

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO PARA APLICACIONES DE BAJA Y MEDIANA TEMPERATURA.

O. García-Valladares, I.Santos-González, V.H. Gómez, N. Ortega, R. Best.
Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.
Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos., C.P. 62580, México.
Tel. 56229746 e-mail: ogv@cie.unam.mx

Recibido: 30/07/12; Aceptado: 01/10/12

RESUMEN: Se presenta la evaluación de un concentrador parabólico compuesto (CPC) diseñado y construido en el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México. El CPC tiene un área de apertura de 1.33 m², una concentración real de 3.5 y ángulo medio de aceptación de 15°. Se utilizó un tubo receptor de acero al carbón con diámetro externo de 0.06 m cubierto con una superficie selectiva. En los resultados experimentales se presenta el incremento de temperatura, la curva de rendimiento térmico y la caída de presión que fueron obtenidos y comparados con un modelo numérico desarrollado. Los resultados experimentales del CPC muestran que puede aprovecharse en diversas aplicaciones que trabajen en rangos de baja y mediana temperatura con un buen desempeño térmico.

Palabras clave: CPC, modelo numérico, absorbedor, reflector.

INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica es cada vez más utilizada a nivel doméstico para la obtención de agua caliente sanitaria y como apoyo a la calefacción. Sin embargo esta tecnología tiene también otro enorme potencial de aprovechamiento; el sector industrial.

Desde que la idea del CPC surge en 1966 (Rabl, 1985), se han realizado diversos estudios para utilizar esta tecnología de una manera eficiente y satisfacer la demanda energética de diversas aplicaciones que operan en rangos de mediana temperatura, disminuyendo de esta manera el consumo de energía primaria convencional, además de los efectos nocivos para el ambiente. Existen diversos campos de aplicación a un nivel de temperatura media. El más importante de ellos es la producción de calor para procesos industriales, dentro de los que se encuentran la esterilización, pasteurización, secado, destilación, refrigeración y enfriamiento por absorción y adsorción (Ver Tabla 1).

| Sector | Procesos | Temperatura (°C) |
|-------------|---------------------------|------------------|
| Alimenticio | Pasteurización | 62-85 |
| | Cocción | 70-98 |
| | Lavado | 40-80 |
| | Refrigeración (adsorción) | 90 |
| Químico | Esterilización | 100-130 |
| | Vapor | 95-105 |
| Textil | Blanqueado, teñido | 60-90 |
| | Secado | 70-90 |

Tabla 1: Aplicaciones industriales para procesos de calor de baja y mediana temperatura.

En 1975 Rabl realizó una comparación de una variedad de concentradores en términos de sus principales características, como la concentración, ángulo de aceptación, sensibilidad de los errores de los espejos, tamaño del área reflectora y número promedio de reflexiones, resaltando el CPC en virtud de sus propiedades ópticas (Rabl, 1975). Un año después, propuso un modelo para calcular la transferencia de calor por convección, conducción y radiación en un CPC, desarrolló una técnica analítica para estimar el número promedio de reflexiones de la radiación que llega al receptor, además de presentar tablas y gráficos que sirven de ayuda en el diseño de colectores solares tipo CPC (Rabl, 1976).

Los concentradores parabólicos compuestos son una clase versátil de los colectores solares que se pueden adaptar a una gran variedad de aplicaciones y geometrías (González y Rodríguez, 2007), considerados candidatos prometedores y de gran interés para el suministro de energía térmica (Tiba y Fraidenraich, 2011), teniendo ventajas importantes como en los procesos de fabricación, fiabilidad y costo, por lo que es competitivo, en particular en rangos de baja y mediana temperatura (Horta et al., 2012), capaz de aceptar la radiación solar durante largos períodos de cada día sin seguimiento diurno del sol, teniendo la ventaja de concentrar la radiación difusa (Pramuang y Excell, 2005).

El objetivo de este trabajo es determinar el comportamiento térmico del CPC evaluado a diversas condiciones de operación y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con resultados de la simulación numérica que se utilizó para el diseño.

MODELO NUMÉRICO

El CPC fue diseñado usando un modelo unidimensional desarrollado en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM (Ortega et al., 2008), que resuelve de manera segregada el flujo de fluido al interior del tubo receptor, la transferencia de calor por conducción a través de la pared del tubo receptor y la transferencia de calor en el concentrador solar para calcular la ganancia de calor útil obtenida de la concentración solar.

El modelo numérico fue resuelto por el método de volúmenes de control sobre el tubo absorbedor. Las ecuaciones discretizadas fueron acopladas usando un método completamente implícito paso a paso en la dirección del flujo.

Las condiciones iniciales introducidas en el modelo numérico son: datos de la geometría del CPC, temperatura de entrada, flujo másico, temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar, datos geográficos del lugar, propiedades de los materiales y propiedades termodinámicas del fluido de trabajo. Con esta información, el modelo predice el incremento de temperatura entre la entrada y salida del CPC, eficiencia térmica, calor útil, caída de presión, etc.

UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental está compuesta básicamente por los siguientes elementos: concentrador parabólico compuesto, termotanques de almacenamiento y bomba de recirculación, estructura de soporte con inclinación variable, sistema de adquisición de datos (Ver Fig. 1).

En la Tabla 2 se muestra los instrumentos y errores utilizados en la unidad experimental.

| Variable | Instrumento | Rango de operación | Precisión |
|-------------|------------------------|-------------------------------|-----------|
| Temperatura | Termistor | -40 a 150 °C | ±0.1 °C |
| | Termopar tipo J | 0 a 750 °C | ±1.1 °C |
| Flujo | Coriolis | 0 a 20 kg/min | ±0.1 % |
| Presión | Diferencial de presión | 0 a 11.14 in H ₂ O | ±0.15 % |
| Radiación | PSP-II | 0 a 1600 W/m ² | ±1 % |

Tabla 2: Instrumentación utilizada en la unidad experimental.

El registro y almacenamiento de datos se realizó con el software VEE-Engineering versión 5.01, utilizando el adquisidor de datos marca Agilent modelo 34970A. Los datos son registrados y almacenados cada diez segundos.



Fig. 1: Unidad experimental.

El concentrador parabólico compuesto se compone básicamente de tres elementos (Ver Fig. 2):

- Absorbedor: absorbe la energía solar concentrada, la convierte en energía térmica y la transfiere al fluido que circula en su interior. Esta es construido en acero al carbón 7013 con diámetro nominal de 2 pulgadas, cubierto con una superficie selectiva comercial, hecho a base de un polímero de silicón.
- Cubierta: permite el paso de la radiación solar y reduce las pérdidas de calor por convección. Cristal templado de 4 mm de espesor, con dimensiones de 0.665 m x 2.0 m, teniendo un área de apertura final de 1.33 m².

- Reflector: concentra la radiación directa del sol sobre el absorbedor que se localiza en el foco del concentrador. Está formado por dos segmentos de láminas de aluminio altamente pulido con un espesor de 0.6 mm. Las dimensiones son de 0.89 m x 2 m, teniendo un área de 1.78 m².



Fig. 2: Concentrador parabólico compuesto.

En las Tablas 3 y 4 se presentan las propiedades ópticas y características geométricas que se consideraron para el diseño y construcción del CPC en función de los materiales utilizados.

| Componente | Absortancia | Emitancia | Reflectancia | Transmitancia |
|--|-------------|-----------|--------------|---------------|
| Absorbedor de acero al carbón con superficie selectiva comercial | 0.91 | 0.38 | 0.09 | - |
| Cubierta de vidrio templado | 0.03 | - | 0.05 | 0.92 |
| Reflector de aluminio altamente pulido | 0.11 | 0.05 | 0.87 | - |

Tabla 3: Propiedades ópticas de los componentes del CPC.

| Ángulo de aceptación (°) | Razón de concentración (adimensional) | Diámetro externo (mm) | Diámetro interno (mm) | Altura (m) | Ancho (m) | Largo (m) |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------|
| 15° | 3.5 | 60.3 | 52.5 | 0.81 | 0.66 | 2.00 |

Tabla 4: Características geométricas del CPC

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales se realizaron en la plataforma solar del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, localizado en Temixco Morelos, con latitud de 18°51' N, longitud de 99°14' y altitud de 1219 m sobre el nivel del mar; se desarrollaron bajo las siguientes condiciones de operación:

- Se utilizó agua como fluido de trabajo.
- Variando la temperatura de entrada en un rango de 27 °C a 70 °C.
- Variando el flujo másico de 0.05 a 0.25 kg/s.
- Irradiancia solar arriba de 800 W/m² en el plano del CPC.
- Las variables fueron medidas y registradas cada diez segundos.
- Se alcanzó un estado estacionario para los puntos evaluados después de 5 minutos de operación.

RESULTADOS

Para comparar los resultados experimentales con resultados de la simulación numérica, fueron utilizadas las mismas condiciones para el modelo numérico que las registradas en el desarrollo de cada prueba experimental.

En la Figura 3 se muestra la relación de los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente en cuanto a la eficiencia. Las líneas entrecortadas representa $\pm 15\%$ de error de los datos experimentales, en donde el 80.4% de los 102 datos obtenidos experimentalmente está dentro de este margen con una desviación de $\pm 7.60\%$.

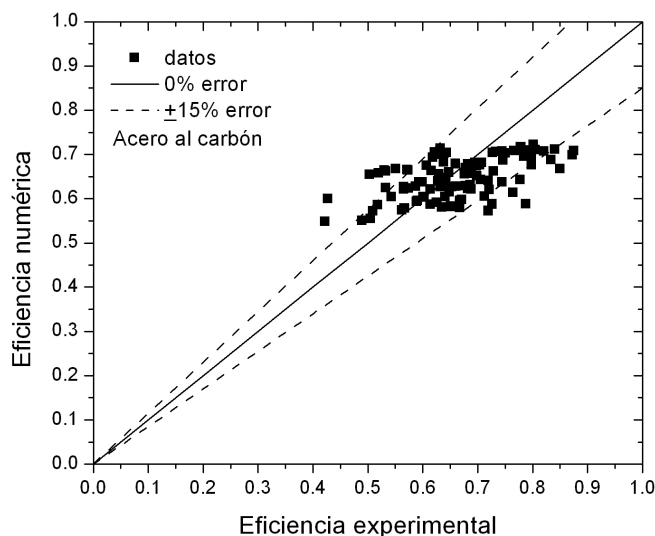


Fig. 3: Resultados de la eficiencia experimental y numérica.

El incremento de temperatura del fluido con respecto al flujo másico se muestra en la Figura 4. Se observa que el máximo incremento de temperatura se obtiene cuando se trabaja a una velocidad de flujo de 0.05 kg/s y el mínimo a un flujo de 0.25 kg/s. La máxima diferencia de temperatura entre la entrada y salida del CPC alcanzada en las pruebas experimentales fue de 3.59 °C a un flujo másico de 0.05 kg/s, disminuyendo significativamente hasta llegar a 0.90 °C. La diferencia promedio entre los resultados experimentales y numéricos fue de ± 0.14 °C, con desviación estándar de ± 0.13 °C y un error máximo de 0.41 °C.

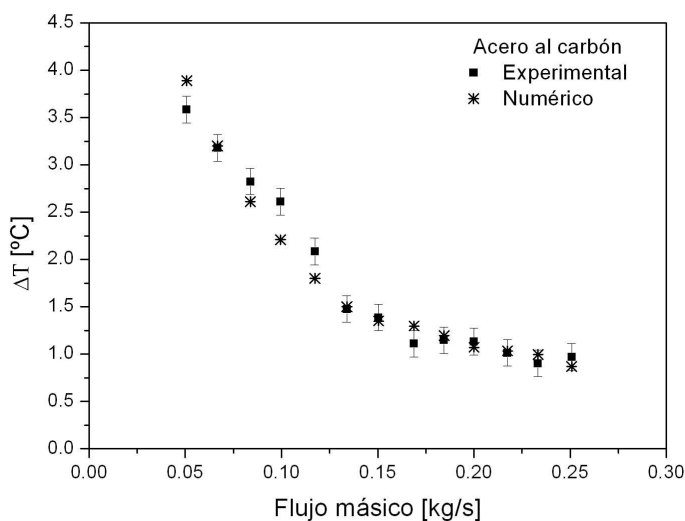


Fig. 4: Incremento de temperatura con respecto a la velocidad del flujo másico. Las barras de error representan la incertidumbre en la medición de los datos experimentales.

La Figura 5 muestra la gráfica de eficiencia contra la diferencia de temperatura del fluido y la temperatura ambiente en relación con la irradiancia solar recibida. La recta que se muestra en la gráfica representa las pérdidas de calor, y su intersección con el eje vertical es un indicador de las ganancias obtenidas por el concentrador cuando no existen pérdidas en el ambiente (Duffie y Beckman, 1991). La máxima eficiencia instantánea que se obtiene en el rango de flujo utilizado (0.05 a 0.25 kg/s), corresponde a una velocidad de 0.25 kg/s.

Las barras de error, representan los errores de incertidumbre correspondientes a cada sensor utilizado en la medición de las variables involucradas para el cálculo de la eficiencia térmica (Verma, 2005).

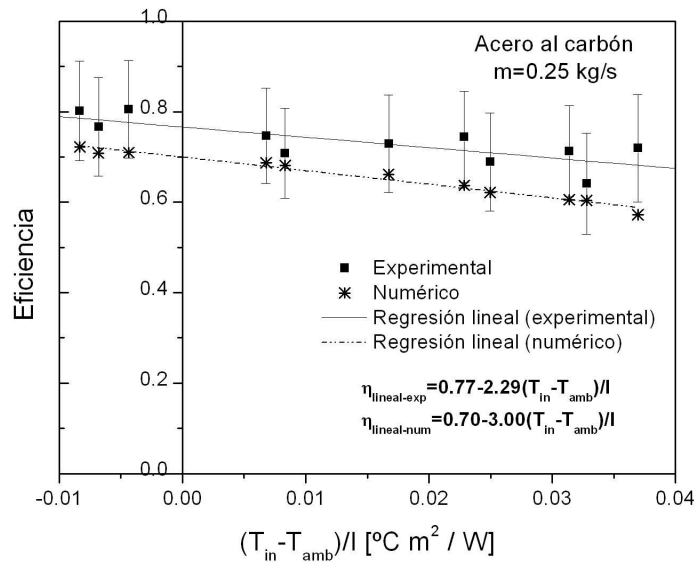


Fig. 5: Eficiencia obtenida de los resultados numéricos y experimentales.

La caída de presión a diferentes flujos másicos se muestra en la Figura 6. Como se observa a medida que aumenta el flujo másico, aumenta la caída de presión. La desviación de los datos experimentales comparados con los datos del modelo numérico fue de $\pm 7.55\%$, con un error promedio de $\pm 7.86\%$.

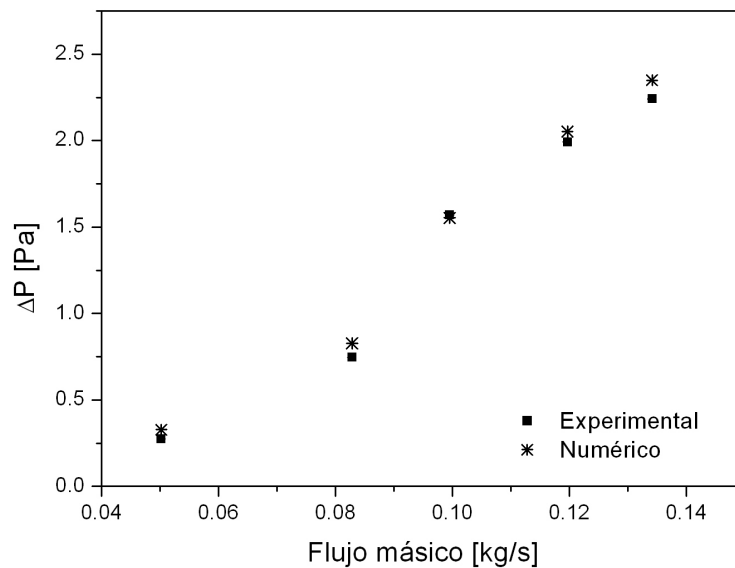


Fig. 6: Caída de presión en el tubo absorbedor.

CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación de un concentrador parabólico compuesto con área de apertura de 1.33 m^2 , concentración real de 3.5 y ángulo medio de aceptación de 15° , utilizando un tubo receptor de acero al carbón de 2 m de longitud.

El máximo incremento de temperatura puntual en los resultados experimentales fue de $4 \text{ }^\circ\text{C}$, a flujo másico de 0.05 kg/s y temperatura de entrada de $52 \text{ }^\circ\text{C}$, obteniéndose 838 W de calor útil. El valor promedio de la eficiencia experimental que se obtuvo en todas las pruebas realizadas fue del 60% .

De acuerdo a los resultados obtenidos, se muestra que el CPC presenta un buen comportamiento térmico, pudiendo ser competitivo con otras tecnologías de captación solar que actualmente son utilizadas para cubrir diversos procesos que trabajan en rangos de baja y mediana temperatura ($\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$). Se muestra que para aplicaciones que requieren un mayor incremento de temperatura, lo ideal es que la velocidad de flujo sea un valor pequeño. Si se requiere de mayor calor útil, entonces el flujo másico deberá incrementarse.

El modelo numérico que se utilizó, muestra ser confiable y puede ser utilizado como una herramienta para simulación y diseño en el estudio de este tipo de sistemas de captación solar, para diferentes aplicaciones y fluidos de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su reconocimiento al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IT100812-3 y a fondo CONACYT-SENER sustentabilidad energética 117914, por el apoyo financiero en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- González M., Rodríguez L. (2007). Solar powered adsorption refrigerator with CPC collection system: Collector design and experimental test. *Energy Conversion and Management* 48, 9, 2587-2594.
- Horta P., Henriques J., Collares-Pereira M. (2012). Impact of different internal convection control strategies in a non-evacuated CPC collector performance. *Solar Energy* 86, 5, 1232-1244.
- Ortega N., García-Valladares O., Best R., Gómez V.H. (2008). Two-phase flow modelling of a solar concentrator applied as ammonia vapor generator in an absorption refrigerator. *Renewable Energy* 33, 9, 2064-2076.
- Pramuang S., Excell R. (2005). Transient test of a solar air heater with a compound. *Renewable Energy* 30, 5, 715-728.
- Rabl A. (1985). *Active Solar Collectors and their Applications*, 1ª edición, pp. 147-152. Oxford University Press.
- Rabl A. (1975). Comparison of solar concentrators. *Solar Energy* 18, 2, 93-111.
- Rabl A. (1976). Optical and thermal properties of compound parabolic concentrator. *Solar Energy*, 18, 6, 497-511.
- Tiba C., Fraidenraich N. (2011) Optical and thermal optimization of stationary non evacuated CPC solar concentrator with fully illuminated wedge receivers. *Renewable Energy* 36, 9, 2547-2553.
- Verma S.P. (2005). *Estadística Básica para el Manejo de Datos Experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría)*, pp. 52-75. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

ABSTRACT

An evaluation of a compound parabolic concentrator (CPC) designed and built at the Centro de Investigación en Energía of the Universidad Nacional Autónoma de México is presented. The CPC has an aperture area of 1.33 m², a real concentration of 3.5 and acceptance half angle of 15 °. Tubular receiver with an outer diameter of 0.06 m and coated with a selective surface was used. In the experimental results the increment of temperature, the thermal performance curve and pressure drop were obtained and compared with a numerical simulation model developed. The experimental results of the CPC shows that it can be used in various applications that work in low and middle ranges of temperature with good thermal performance.

Keywords: CPC, numerical model, absorber, reflector.