

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABOLICO COMPUESTO

Javier Gutiérrez Ávila-javiguta12@yahoo.com.mx.

Departamento de Metalmecánica. Instituto Tecnológico de Acapulco, Gro., México.
Av. Instituto Tecnológico S/N. Crucero de Cayaco, Acapulco, Gro., México. C.P.39905. e-mail:

Vicente Flores Lara-f117u2@yahoo.com

Departamento de Metalmecánica. Instituto Tecnológico de Apizaco, Tlax. México.

Resumen.- En este trabajo se presenta el diseño y caracterización de un sistema solar con concentración, para la generación de vapor saturado. El sistema emplea un concentrador parabólico compuesto (CPC) y su diseño se desarrolla a partir de un modelo teórico, el cual se ajusta con base en parámetros climáticos de la región, la ganancia de calor deseada y el sitio en el cual se instalará para su operación. Las pruebas experimentales realizadas al sistema solar se basan en la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005, norma Mexicana para captadores solares; la cual conduce a determinar la eficiencia instantánea y la capacidad térmica. De los resultados obtenidos se concluye que el proceso de construcción del concentrador con geometría CPC es fundamental para lograr un alto desempeño térmico del sistema.

Palabras clave: Diseño, caracterización, sistema solar de concentración

1 INTRODUCCION

Los compromisos importantes en el desarrollo de tecnologías de fuentes renovables, es precisamente la aplicación de la energía solar, para generar energía limpia, para sustituir las fuentes convencionales que generan energía calorífica y eléctrica, que utilizan combustibles fósiles que contribuyen en la emisión de gases de efecto invernadero. Por otro lado, nuestro estado de Guerrero, no ha experimentado sistemas de concentración solar, que utilice estos equipos, para la evaporación. Sin embargo, el Departamento de Metalmecánica de este Instituto Tecnológico, ha desarrollado un prototipo CPC simple, para diferentes procesos de calentamiento de agua, en esta zona del pacífico.

Este trabajo muestra cada una de las etapas del desarrollo del CPC, como el diseño estructural, se describe la metodología utilizada en su construcción y las pruebas experimentales de la norma, como una certificación.

La energía solar es gratuita, el reto que tenemos es diseñar sistemas para su captación, para transformarla y que se aproveche, para sustituir los combustibles fósiles que generan gases del efecto invernadero. Aunque las limitantes son de baja densidad de potencia comparado con los hidrocarburos, pero proponer sistemas con elevada eficiencia de conversión. Otra limitante es su intermitencia, ya sea por el ciclo día-noche o bien por condiciones atmosféricas adversas como lluvia o nublados. El alcance de este trabajo es que, el prototipo desarrollado CPC cumpla las pruebas experimentales de la norma y que tenga un costo accesible, con opción a la comercialización mediante su producción en serie y que sea rentable tanto para aplicaciones industriales como agrícolas.

2 DISEÑO DEL CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO CPC

En el diseño del CPC sus dimensiones dependen de la aplicación y de las condiciones climáticas del lugar donde se pretende instalar el sistema. En este caso su aplicación será para la generación de vapor saturado o agua caliente, que se empleará en los procesos de deshidratación de flor de Jamaica, de mango y en la nixtamalización del maíz para la elaboración de tortilla. Los parámetros climáticos involucrados en el diseño del CPC se tomaron de la localidad de Acapulco, Guerrero. México, situada en las coordenadas $16^{\circ} 51'$ Latitud Norte y $99^{\circ} 52'$ Longitud Oeste, a una altitud de 30 MSNM.

Las dimensiones de este prototipo, se establecen en primer lugar con base en las dimensiones del receptor, este, es una tubería de 13 mm de diámetro nominal, con aleta de longitud de 0.116 m, a continuación es necesario establecer el ángulo medio de apertura, siendo de 27° ; para obtener una concentración geométrica de 2.43.

Estos concentradores CPC, tienen una copa denominada Trombe-Meinel, que permite que los rayos sean captados y se dirijan hacia el absorbedor sin importar la dirección incidente en la superficie de la copa. Esta copa siempre esta iluminada y reflejada a la superficie del absorbedor, porque tiene un ángulo sólido de 2π , para aprovechar la radiación directa y la difusa, este fenómeno no ocurre con los Concentradores Cilíndricos Parabólicos CCP.

El diseño del concentrador resultante se compone de dos geometrías diferentes; la primera corresponde a la sección de involuta, generada a partir de las dimensiones del receptor y la segunda corresponde al segmento de una parábola cuyo eje tiene un ángulo θ_c con respecto al eje vertical del CPC, como se muestra en la figura 1. Esta geometría permite que todos los rayos solares que son captados se reflejen hacia la superficie del receptor sin considerar

los errores de su superficie. Para este diseño, fue necesario decidir la magnitud de concentración (C) deseada, que se le añade un 10% para considerar un truncamiento. Conociendo la concentración se calcula el ángulo de aceptación $\theta_c = \theta_{max}$, como se muestra en la Ec. 1.

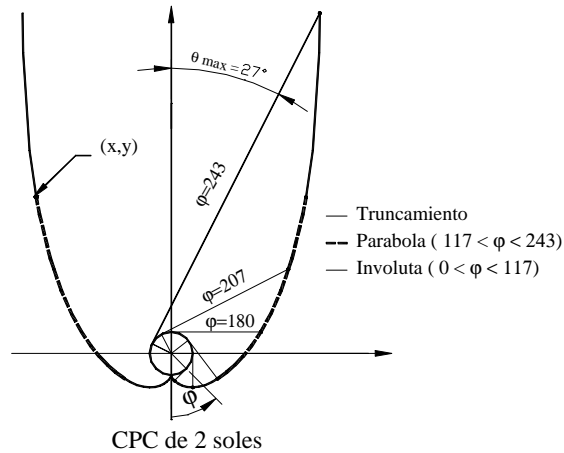


Figura 1.- Partes principales como son la involuta, las parábolas y el receptor cilíndrico.

$$\theta_{MAX} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{C}\right) \quad (1)$$

De esta manera, las coordenadas de la involuta en el plano (x y) están dadas en términos de las coordenadas polares r y φ :

$$x = r(\text{sen } \varphi - \varphi \text{cos } \varphi) \quad (2)$$

$$y = -r(\varphi \text{sen } \varphi + \text{cos } \varphi) \quad (3)$$

Donde:

$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} + \theta_{max} \quad (4)$$

Por otra parte, la trayectoria parabólica está dada las coordenadas x, y:

$$x = r(\text{sen } \varphi - A \text{cos } \varphi) \quad (5)$$

$$y = -r(A \text{sen } \varphi + \text{cos } \varphi) \quad (6)$$

Con

$$A = \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{max} + \varphi - \text{cos}(\varphi - \theta_{max})}{1 + \text{sen}(\varphi - \theta_{max})} \quad (7)$$

Donde:

$$\frac{\pi}{2} + \theta_{max} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_{max} \quad (8)$$

Los extremos superiores de las parábolas del CPC son paralelos al eje vertical del concentrador, esto no contribuye a la concentración en el receptor, que dichos extremos se trunquen o se eliminan. Esta acción hace que se pierda un 10 % de la razón de concentración y además, se logra un ahorro en el 50 % del material. Por lo tanto, al conocer el valor de la concentración, se le incrementa el 10% para considerar el truncamiento y se calcula el ángulo de aceptación, como se muestra en la figura 2.

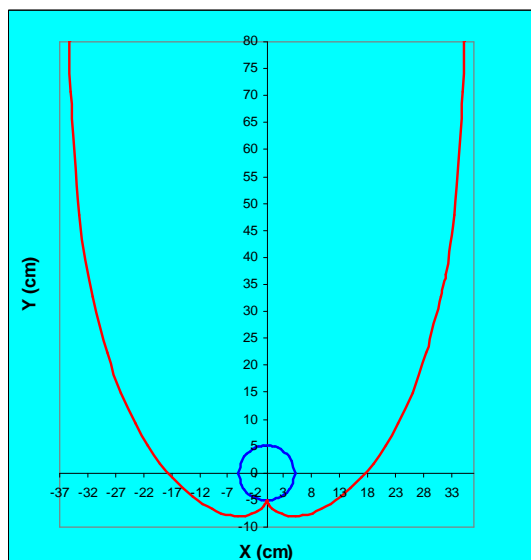


Figura 2.- Perfil del concentrador parabólico compuesto de receptor cilíndrico con altura completamente desarrollada.

El gráfico de este concentrador CPC, corresponde a 2 soles efectivos de concentración después del truncamiento, pero en su diseño inicial contemplaba 2.2 soles de concentración. El CPC contiene como partes principales la involuta y las parábolas, descritas en las ecuaciones anteriores y el receptor cilíndrico.

3 CONSTRUCCIÓN DEL CPC

En el diseño del concentrador solar se utilizó un ángulo medio de aceptación de 27°, que corresponde a una razón de concentración de 2.43; resultando un CPC con altura de 0.80 m que por ahorro de material se redujo a 0.55 m, con una razón concentración de 2.0X. La sección truncada es el 50 % de la altura y representa un 46% de material reflector y una concentración que se muestra con la Ec. 9.

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin \theta} \tag{9}$$

Esta solución determina la forma de un reflector completo sin truncar, pero la forma del reflector completo no es el diseño más práctico si el objetivo es obtener una razón óptima costo-beneficio, dado que los límites superiores del material reflector contribuyen en la reducción de la concentración de energía solar; porque es necesario truncar la curva de la cúspide a una altura menor.

En la figura 3, se muestra la forma de la copa y las parábolas realizadas sobre la hoja de triplay, se recortaron para obtener los moldes.

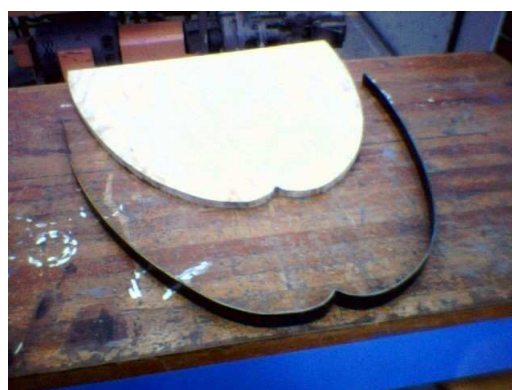


Figura 3.- Maderas con forma de la copa de Trombe-Meinell y sus parábolas continuas.

En la figura 4, se muestra el rolado de las soleras de 1" x 1/8", para reforzar la superficie del molde de madera que tiene la forma de la copa, que posteriormente se corta, para colocarla en el sistema del concentrador CPC.



Figura 4.- Rolado de la solera

En seguida se procedió a armar la estructura del concentrador, aplicando el ángulo y solera de 1" x 1/8", para quedar completamente estática sin ningún movimiento, como se muestra en la figura 5.



Figura 5.- Estructura estática del concentrador CPC

Se recortan las láminas de aluminio reflejante y se colocan a la estructura del concentrador solar CPC, como se muestra en la figura 6.



Figura 6.- Prueba de la colocación de las láminas de aluminio

En la figura 7, se muestra, la aplicación, se muestra los diversos tipos de tornillos, tuercas, rondanas, thinner, pintura, brochas, taladro, brocas, clavos, silicón y otros.

4 EQUIPO EXPERIMENTAL

Este equipo experimental, describe el sistema de captación de la energía solar en un CPC, para transformarla a energía térmica, que se encuentra instalado en el laboratorio de Ingeniería Electromecánica del Departamento de Metalmecánica del Instituto Tecnológico de Acapulco y que se utilizó para realizar la parte experimental de este trabajo.

La disponibilidad termodinámica y comportamiento térmico del CPC, es factible determinar el número de módulos necesarios para una aplicación en particular. Conectarlos en serie para aumentar la temperatura del fluido de transporte de calor y en paralelo para aumentar el caudal del flujo para una temperatura deseada.

La norma ANSI/ASHRAE, 93-1986 se utilizó como guía para la evaluación del CPC. Así también, se utilizaron las pruebas experimentales del calentamiento de agua, para la aplicación de la Norma NMX-ES-001-NORMEX-2005.



Figura 7.- Prueba de recirculación del agua en el sistema.

5 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

En la figura 8, observa el esquema del dispositivo experimental que se implementó para la evaluación del CPC. Los principales componentes son:

1. Tanque de almacenamiento de agua.
2. Bomba de agua rotatoria para comprimir el fluido de trabajo.
3. Tanque de almacenamiento térmico para almacenar el calor colectado.
4. Válvulas de aguja y de compuerta para desviar el flujo.
5. Medidores de presión o traductores de presión.
6. Termopares de temperatura.
7. Sistema de adquisición de datos.

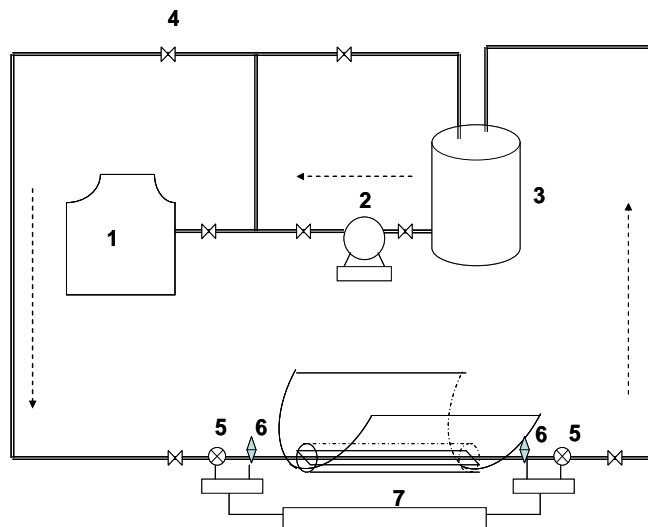


Figura 8.- Instalación completa del control del Concentrador CPC

Estas pruebas experimentales realizadas al concentrador solar consiste en determinar los servicios globales ofrecidos para el calentamiento de agua, que incluyen la determinación de la eficiencia instantánea de concentrador con la radiación normal a la superficie colectora, la medición de la capacidad calorífica efectiva del concentrador y la determinación de la constante de tiempo. A partir de los resultados obtenidos de estas pruebas, se define el tipo de arreglo que tendrá la sección de prueba para el análisis del proceso, como se muestra en la figura 9.

6 RESULTADO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Conforme el fluido fluye a través del receptor, este va ganando calor provocando que el flujo másico no sea uniforme, a consecuencia de esto, el factor F_R es variable y así mismo el rendimiento térmico del sistema. El factor FR es una función del valor del flujo, en los calentadores de agua y los cambios en el flujo son una diferencia significativa

en el rendimiento del colector. En ese contexto, las pérdidas de calor en los tubos, son significativas, debido a que no están aislados y las longitudes son grandes.



Figura 9.- Vista de la radiación solar sobre el foco del tubo de vidrio

7 CURVAS DE EFICIENCIA

El rendimiento térmico instantánea de un colector solar se determina con base en los diferentes niveles de irradiancia solar incidente, así como de la temperatura ambiente y de la temperatura de entrada del fluido de trabajo.

El método experimental de acuerdo a la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 para realizar las mediciones, debe ser en estado estable o casi-estacionario, siendo los parámetros a registrar la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo y determinar el calor útil ganado Qu . Así también, se determina la eficiencia instantánea (η) del colector. Las pruebas se realizaron en pares simétricos con respecto al mediodía solar, como el mediodía solar es a las 11:30 a.m. un buen par de pruebas simétrico sería: la primera prueba a las 11:00 a.m. y la segunda a las 12:00 p.m., los resultados de los pares son promediados. Las eficiencias instantáneas se determinan con la Ec. (10).

$$\eta = \frac{Qu}{G_b Ac} \quad (10)$$

Donde la Ec. (11), es para evaluar el calor útil, que depende de la temperatura de entrada y salida del fluido y del flujo másico que circula a través del colector.

$$Qu = m Cp (T_o - T_i) \quad (11)$$

La eficiencia se grafica como función de $\frac{(T_i - T_a)}{G_b}$ de acuerdo a la norma ASHRAE 93, donde la eficiencia térmica instantánea se determina con la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{Qu}{G_b Ac} = \frac{F_r [G_b (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)]}{G_b} \quad (12)$$

También se puede utilizar la Ec. (13), que depende de la temperatura ambiente y de la radiación solar.

$$Qu = A_c F_r [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (13)$$

Si se considera que $S = G_t (\tau\alpha)$, en donde G_t es la radiación global y $(\tau\alpha)$ es el producto de la transmitancia-absortancia y se sustituye en la Ec. (13), se tiene:

$$Qu = A_c F_r G_b (\tau\alpha) - F_r U_L A_c (T_i - T_a) \quad (14)$$

Se consideran condiciones casi permanentes en la evaluación del calor útil y sustituyendo los valores en la Ec. (12), se tiene que:

$$\eta = \frac{Qu}{G_b A_c} = F_r (\tau\alpha) - \frac{F_r U_L (T_i - T_a)}{G_b} \quad (15)$$

Y se tiene también que:

$$\eta_i = \frac{m Cp (T_o - T_i)}{A_c G_b} \quad (16)$$

Con el marco teórico establecido podemos determinar la eficiencia del CPC, cuyas gráficas de experimentación se muestran a continuación.

En la figura 10 se muestra la irradiancia medida, $874.84 \pm 15.77 \text{ W/m}^2$, que según la norma ASHRAE debería ser de al menos $790 \pm 32 \text{ W/m}^2$, por lo que podemos inferir que este parámetro se encuentra entre los valores requeridos.

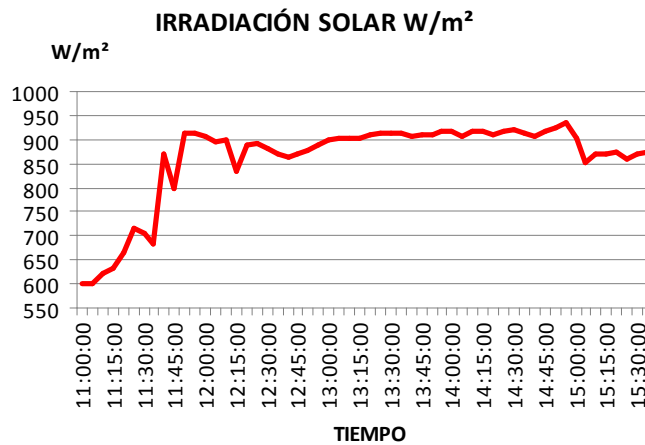


Figura 10.- Irradiancia medida para la prueba de eficiencia del día 14 de junio del 2010.

En la figura 11 se observa el incremento de temperatura de entrada y salida; también se muestra la diferencia después de cierto tiempo t .

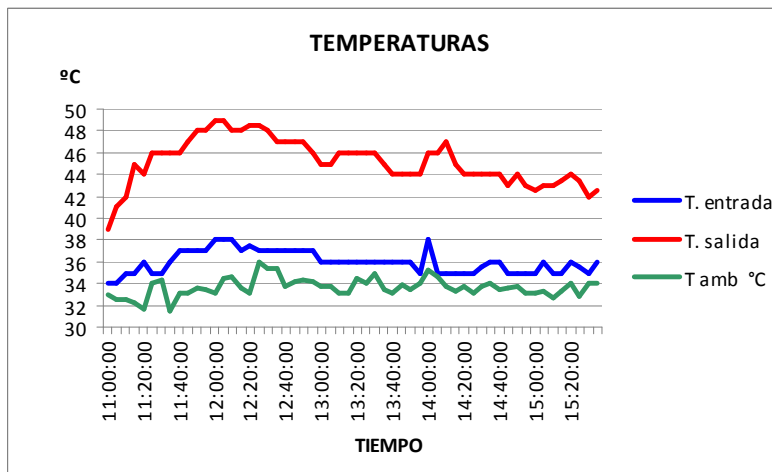


Figura 11. Temperaturas medidas para la prueba de eficiencia del día 14 de junio del 2010..

Los datos obtenidos de las pruebas fueron procesados en una hoja de cálculo. Con base en la eficiencia instantánea cuya prueba se presenta en la figura 12, se lleva a cabo una regresión lineal de primer orden, de donde se obtiene la Ec. (17)

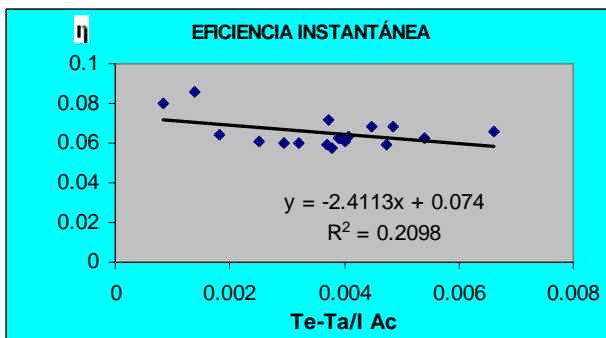


Figura 12.- Eficiencia experimental medida para un CPC. Se muestran 15 puntos. Prueba del 14 de junio del 2010.

$$\eta_i = 0.074 - 2.4113 \frac{(t_i - t_a)}{G_b} \tag{17}$$

Así, al comparar término a término, las Ecs. (16) y (17) se identifican los siguientes valores:

$$F_r (\tau\alpha) = 0.074 \tag{18}$$

$$F_r U_L = 2.4113 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \tag{19}$$

8 CONCLUSIONES

Como se observa, existe una buena concordancia entre los datos teóricos y los datos experimentales. Por lo que con base en los resultados experimentales se valida el modelo teórico desarrollado.

Cabe señalar que las eficiencias reportadas para el concentrador aquí descrito son inferiores al compararse con otra tecnología solar similar, las bajas eficiencias resultan del proceso de manufactura del concentrador, ya que en este caso solo se logró una eficiencia óptica de 25%. De aquí que, el proceso para generar la geometría CPC es primordial si se desea aumentar la eficiencia global del sistema de concentración. Adicional a lo anterior, es la importancia de la configuración del receptor con respecto al concentrador, lo cual también se incluye en el método experimental para la caracterización del sistema solar

9 REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE 93-1986 (1986). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, ASHRAE Standard.

Flores, V. and Almanza, R. (2002). Direct steam generation in parabolic trough concentrators with bimetallic receivers, 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, pp. 49-54.

Jimenez A. y Salgado I. “Desarrollo de Concentradores Solares CPC y Fotocatalizadores de Tio, para uso en Procesos de descontaminación” ANES-2006.UNAM.CIE.

McIntire, W.R. (1979). Truncation of nonimaging cusp concentrators, Solar Energy, Vol. 14, p. 351-355.

Ortega, N. y Best, R. (2002). Aplicación de un concentrador parabólico compuesto como generador de vapor en un refrigerador solar por absorción, XXVI Semana Nacional de Energía Solar, Chetumal, Q. R., p. 225-230.

Oskam, A.H., Higuera, S.E., Cervantes, J. y Estrada, C. (1994). Diseño y construcción de un dispositivo para el estudio de flujos radiativos concentrados, XVIII Reunión Nacional de Energía Solar, Hermosillo.

Rivera, W. and Rivera, C.O. (2002). Modeling of a CPC working as the generator-absorber of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with the ammonia-lithium nitrate mixture, 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, p. 703-710.

Zarza, E. et al. (2002). Direct steam generation in parabolic troughs final results and conclusions of the DISS project, 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, p. 21-28.

Abstrac.- *In this work the design and characterization of a solar concentration system is presented, the system is employed for the saturated steam generation. This uses a parabolic compound concentrator, and his design is developed out from a theoretical model, which is baesd in climatic parameters of the región, the captation of solar energy and conditions in situ for the instalation of solar system.*

The experimental tests conducted in the solar system are based on the Mexican rule for solar collectors NMX-IS-001-NORMEX-2005, which leads to determine the instantaneus efficiency and thermal capacity. The results concludes that the process of building of the concentrator with CPC geometry is essential to achieve a high termal performance of the system.

Keyword: *Design, characterization solar concentration system*