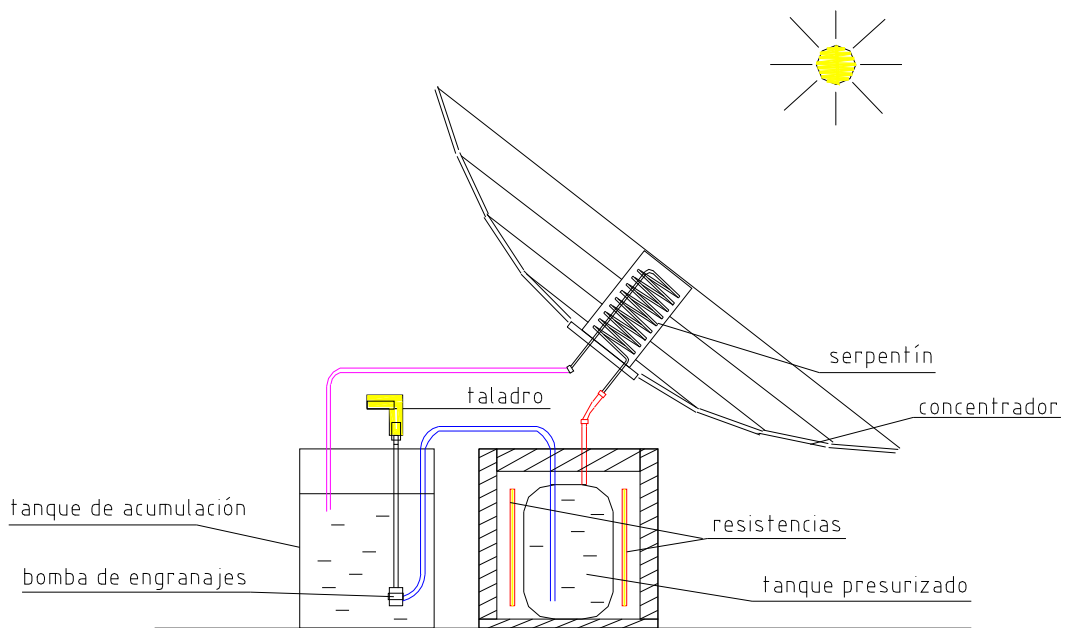


Figura 1: Corte esquemático del banco de pruebas.



Figura 2: Foto del concentrador tipo Fresnel ensayado.

Figura 3: Banco utilizado para la medición de su eficiencia.

A continuación se describen los pasos y los cálculos que se realizan en la aplicación de la técnica presentada. Es necesario medir la potencia P , la potencia eléctrica entregada al calorímetro menos la potencia térmica pérdida al ambiente. Como el calorímetro se encuentra en una caja con aislamiento térmico, el cálculo de esta última se puede hacer fácilmente si se considera que la temperatura de la pared del reservorio de aceite alcanzó el estado estacionario.

$$P = \text{voltaje} \times \text{corriente} - A \frac{k}{e} (T_p - T_a) \quad (3)$$

Donde A es el área del cajón donde está el reservorio, k la conductividad térmica de la lana de vidrio, T_p la temperatura de la pared externa del reservorio y e el espesor de la lana de vidrio.

También se registran en forma simultánea las temperaturas de entrada y salida del fluido al calorímetro, $T_{i,c}$ y $T_{o,c}$ respectivamente. Entonces el producto mC_p y el calor útil, con el que luego se calcula la eficiencia instantánea, estarán dados por las siguientes ecuaciones:

$$mC_p = \frac{P}{T_{out,cal} - T_{in,cal}} \quad (4)$$

$$Q_u = \frac{T_o - T_i}{T_{o,c} - T_{i,c}} P \quad (5)$$

En esta técnica los factores limitantes en la seguridad de la medida son: (a) la seguridad de la medición de la potencia, (b) la seguridad en la calibración del calorímetro y (c) la seguridad de estado estacionario para las temperaturas involucradas.

Para la primera se necesita una fuente estabilizada de potencia y el registro en forma continua de la tensión con aceptable precisión. La calibración es necesaria para determinar que fracción de la potencia entregada se pierde al medio ambiente. Esta cantidad es diferente a diferentes temperaturas de operación, pero en el estado estacionario es fácil de calcular, midiendo la temperatura interna y externa de la pared del cajón aislado. En este caso se colocaron dos sensores de temperatura pegados en distintos puntos de la pared del reservorio y se registró la temperatura ambiente. Un requerimiento crucial para cualquier medición directa de eficiencia instantánea es la necesidad para condiciones de estado estacionario. Para maximizar el tiempo en que la radiación se mantiene aproximadamente constante es necesario un correcto seguimiento del colector respecto al ángulo incidente de la radiación. Obviamente la velocidad de flujo debe ser constante, pero además lo deben ser la temperatura de entrada y la de salida del colector.

Los efectos transitorios no solamente surgen de la constante de tiempo del colector, sino que el circuito de ensayo tiene su propia constante de tiempo, por lo cual es determinante el reservorio de aceite. Por un lado ayuda a disminuir las variaciones en la temperatura de entrada del colector, pero por el otro introduce un desfase entre el tiempo en que se alcanza el estado estacionario en la temperatura de entrada al absorbedor y la temperatura de salida del mismo. Ese punto es importante. Se debe reducir la capacidad del tanque al mínimo necesario, y se debe estar seguro que el calentamiento del mismo es uniforme.

RESULTADOS

El concentrador viene siendo utilizado para cocción de alimentos (Saravia, 2005), por lo que a los fines de medir su eficiencia se colocó un serpentín en el foco del concentrador por el cual se hizo pasar aceite térmico. Los ensayos consistieron en registrar las medidas de temperatura de entrada y salida al serpentín, como así también la temperatura de entrada y salida del calorímetro, la temperatura ambiente y la radiación solar incidente durante un ciclo de carga del calorímetro, tomando aproximadamente ocho minutos para la carga. A continuación se muestran los resultados de los ensayos para una corrida de 4 ciclos de carga y descarga medidos el día 7 de julio del corriente año, en la ciudad de Salta.

En la Figura 4 se muestran en el orden desde arriba hacia abajo, la temperatura de salida del absorbedor, la temperatura de la pared del reservorio de aceite, la temperatura de entrada al absorbedor, la temperatura de retorno al calorímetro y la temperatura ambiente. En nuestro caso la temperatura de salida del calorímetro es igual que la temperatura de entrada al absorbedor. Se observa en la gráfica claramente que la temperatura de salida del absorbedor, en nuestro caso el serpentín, llega al estado estacionario, y que la temperatura de entrada sólo lo hace por pequeños lapsos. Si bien esto indicaría la necesidad de mayor tiempo para que la temperatura del reservorio llegue al estacionario, esta condición no pudo ser cumplida con este banco de pruebas debido a la potencia de la bomba con la que se cuenta. Sin embargo se adoptó la condición de estado estacionario para la temperatura media para seleccionar los puntos con los que se determina la eficiencia del colector.

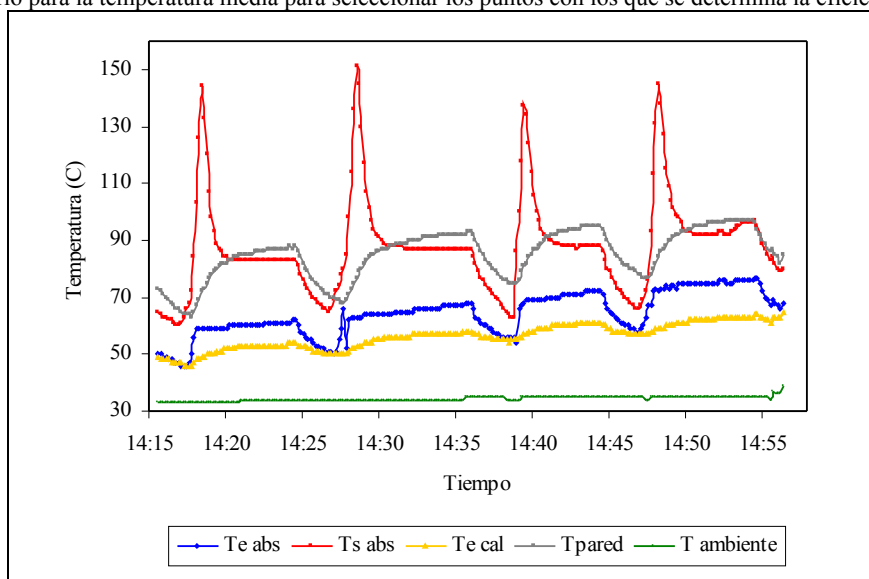


Figura 4: Temperaturas en función del tiempo registradas durante cuatro ciclos de carga y descarga del calorímetro.

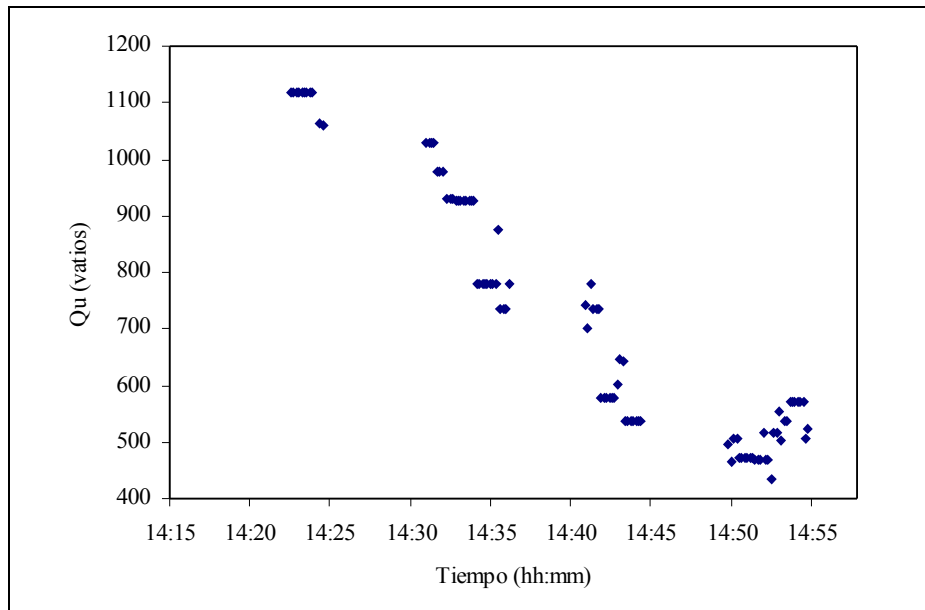


Figura 5: Calor útil en función del tiempo. Datos seleccionados sólo con la condición de temperatura de salida constante.

A modo de ejemplo del error que se introduce si no se considera la condición de temperatura media constante, en la Figura 3 se muestran los valores de calor útil obtenidos a partir de estas mediciones, considerando todos los valores que corresponden a la temperatura de salida del absorbedor constante, sin importar si la de entrada lo era. También se han incluido todos los datos sin ponderar el peso estadístico de cada grupo de datos. En la Figura 6 se muestra la eficiencia instantánea correspondiente, utilizando como referencia la temperatura de entrada. Como se observa el ajuste de la regresión presenta un error superior al 10%, siendo el doble de lo normalmente aceptado.

Por otra parte en las Figuras 5 y 6 se muestran nuevamente el calor útil en función del tiempo y la curva de eficiencia obtenida a partir de esta referida a la temperatura de entrada del fluido al serpentín. En esta oportunidad sólo se consideran los datos correspondientes a temperatura media constante y también se ha ponderado la cantidad de puntos de cada grupo, a fin de que cada grupo afecte con la misma cantidad a la regresión. Como se observa el ajuste mejora hasta ubicarse dentro del error esperado para los métodos de determinación de eficiencias, dentro del 5%.

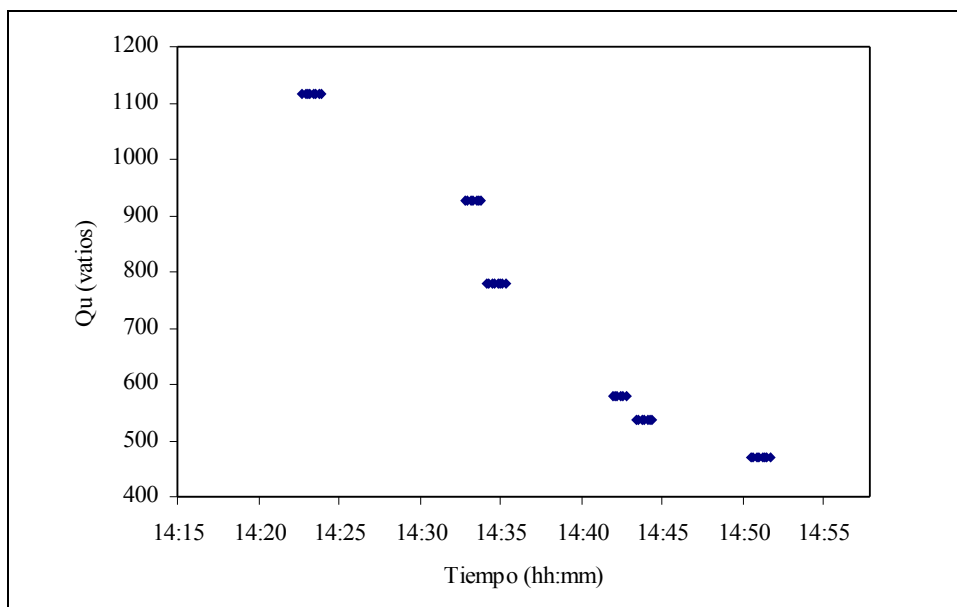


Figura 6: Eficiencia instantánea del colector concentrador de tipo Fresnel ensayado. Datos de la Figura 5

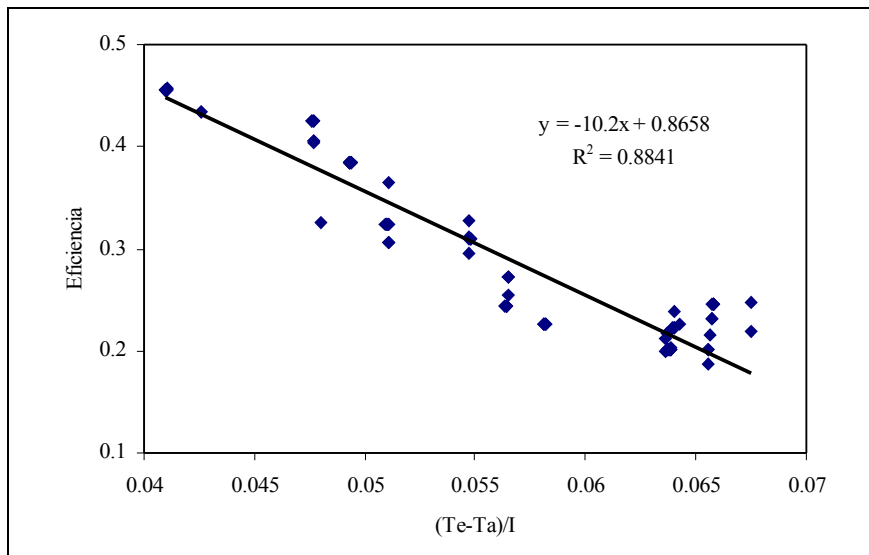


Figura 7: Calor útil en función del tiempo. Datos seleccionados con la condición de temperatura media constante.

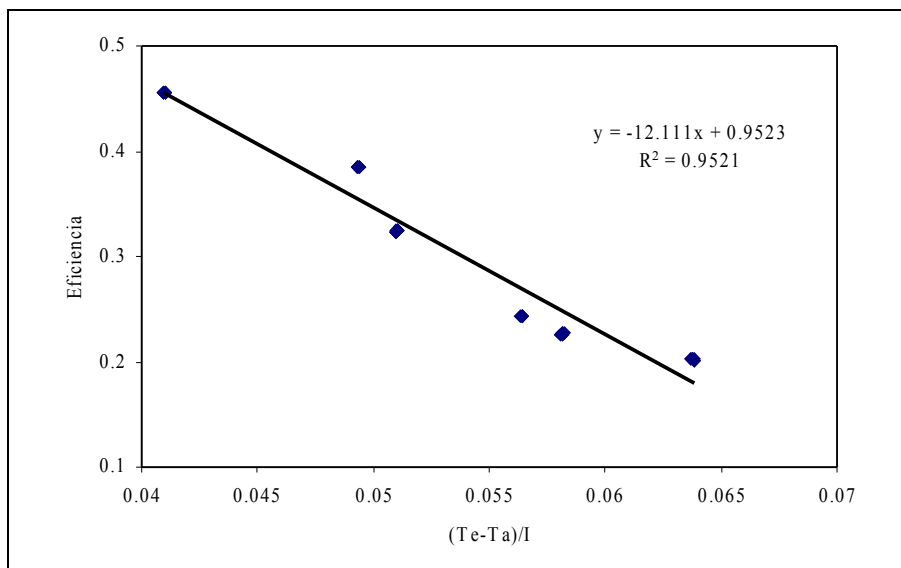


Figura 8: Eficiencia instantánea del colector concentrador de tipo Fresnel ensayado. Datos de la Figura 5.

CONCLUSIONES

A fin de determinar la eficiencia instantánea de un colector concentrador, se ha ensayado una técnica, utilizando un calorímetro, para la medición indirecta del producto capacidad calorífica-flujo másico del fluido caloportador. Para su implementación se ha construido un banco de pruebas sencillo que se ha probado con un concentrador de tipo Fresnel que viene siendo utilizado en la cocción de alimentos. Los ensayos realizados muestran que los resultados obtenidos están dentro del error requerido para los procedimientos de determinación de eficiencias de colectores solares. La técnica es de fácil implementación y permite el registro automatizado de todos los parámetros involucrados.

Sin embargo, se han encontrados algunos puntos a mejorar en el banco de pruebas que redundarán en mediciones más precisas y confiables. Los más importantes se mencionan a continuación.

- se necesita una bomba que trabaje en forma continuada mayor tiempo para permitir mayor seguridad del estado estacionario del sistema. En particular, que la temperatura de entrada al serpentín tenga mayor tiempo en estado estacionario a fin de registrar mayor cantidad de puntos.
- Existe un desfase entre la temperatura de entrada y salida del absorbedor que no sólo está condicionado por la longitud del serpentín, sino que también está afectado por la capacidad del calorímetro. Si bien el reservorio de aceite ayuda a suavizar las variaciones de la temperatura de entrada, mejorando la medida, también introduce inercia para llegar al estacionario. Se necesita reducir el volumen del reservorio y mejorar el control de calentamiento de este.

- c) Las medidas de eficiencia en el concentrador ensayado pueden estar subestimadas, porque del análisis de los resultados se detectó que han existido pequeños desenfoques del concentrador dentro del tiempo utilizado en cada ciclo, del orden de los 10 minutos. En estas experiencias, el seguimiento fue manual y se requiere de un sistema más preciso para determinar que el serpentín esté en el foco del concentrador durante la medición.

REFERENCIAS

Ashrae Handbook. (1987). HVAC Systems and applications.

Collares-Pereira M., Duque J., Saraiva C. y Rego-Teixera A. (1981). A calorimeter for solar thermal collector testing. *Solar Energy* 27, 6, 581-582.

Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.

Echazú R., Saravia L. y Cadena C., (2003) " Estudio de Materiales " Capítulo 4 del libro en CDROM " Las Cocinas Solares en Iberoamérica " Ed. Sub Programa VI Solcyted la Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos de CYTED. ISBN 987 – 20105 – 3 – 6

Hoyos D. et al, 1999, Determinación de la Distribución de Radiación Incidente en el Plano Focal de un Concentrador por Procesamiento Digital de Imágenes AVERMA Vol. 3 No. 2

Rabl A. (1985). *Active Solar Collectors and their applications*, pp. 103-104. Oxford University Press, New York.

“ Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos “ : www.inenco.net/ricsa/ricsa.html

Reed K. A. y Allen J. W. (1978). Solar Thermal Collector testing: Calorimetric ration technique. *Proceedings of the annual meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*. Denver, Colorado. Vol 2.1 pp. 345-346.

Saravia R. Et. al.(2002) *Cocinas Solares Comunes de Uso Múltiple*. ERMA Vol 10 ISSN 0328-932X

Welford W. T. ,Winston R. (1989), *High Collection Nonimaging Optics*, Academic Press, San Diego, CA.