

COCINA SOLAR DE ALTO RENDIMIENTO CON APLICACIÓN DE TUBO EVACUADO SELECTIVO Y CONCENTRADOR CPC

N. Di lalla

CONICET-Departamento de Materiales CNEA.
Tel (011) 6772-7764. e-mail: ndilalla@gmail.com

RESUMEN: Se presenta un nuevo diseño de cocina solar indirecta. El diseño combina tres tecnologías de alto rendimiento: la de tubos evacuados, la de absorbedores selectivos, y la de concentradores parabólicos compuestos (CPCs). Se muestra además, un método alternativo desarrollado para el cálculo y trazado de CPCs para absorbedores de geometría circular. El absorbedor utilizado en el prototipo es un tubo de vidrio evacuado, con superficie interior de alta selectividad. El mecanismo de transferencia de calor, desde el absorbedor al recipiente de cocción, es a través de la convección natural de aceite ecológico. Las características de diseño y los elementos utilizados permiten un muy eficiente aprovechamiento de la energía solar, gracias a lo cual el sistema puede acceder fácilmente a temperaturas cercanas a los 170°C, suficiente para cubrir las necesidades de cocción de todo tipo de alimentos.

Palabras clave: Cocina Solar, Selectividad, CPC.

INTRODUCCIÓN

Desde los primeros trabajos con cocinas solares realizadas por Horace de Saussure en 1767, son variados los diseños propuestos hasta nuestros días. Durante mucho tiempo el diseño más común fue el de la cocina "tipo caja". Las mismas se basan en un receptáculo, aislado lateralmente, que cuenta con una cubierta superior transparente, por la que entra la radiación solar. El calor acumulado por estos dispositivos permite alcanzar temperaturas moderadas (a veces algo mayores a los 100°C), lo cual limita su aplicación a ciertos tipos de cocciones. En la búsqueda de acceder a mayores temperaturas, con el tiempo, se recurrió a la utilización de concentradores parabólicos de revolución. En estos casos, lo usual es que el elemento absorbedor, la olla, se coloque directamente en el foco del sistema (cocina solar directa). Con esta configuración, la limitación de la eficiencia del sistema se debe a que la olla está expuesta a los tres mecanismos de transferencia de calor hacia el medio ambiente. Por otra parte, los concentradores parabólicos convencionales necesitan ser reorientados, la incorporación de un sistema para seguimiento solar, encarece y complica los dispositivos. Una manera de sortear este último inconveniente es a través de la utilización de concentradores de óptica anidólica, o sea de no formación de imagen. Estos permiten concentrar la radiación, en un sector focal durante cierto período de tiempo establecido, sin necesidad de reorientación. Esta óptica fue desarrollada independientemente en EEUU (Hinterberger and Wiston, 1966), la URSS (Baranov and Melnicov 1966) y Alemania (Ploke, 1967). Los dispositivos que emplean este principio son denominados concentradores parabólicos compuestos ó CPCs (Welford and Winston, 1989). Por sus particulares propiedades opto-geométricas (Tapia et al. 2009) los CPCs han tomado mucha relevancia en los últimos años en aplicaciones tecnológicas en el campo fototérmico. En particular, cabe destacar, que los CPCs de dos dimensiones tienen la bondad de permitir la utilización de receptores lineales. Con esta última configuración, el calor generado en el receptor puede ser luego dirigido a la olla de cocción (cocina solar indirecta). Aquí, si el receptáculo de cocción está adecuadamente aislado del exterior, se evitan las pérdidas mencionadas para el caso de las directas.

En los últimos años, se han propuesto distintos diseños de cocinas solares indirectas que utilizan la tecnología CPC. En ellas el calor se dirige hacia la olla de cocción por intermedio de tubos de calor (Collares Pereira et al., 2001). Con estos sistemas se puede acceder fácilmente a temperaturas cercanas a los 170°C, pero un punto débil, si no se diseña adecuadamente, radica en las excesivas resistencias térmicas en el proceso de intercambiar calor con la olla.

A raíz de lo expuesto, en busca de mejorar el rendimiento de los dispositivos de cocción solar, en el presente trabajo se propone un nuevo diseño de cocina solar indirecta. La misma utiliza la tecnología de los CPCs, absorbe la radiación solar a través de un tubo selectivo con aislación de vacío, y transmite el calor al receptáculo de cocción a través de la convección natural de aceite. El dispositivo elaborado posee un ángulo de aceptación de 30°, o sea permite dos horas de concentración sin necesidad de redireccionamiento, y es capaz de acceder a temperaturas necesarias para la cocción de todo tipo de alimentos.

La figura 1 muestra un esquema del dispositivo propuesto.

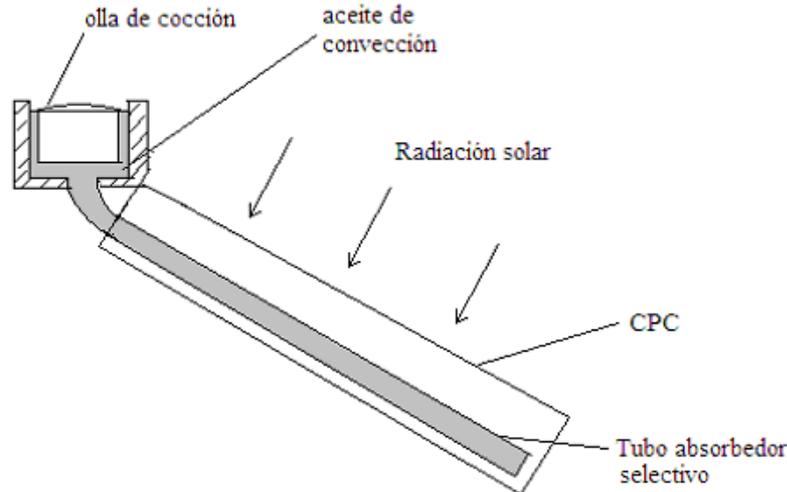


Figura 1. Esquema lateral de la cocina solar propuesta.

DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DE COCINA SOLAR

Fundamentos teóricos del diseño

Consideremos un sistema concentrador que opera con un absorbidor aislado del medio externo, de tal manera de despreciar el calor intercambiado por conducción y convección (característica típica de la aislación por vacío). Entonces podemos decir que la temperatura máxima a la que puede acceder ese absorbidor, puede calcularse estableciendo el equilibrio entre la energía que este absorbe, y la que emite por radiación. Esta situación está dada por la igualdad (1).

$$IC\rho A\alpha = \varepsilon A\sigma T^4 \quad (1)$$

Donde: I es la irradiancia solar en W/m^2 , A es el área del absorbidor, C es la concentración geométrica del sistema (relación entre el área de captación del concentrador y el área del absorbidor), ρ es la reflectividad de la superficie del concentrador, y $\beta = \alpha/\varepsilon$ es la selectividad de la superficie del absorbidor (α y ε son la absorbancia y la emitancia de su superficie).

Despejando T de (1) se obtiene la temperatura máxima a la que puede acceder el absorbidor en esa situación, ecuación (2):

$$T_{\max} = \sqrt[4]{IC\beta\rho/\sigma} \quad (2)$$

Queda claro, observando la ecuación (2), que para obtener un dispositivo de alto rendimiento de conversión, y que acceda a las más altas temperaturas: el absorbidor tendrá que tener aislación por cámara de vacío, deberá operar en condiciones de máxima concentración, y deberá contar con propiedades selectivas. En el caso que el absorbidor forme parte de una cocina indirecta, también habrá que tener en cuenta que el calor producido, en él, deberá ser llevado eficientemente hacia el receptáculo de cocción. Teniendo en cuenta las pautas expuestas, se diseñó una cocina solar del tipo indirecta.

Diseño y cálculo del perfil CPC

Se diseñó un concentrador de óptica del tipo CPC de dos dimensiones para un receptor de sección circular, geometría compatible con la del absorbidor tubular selectivo al vacío elegido. El CPC se realizó a partir de la complementación de dos tramos de parábola y dos envolventes de círculo, y posee un ángulo de aceptación de $\theta = 30^\circ$.

El punto de partida para el diseño, y para el trazado de las envolventes de círculo, fue el dato del diámetro de absorbidor, en nuestro caso el diámetro externo de un tubo de borosilicato (47 mm). Entonces, con el valor del radio del círculo base, $R = 2,35$ cm, se trazaron sus envolventes, teniendo en cuenta las ecuaciones paramétricas (3) que modelan los pares (x,y).

$$\begin{aligned} x(\alpha) &= R(\cos \alpha + \alpha \operatorname{sen} \alpha) \\ y(\alpha) &= R(\operatorname{sen} \alpha - \alpha \cos \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

Las involutas se truncaron a la altura del diámetro horizontal del círculo base, así se obtuvieron los puntos A y B de la figura 2.

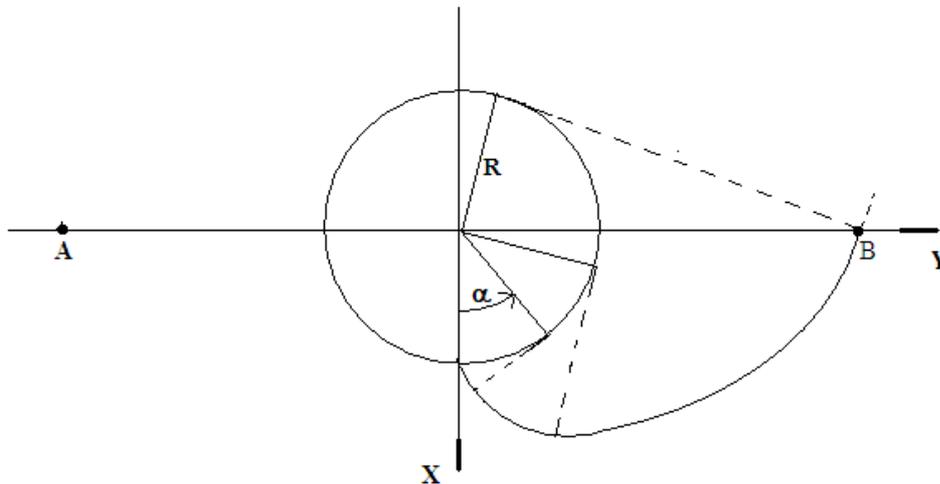


Figura 2. Esquema: truncado del envolvente de círculo a la altura del diámetro horizontal.

Los puntos A y B conforman un segmento de longitud L, su valor práctico se obtiene con la condición $x = 0$ en la ecuación (3), obteniéndose de esta manera la ecuación trascendente $\alpha = -\cotg \alpha$. Hallando una solución aproximada de α (en este caso $\alpha = 0,89\pi$), y reemplazando su valor en $y(\alpha)$ de la ec.(3) se obtiene la ubicación del punto B. El otro ramal es simétrico, así se obtiene la longitud del segmento L, que en nuestro caso fue de 13,95cm.

Luego, a partir los puntos A y B se empalmaron dos segmentos de una misma parábola, estos poseen sus ejes rotados de manera que el punto A es el foco del tramo derecho, y el B del izquierdo, figura 3.

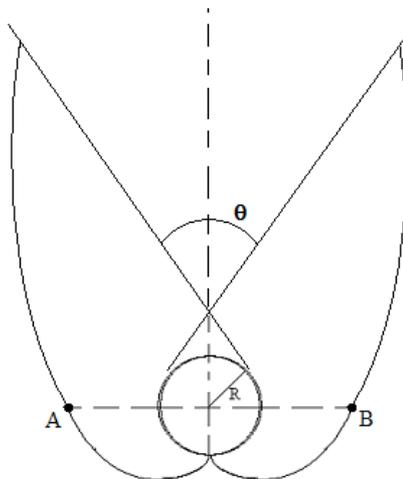


Figura 3. Esquema de perfil CPC propuesto para un absorbedor de geometría circular.

Ahora expliquemos como se halló la ecuación de la parábola, que fragmentada dio los dos tramos a empalmar con los envolventes de círculo en A y B. Centralicemos el estudio en el tramo de parábola izquierdo, recordando que su foco está ubicado en el punto B, el eje de la misma está rotado un ángulo $\theta/2$ respecto de la vertical ($\theta/2$ es el semi ángulo de aceptación, en este diseño es 15°) ver el esquema izquierdo de la figura 4. Entonces pensemos, para tener una representación más simple, a ese tramo de parábola rotado de tal manera que su eje sea vertical, o sea también el segmento AB rota un ángulo $\theta/2$. Entonces este segmento une al foco de la parábola (punto B) con un punto de la misma (punto A) ver esquema derecho de la figura 4.

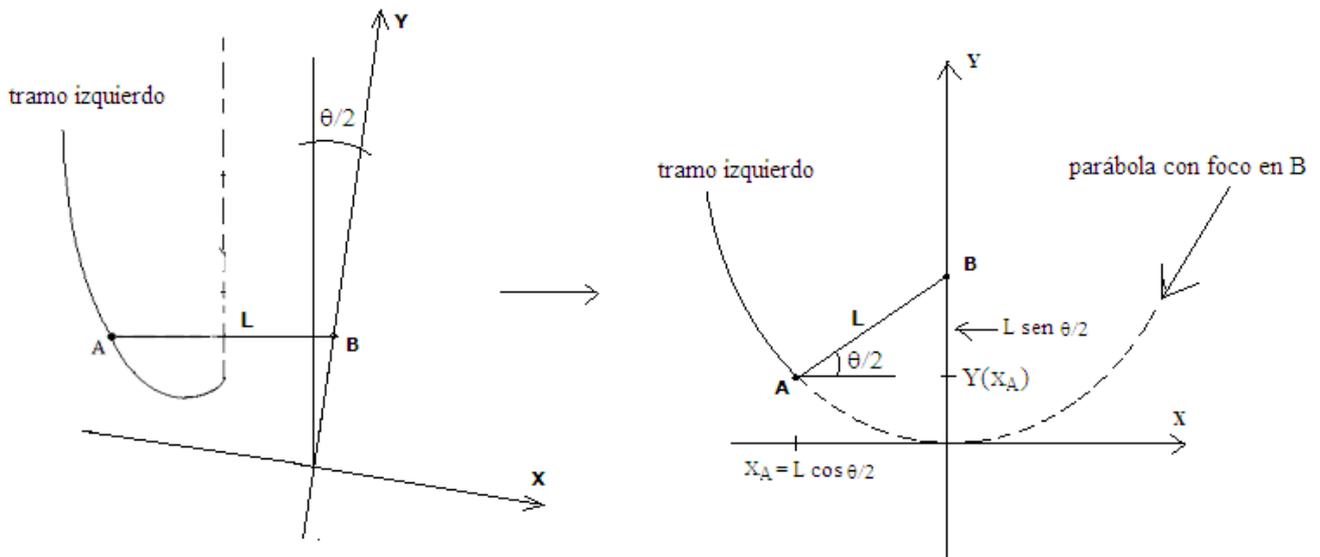


Figura 4. Esquema: posicionamiento vertical del tramo de parábola izquierdo, para su fácil cálculo analítico.

El problema se resume a hallar la ecuación de la parábola, del tipo $Y(x) = 1/4F X^2$, que tiene su foco (de valor F) en el punto B y que además contiene al punto A. Para ello se escribe la coordenada del punto B como suma de la proyección en el eje Y del segmento L, y del valor de la función, a hallar, a la altura del punto A, ecuación (4)

$$F = L \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4F} \left\{ L \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\}^2 \quad (4)$$

Resolviendo la ec.(4) se obtiene F en función de L y θ , y reemplazando en $Y(x) = 1/4F X^2$ se obtiene la ecuación (5).

$$Y(x) = \frac{x^2}{2L \left\{ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + 1 \right\}} \quad (5)$$

Entonces reemplazando $\theta = 30^\circ$ y $L = 13,94$ cm en (5) se obtuvo la ecuación de la parábola buscada.

Una plantilla del perfil del CPC así diseñado, fue trasladada a madera multilaminada de 11,5 mm de espesor, se cortaron tres costillas con esa forma. Los tamos de parábola se truncaron en su parte superior de manera de obtener un ancho de apertura de 0,44 m. Las costillas se ensamblaron en línea en forma equidistante, confeccionado una estructura de aproximadamente 1,5 m de longitud. La estructura fue recubierta con una lámina de aluminio comercial de 0,4 mm de espesor y de 86% de reflectancia (su precio es de 23 US\$/m²), resultando un concentrador de área de captación de aproximadamente 0,66 m². El factor de concentración geométrica resultó de aproximadamente $C = 9$.

Tubo absorbedor

Como elemento absorbedor se utilizó un tubo evacuado de vidrio borosilicato de 47 mm de diámetro externo, la longitud del tubo es de 1,5 m. El mismo posee una doble pared formando una cámara de vacío, lo que le da la fundamental cualidad de reducir al máximo las pérdidas conductivas y convectivas hacia el exterior. El tubo posee una multicapa absorbidora de estructura Cu / AlN (cobre /nitruro de aluminio) depositada en la cara exterior del vidrio interno, su absorbancia solar promedio es $\alpha \geq 94.5\%$, y su emitancia térmica $\epsilon \leq 5.5\%$. Estos tubos pueden adquirirse a precios muy razonables (a 18 US\$ la unidad). La figura 5 muestra un corte transversal esquemático del tubo absorbedor.

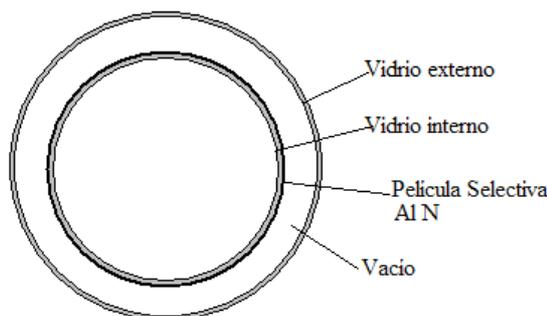


Figura 5. Esquema: corte del tubo absorbedor.

Olla de cocción

La olla de cocción utilizada es de aluminio y posee aproximadamente dos litros de capacidad. La misma se dispone en el interior de otro recipiente de acero inoxidable, de aproximadamente tres litros de capacidad, denominado contenedor. Este último contiene el aceite que transmite el calor por convección desde el tubo absorbedor a la olla de cocción. En la parte inferior del recipiente contenedor se soldó una salida tubular curva, que termina en una pieza a la cual se le adosa un sello de goma siliconado. En dicho sello se conecta el tubo absorbedor, esquema de la figura 6.

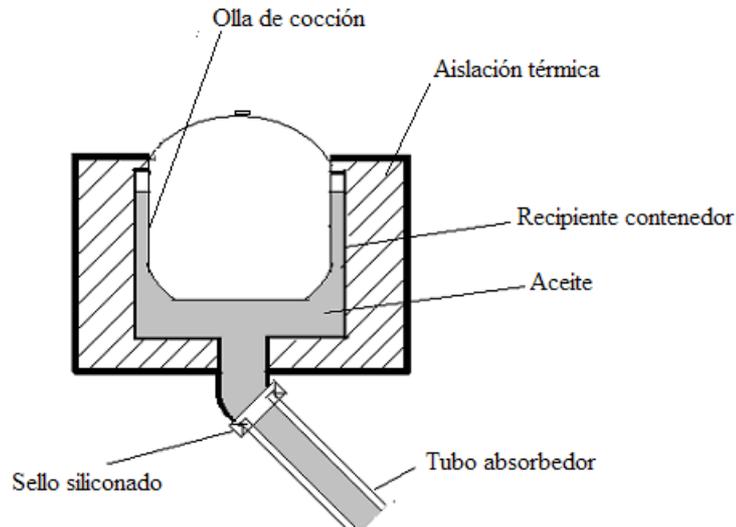


Figura 6. Detalle esquemático de la olla de cocción y su conexión al tubo absorbedor.

Por razones ecológicas y de economía, el aceite convectivo utilizado fue aceite vegetal de cocina, en nuestro caso de soja. El recipiente contenedor se aisló térmicamente del exterior a través de una doble capa, una adjunta al contenedor de lana de vidrio, y otra externa de poliestireno expandido de alta densidad de 10 cm de espesor.

MEDICIONES EXPERIMENTALES

Se midieron las evoluciones de temperaturas, en el aceite y en la olla de cocción, en dos etapas. En la primera, en el aceite sin carga térmica, hasta llegar a una temperatura preestablecida de 150°C. En la segunda, colocando consecutivamente un litro de agua en la olla de cocción, midiéndose simultáneamente la evolución de temperaturas en el aceite y en el agua.

Las gráficas de las figuras 7 y 8 muestran, respectivamente, mediciones efectuadas en Buenos Aires: en un día soleado típico de invierno y en otro de verano.

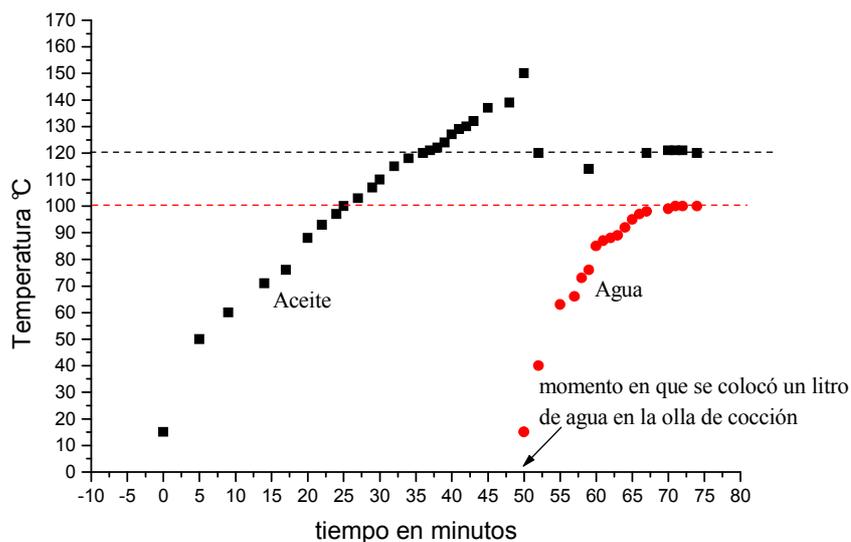


Figura 7. Evoluciones de temperaturas en el aceite y en la olla de cocción, en un día soleado de invierno de Bs As. (Temperatura ambiente 13°C, $I = 590 \text{ W/m}^2$).

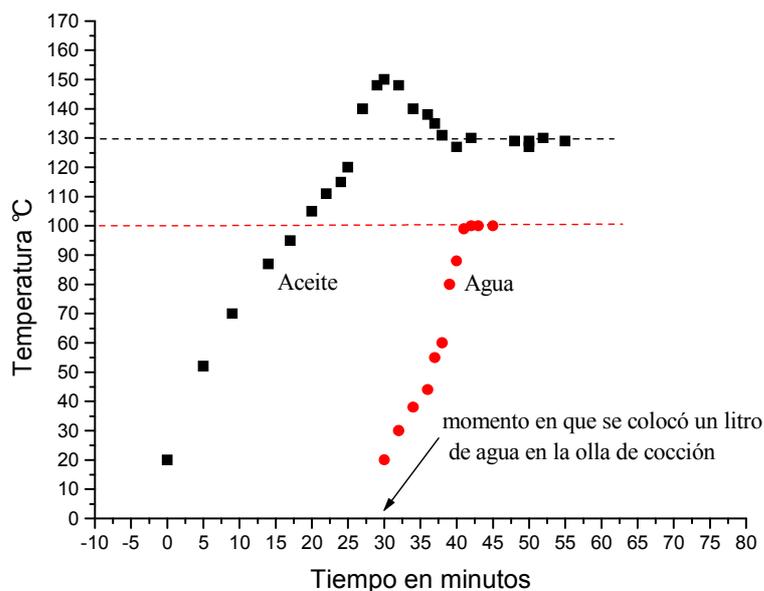


Figura 8. Evoluciones de temperaturas en el aceite y en la olla de cocción, en un día soleado de verano en Bs As. (Temperatura ambiente 30°C, $I = 890 \text{ W/m}^2$).

En ambas experiencias se observó que, al momento de colocar el agua en la olla de cocción la temperatura del aceite (en ese momento de 150°C) todavía estaba en franco aumento. Este hecho indica que el sistema puede acceder fácilmente a mayores temperaturas. En otras experiencias realizadas, se observó que si se coloca solo aceite en la olla de cocción, este puede alcanzar fácilmente temperaturas del orden de los 170°C, suficiente para la realización de frituras. También se observó que en el caso de no colocar líquido de la olla, la misma puede ser utilizada para hornear.

CONCLUSIONES

El concepto de cocina solar que se propone en esta presentación, fue diseñado en función de una máxima eficiencia de conversión. Con el fin de poder acceder rápidamente a temperaturas apropiadas para la realización de todo tipo de cocciones.

Gracias a sus características de diseño la cocina, de solo $0,66 \text{ m}^2$ de área de captación, puede llegar fácilmente a temperaturas del orden de los 170°C, lo cual permite hervir, freír y hornear.

La utilización de aceite vegetal de soja para la transferencia de calor, resultó muy satisfactoria. Tanto en lo referente a sus propiedades termo convectivas, como a sus características ecológicas.

Este concepto de cocina solar, permite extender el área de captación con la utilización de más tubos absorbedores, esto está actualmente en etapa de desarrollo.

Actualmente, además, estamos trabajando en la incorporación de un sistema de transferencia térmica a través de tubos de calor, con el fin de establecer una comparación de funcionamientos.

REFERENCIAS

- Baranov V.K. and Melnicov G.K., Soviet Journal of Optical Technology 33. 408 (1966).
 Collares Pereira M., Maldonado Carbajal W. y Farinha Mendez J.. Primeros Ensayos de 2 Cocinas Solares con Colector CPC-Tubo de Calor. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol 9, pp 7-14, 2001.
 Hinterberger and Winston R. Rev Sci. Instr.37, 1094 (1966).
 Ploke M. Optik 25, 31 (1967).
 Tapia S. y Del Rio J. A. Concentrador Parabólico Compuesto: una descripción opto-geométrica. REVISTA MEXICANA DE FÍSICA 55 (2) 141-153 (2009).
 Welford, W.T and Winston R. (1989) High Collection Nonimaging Optics. Academic Press. New York.

ABSTRACT

In this work a new indirect solar cooker design is presented. The design applies three high performance technologies: evacuated tube, selective absorber, and compound parabolic concentrator (CPC). An alternative method for calculating and plotting a CPCs with circular geometry absorbers is shown. The absorber used in the prototype is a evacuated glass tube, with a high selectivity inner surface. The mechanism of heat transfer from the absorber to the cooking vessel is natural convection

of organic oil. The device and its components allow a very efficient use of solar energy; on this basis, the system can reach easily to 170 ° C, enough to cover the cooking requirements of all types of food.

Keywords: Solar Cooker, Selectivity, CPC.