

LA ÓPTICA ANIDÓLICA APLICADA EN CONCENTRADORES SOLARES ÓPTIMOS

Eduardo A. Rincón Mejía y Álvaro E. Lentz Herrera

Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México,
San Lorenzo 290, Col. Del Valle, México D.F., 03100, México,
Tel. + 52 (55) 5488 6661 x 15504, Número de Fax + 52 55 5575 5805,
rinconsolar@hotmail.com; solar_lentz@yahoo.com.mx

Ma. Dolores Duran García

Facultad de Ingeniería de la UAEMex
mddg_2210@hotmail.com

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones específicas requiere de temperaturas de operación limitada en rangos estrechos si se busca un alto rendimiento térmico. Para alcanzar estas temperaturas por lo general se requiere concentrar la energía solar mediante espejos y/o lentes. Sin embargo, una concentración excesiva conduciría a temperaturas excesivamente altas que implicarían mayores pérdidas térmicas y en consecuencia, un bajo rendimiento. Por el contrario, si la temperatura no alcanza el nivel requerido, fallará en lograr su cometido.

Ahora bien, la mayoría de los concentradores solares comerciales y para investigación están basados en la óptica de enfoque, que por lo general emplea espejos de sección parabólica. La desventaja de la óptica de enfoque es que los sistemas de concentración basados en ésta requieren de seguimiento del Sol, funcionan sólo con radiación directa, requieren espejos finos (de alto coste), y quedan lejos del límite termodinámico de concentración. La alternativa es emplear la óptica anidólica (sin imágenes), con lo que es posible soslayar las desventajas anteriores.

En este trabajo se presentan los principios y criterios básicos para alcanzar concentraciones "a la medida de la aplicación deseada", presentando cuatro ejemplos exitosos de sistemas de concentración solar basados en la óptica anidólica.

ABSTRACT

An efficient use of solar energy in specific applications requires temperatures of operation limited in narrow intervals, if a thermal high performance is desired. In order to reach these temperatures generally it is necessary to concentrate the solar energy by means of mirrors and/or lenses. Nevertheless, an excessive concentration would lead to too high temperatures that would imply great thermal losses and a low yield. On the contrary, if the temperature does not reach the required level, the concentrator will fail in doing its job.

The majority of solar concentrators -both for research and commercial applications- are based on imaging optics that generally uses mirrors of parabolic section. The drawback of imaging optics is that the systems of concentration based on this one require tracking the sun, they work only with direct radiation, they need fine mirrors (of high cost), and their concentration are far from the thermodynamic limit of concentration. The alternative is to use non-imaging optics (optics without images), and so it is possible to avoid the previous disadvantages.

In this paper the basic principles and criteria to reach concentrations in accordance with the projected application, and four successful examples of concentrating solar systems, based on non-imaging optics, are presented.

Palabras claves: concentrador solar, óptica anidólica.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración basados en la óptica de imagen tienen tres componentes principales: el objeto, la óptica y la imagen que ésta forma. El objeto es considerado como un conjunto de puntos que emite luz en todas direcciones. La luz, o parte de ella, de cada punto del objeto es capturada por el sistema óptico y concentrada en un punto de la imagen. Las distancias entre los puntos de la imagen pueden ser escaladas relativamente a aquellas en el objeto, de lo que resulta una magnificación. Los sistemas ópticos de "no- imagen", en lugar de un objeto, tienen una fuente de luz y reemplazando a la imagen, un receptor. En vez de una imagen de la fuente, la óptica produce un patrón de iluminancia (ó irradiación) prescrito en el absorbedor. La primera aplicación de la óptica de "no-imagen" fue el diseño de concentradores que pudieran actuar en el límite termodinámico máximo teórico. El concentrador parabólico compuesto (CPC) fue el primer concentrador bidimensional (2-D) alguna vez diseñado [1].

Las características principales de un 3D-CPC son: su concentración geométrica, su ángulo de aceptación, la sensibilidad a los errores de su reflector, la sensibilidad a los errores de seguimiento del Sol, el tamaño del área reflectora y el número promedio de reflexiones. Es importante evaluar también la eficiencia térmica. La concentración solar se vuelve necesaria cuando son requeridas altas temperaturas y cuando el costo del absorbedor es mucho más alto que los espejos mismos, como es el caso de las celdas fotovoltaicas quienes desempeñan el papel de receptores del flujo solar que los espejos concentradores entregan [2].

MARCO TEÓRICO

El aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones específicas requiere de temperaturas de operación limitadas en rangos estrechos, cuando se persigue un alto rendimiento térmico. Para alcanzar estas temperaturas se requiere concentrar la energía solar mediante espejos y/o lentes. Sin embargo, una concentración excesiva conduciría a temperaturas excesivamente altas que implicarían mayores pérdidas

térmicas, y en consecuencia, un bajo rendimiento. Por el contrario, si la temperatura no alcanza el nivel requerido, fallará en lograr su cometido.

Los captadores solares que tienen una razón de concentración solar geométrica C_g de 1 – que en realidad no concentran la luz solar- por lo general son los colectores planos o de tubos evacuados. Estos dispositivos apenas permiten superar los 100 °C.

Cuando se necesita una mayor temperatura, es necesario recurrir a la concentración solar. Los concentradores solares tienen una razón de concentración geométrica C_g mayor que uno. Con estos dispositivos se pueden alcanzar temperaturas mayores a 100 °C, pero menores - de acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica- a la de la cromosfera del Sol, alrededor de 5800 K.

La razón de concentración geométrica se define como:

$$C_g = A_P / A_B$$

En donde: A_P es el área de apertura del captador, y A_B es área de receptor o “absorbedor”.

La concentración geométrica para un concentrador solar del tipo parabólico compuesto (CPC) es tratada en varias publicaciones, destacándose la de Roland Winston et al. [1].

Para un CPC bidimensional sin trincar $C_g = 1 / \text{Sen}(\theta_0)$; y para un CPC tridimensional, también sin truncamiento: $C_g = 1 / \text{Sen}^2(\theta_0)$, en donde θ_0 es el semiángulo de aceptación del concentrador.

Así por ejemplo, para θ_0 igual a 30°: $C_{g\ 2D} = 2$ y $C_{g\ 3D} = 4$

Muy idealmente, la temperatura de estancamiento que es posible alcanzar con un concentrador solar está dada por:

$$T = T_s [C_g / C_{m\acute{a}x}]^{1/4}$$

en donde $T_s = 5800$ K es la temperatura efectiva del Sol, C_g es la concentración geométrica y $C_{m\acute{a}x} \sim 46\ 000$ es la concentración ideal máxima. En la tabla 1 se listan algunos valores de las temperaturas de estancamiento correspondientes a valores crecientes de la concentración geométrica C_g .

Tabla 1. Temperaturas ideales de estancamiento en función de la concentración geométrica solar C_g .

<i>Concentración geométrica C_g</i>	<i>Temperatura ideal de estancamiento</i>
1	123 °C
2	199 °C
4	288 °C
10	431 °C
100	979 °C
1 000	1 954 °C
10 000	3 687 °C
46 000	5 528 °C

Nótese que una calentador solar de placa plana, sin concentración (más bien, con una concentración unitaria), puede rebasar los 100 °C de temperatura de estancamiento, por lo que debe preverse un control de la presión para evitar problemas. Asimismo, es de remarcar que se pueden alcanzar temperaturas para fundir aluminio, acero y otros metales con concentraciones solares moderadas, inferiores a 1000 soles. Con energía solar concentrada se puede en principio satisfacer cualquier necesidad térmica. Algunos ejemplos de concentradores exitosos se presentan en seguida.

EJEMPLOS DE SISTEMAS EXITOSOS

TEMASCALES SOLARES. El Temascal es una tradición ancestral proveniente de nuestras culturas mexicas antiguas. Su nombre proviene de la lengua Náhuatl y significa "casa de vapor" (de temas - vapor, y calli - casa). Esto porque el baño se realiza dentro de casetas que por lo general cuentan con una cúpula de pequeña o mediana dimensión, y cavidades en las que se introducen piedras porosas

previamente calentadas al rojo vivo, sobre las que se vierte una infusión de plantas medicinales. Generalmente las piedras se calientan con leña hasta una temperatura entre 350 y 450 °C.

El consumo de leña para el calentamiento de las piedras es excesivo si se considera que se requiere aproximadamente un kilogramo de leña por cada roca con un volumen de ½ litro. Si se requieren por sesión de al menos 6 piedras se puede estimar el empleo de al menos 3 kilogramos de leña para cada baño, lo que ocasiona emisiones de humos peligrosos y cierta deforestación, si el consumo de leña no se hace sustentablemente. Esta es la situación que se desea eliminar con los concentradores multicompuestos al sustituir la leña por la energía concentrada de la luz solar.

El baño de temascal ayuda al relajamiento del sistema muscular, al alivio de contracturas y dolores de espalda, de rodillas, tobillos, etcétera, gracias a los efectos de la temperatura y los aceites volátiles de las plantas que se emplean. Con la temperatura varios grados superior a la corporal, y la ablución con agua fresca, se estimula la circulación sanguínea, ayudando a corregir problemas de varices, úlceras varicosas, adormecimiento de manos y pies, presión alta o baja, entre otros padecimientos. Se dice que el baño temascal aumenta la producción de leucocitos y se ha observado que personas que toman regularmente este tipo de baño, mejoran su estado general de salud y bienestar físico.

El concentrador solar propuesto tiene como antecedente un captador solar de tres etapas de concentración geométrica teórica C_g de 30 mil soles [3], que se muestra en la figura 1.

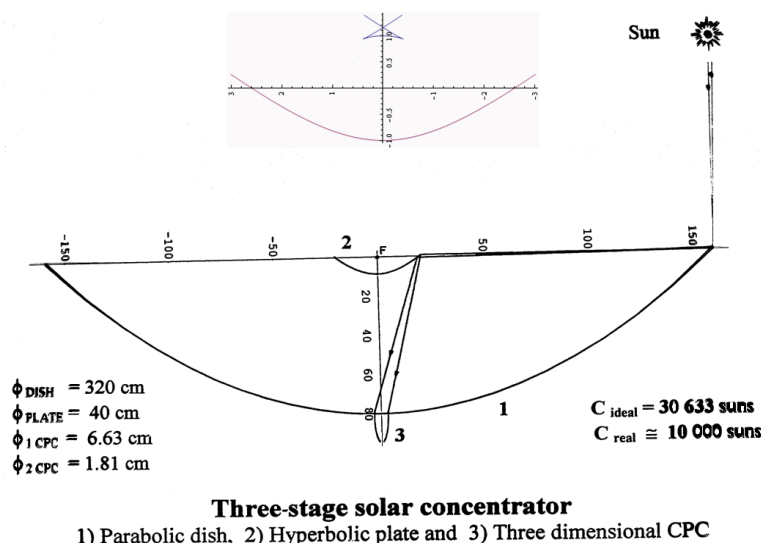


Figura 1. Concentrador solar tridimensional de tres etapas con concentración geométrica teórica $C_g = 30\ 633$ [3].

Descripción del concentrador.- El concentrador multicompuesto *CMC* consta de 9 espejos, distribuidos en tres pares de espejos parabólicos, un par de espejos planos, más un espejo hiperbólico, como se muestra en la figura 2. Los primeros dos pares de espejos son parabólicos bidimensionales, el segundo par de espejos son planos, dos pares de espejos pertenecen al CPC bidimensional de la parte inferior del concentrador, y el último es una hipérbola, también bidimensional. La salida del CPC desemboca en un recipiente cilíndrico (tubo de 20 cm de diámetro interior) que se calienta por la luz concentrada proveniente de éste.

Dentro del cilindro (horno) se coloca un recipiente de acero inoxidable en donde se ponen las piedras que tienen un volumen medio de ½ litro. Este recipiente tiene una catarina para poder desplazar las piedras, las cuales entran por un extremo del tubo y salen por el otro extremo, contándose con tapas para ambos extremos. Todo el recipiente y las tapas se aíslan para reducir las pérdidas térmicas. El concentrador debe de ajustarse al menos cada 30 minutos para seguir el movimiento aparente del Sol.

En este diseño la concentración geométrica del concentrador multicompuesto es de 28,5, suficiente para alcanzar la temperatura de operación deseada de 400 °C, o ligeramente superior.

En la figura 3 se muestran los espejos parabólicos, planos e hiperbólico, así como el CPC bidimensional que forman el *CMC*. No se muestra el primer par de espejos parabólicos, que van transversales a los espejos de esta figura.

En la figura 4 se muestran las dimensiones de los espejos parabólicos secundarios y del hiperbólico, así como del CPC. La concentración bidimensional de este arreglo es $C_g = 14,56$. Con los espejos parabólicos transversales, la concentración solar (tridimensional) aumenta a 28,5 con lo que la temperatura de operación, ya considerando pérdidas térmicas por conducción y convección, es ligeramente superior a 450 °C, excelente para este propósito.

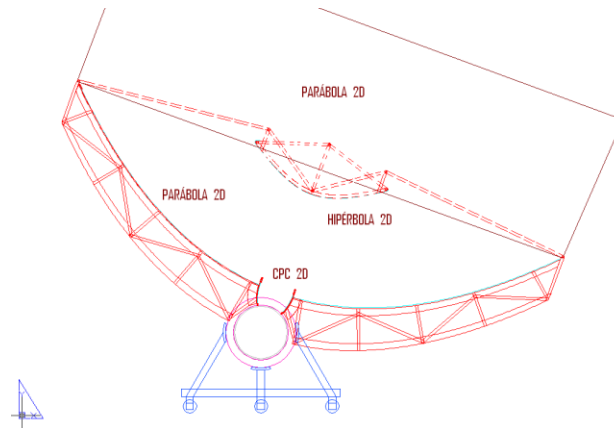


Figura 2. Vista lateral del concentrador solar multicompuesto.

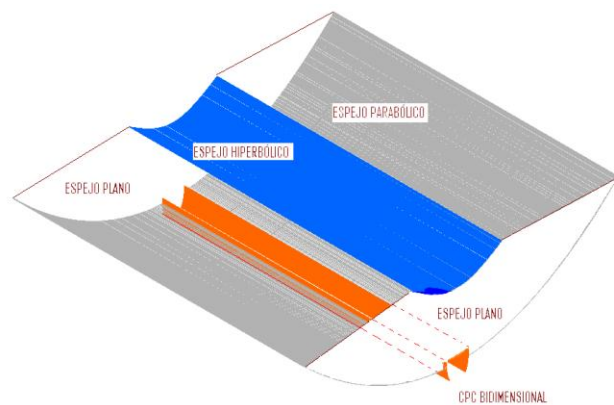


Figura 3. Vista isométrica del concentrador solar multicompuesto, sin el primer par de espejos parabólicos.

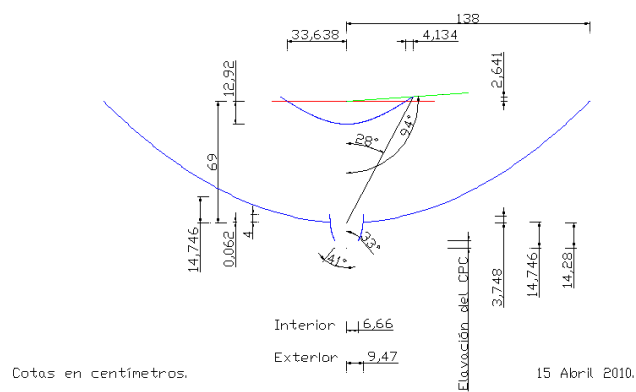
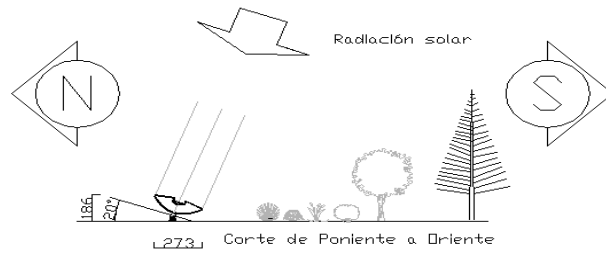


Figura 4. Dimensiones de los espejos del CMC para una concentración bidimensional $C_g = 14,56$. Con los espejos transversales la concentración aumenta a 28,5 para una temperatura de operación superior a 400 °C.

Finalmente, en la figura 5 se representa en un dibujo arquitectónico, la posición del concentrador con respecto al movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste.

Concentrador de 3 etapas para calentar piedras para baño de temazcal



El horizonte Oriente, Sur, Poniente debe estar libre de obstáculos con el propósito de que el dispositivo reciba la radiación solar sin interferencias

Vista de Planta

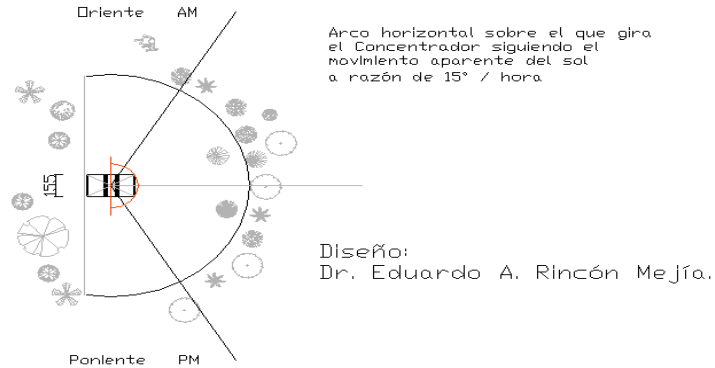


Figura 5. Esquema arquitectónico de la orientación del concentrador solar para temazcal.

HORNOS SOLARES PARA COCCIÓN DE ALIMENTOS. Se han desarrollado hornos y comales solares con los que es posible guisar cualquier alimento en casi todos los días del año. Los hornos constan de un Concentrador Multicompuesto CMC de 8 espejos, distribuidos en cuatro pares, como se muestra en la figura 6. Tienen un recipiente hermético cilíndrico que se calienta por la luz solar concentrada. Dentro del horno se coloca otro recipiente, de acero inoxidable, en donde se ponen los alimentos. Nada se puede quemar, ya que la temperatura no sobrepasa los 140° C.

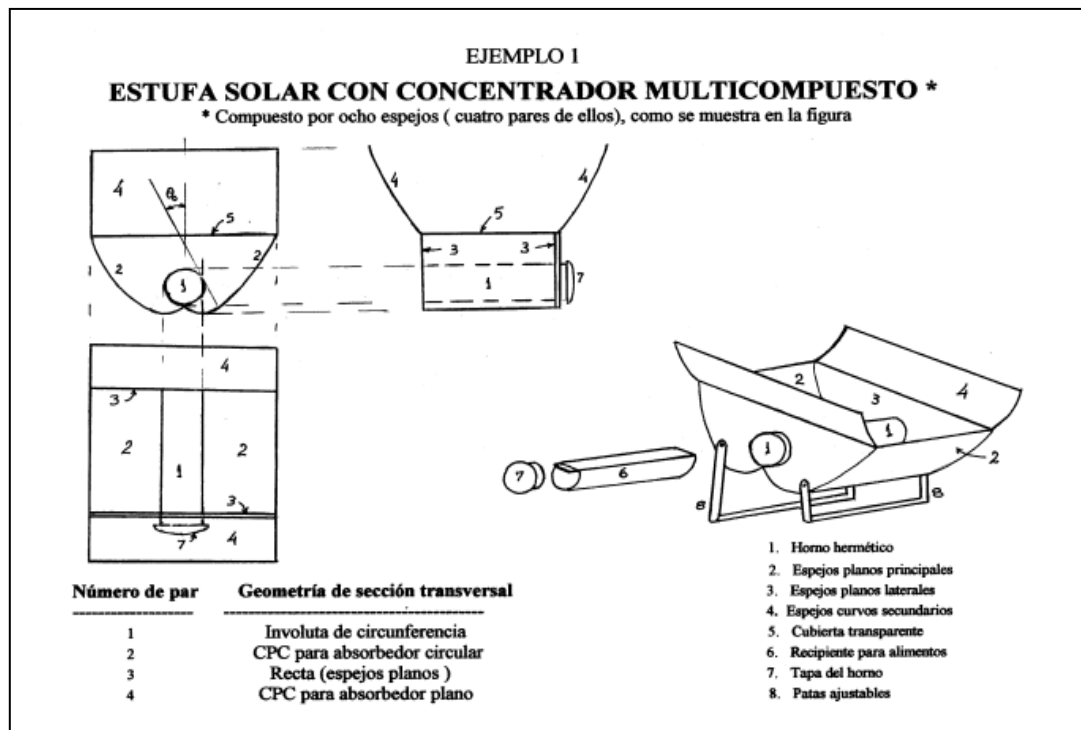


Figura 6. Horno solar Tolokatsin con concentrador multicompuesto

Son herméticos y esterilizadores, de modo que mientras no sean abiertos, una vez cocidos los alimentos podrían conservarse durante días sin necesidad de refrigeración, aunque esto no se recomienda hacer.

Los alimentos se pueden colocar dentro del horno antes de que amanezca, y sacarse a la hora que uno desee comer (mediodía, por la tarde, en la noche, etcétera). Los alimentos estarán bien cocidos, y quedan más sabrosos y nutritivos.



Figura 7. Horno Tolokatsin con alimentos ya horneados

Los comales solares Tolokatsin .- Un comal solar es un dispositivo que consiste en una plancha horizontal metálica o cerámica que se calienta con radiación solar concentrada para tostar o freír alimentos. En México los comales convencionales son indispensables para la preparación de muchos alimentos de origen prehispánico.

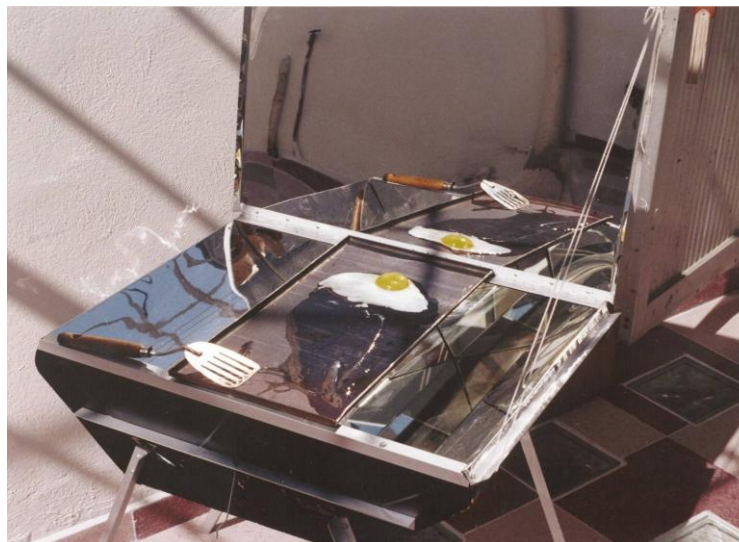


Figura 8. Comal solar Tolokatsin 1.

Los comales solares Tolokatsin consisten en una plancha horizontal de acero inoxidable o de barro cocido que se calienta principalmente desde abajo con radiación solar concentrada proveniente de un concentrador multicompuesto que generalmente tiene 11 ó 15 espejos (Tolokatsin 1 ó 2), como se muestra en la figura 8.

Para un ángulo de aceptación 15° , el cual permite concentrar la luz solar durante casi una hora sin necesidad de seguir al Sol, se pueden alcanzar temperaturas cercanas a 200°C , suficientemente altas para freír y tostar.

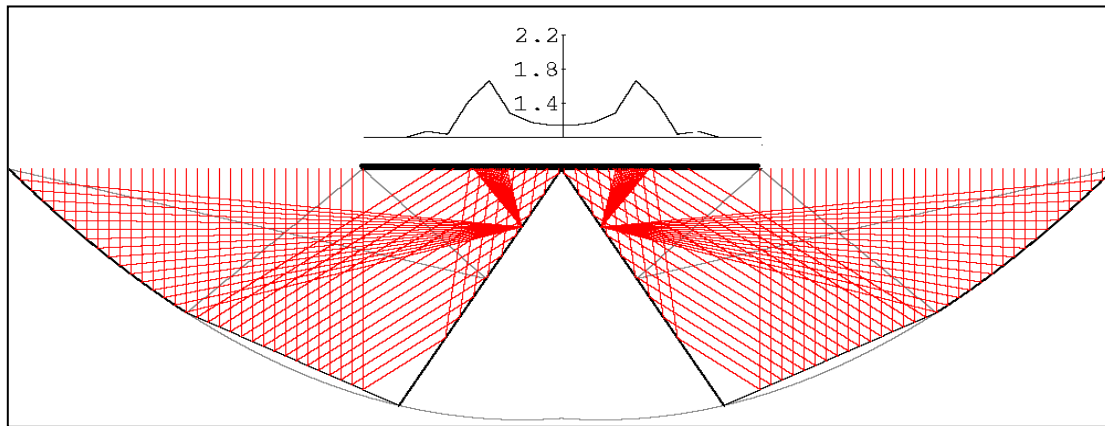


Figura 9. Trazado de rayos que inciden perpendicularmente sobre el comal

Se ha desarrollado un nuevo comal solar solar, más eficaz que el Tolokatsin 1, que puede ser usado no sólo para freír o tostar, sino como colector solar para otras aplicaciones como refrigeración y secado. Es un dispositivo barato y fácil de construir, sobre todo si se emplean solamente espejos planos, (Tolokatsin 2).

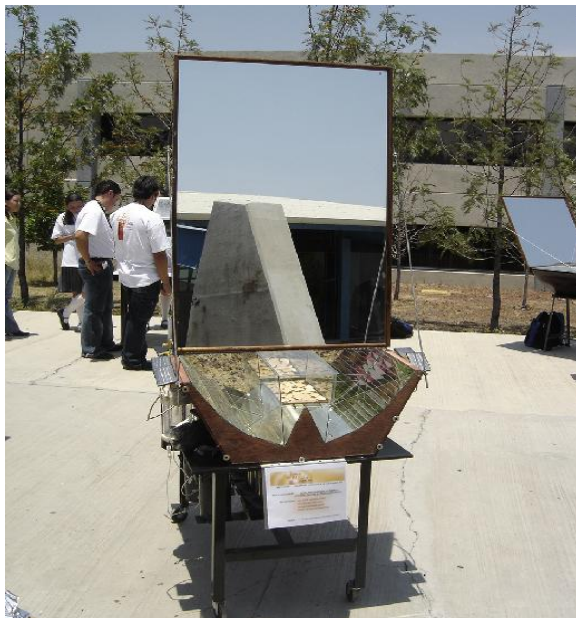


Figura 10. Comal solar *Tolokatsin 3*, con refrigerador.



Figura 11. Vista del refrigerador solar.

Las figuras 10 y 11 muestran un sistema constituido por un concentrador Tolokatsin 2 que funciona simultáneamente como comal solar y refrigerador solar.

COMALES SOLARES AVANZADOS. Al cocinar con el Sol se obtienen de manera muy segura alimentos más sabrosos y saludables, no se emiten gases de efecto invernadero ni otros contaminantes, evita el consumir combustibles fósiles de alto costo o leña. En México cerca de 30 millones de personas consumen alimentos guisados con leña; a escala mundial más de 2 mil millones tiene que emplear leña para preparar su escasa comida, y millones más queman excremento seco de animales para el mismo fin. El resto de la población mundial quema algún combustible fósil o emplea parrillas eléctricas, con un altísimo coste ambiental. El empleo de la leña por parte de los

sectores menos favorecidos de la población mundial es debido principalmente a la carencia de un energético opcional y ha contribuido en muchas regiones a la creciente deforestación y desertificación de extensos territorios, problema que acarrea consigo muchos otros más.

Sin embargo, estas personas cuentan en general con un inmenso recurso energético solar que puede ser aprovechado en gran escala mediante sistemas de bajo coste, eficaces, confiables y seguros que empleen tecnologías desarrolladas localmente para satisfacer sus necesidades energéticas y de todo tipo. En el primer caso, el empleo de gas, que además de ser caro, no renovable y sumamente peligroso (anualmente ocasiona centenares de accidentes, muchos de ellos fatales), contribuye en gran medida a la contaminación atmosférica, sobre todo en las grandes ciudades. En el segundo caso la leña por lo general es utilizada de manera insustentable y ocasiona centenares de muertes prematuras por enfermedades respiratorias en las personas que respiran los humos y demás productos de su combustión. Se han desarrollado en México las cocinas y los comales solares Tolokatsin pensando en aportar una opción para cocinar sin tener que consumir gas natural o L.P. o leña, que en México son las fuentes energéticas empleadas para la cocción de alimentos en las zonas urbanas y rurales (Rincón et al., 2004; 2002; 2000; 1999). Los hornos y los comales solares Tolokatsin funcionan aún en días seminublados y puede prepararse con los hornos pan, carnes, vegetales, postres, barbacoas, caldos, y con los comales huevos fritos, tocino, quesadillas, tortillas, de modo que son una opción muy efectiva para sustituir la leña y los combustibles fósiles.

Se presenta aquí una cocina solar que puede desempeñar las funciones de un horno o de un comal. Un comal solar es un dispositivo que capta la energía solar y la concentra en una plancha metálica o cerámica horizontal que se calienta a altas temperaturas para freír alimentos. Para que los nutrientes no se degraden ni se puedan quemar, y por razones de seguridad y eficiencia, los hornos solares Tolokatsin están diseñados para no sobrepasar los 140°C. Sin embargo, los comales requieren temperaturas alrededor de los 200°C para freír adecuada y rápidamente. El diseño de una cocina que pueda desempeñar ambas funciones requerirá alcanzar temperaturas suficientemente altas (mayores a 160 °C) aunque se sacrifique en cierta medida el rendimiento térmico.

El diseño de esta nueva cocina tiene como antecedentes directos el comal solar Tolokatsin 2 (Rincón et al., 2004), en el que se sustituye la plancha por un recipiente de sección transversal trapezoidal, y en lugar de espejos planos se emplean espejos de curvatura simple para permitir una mayor concentración solar con amplios ángulos de aceptación y la cocina solar Tolokatsin 3 (Rincón et al., 2008) que constituyó su primer prototipo y cuya base teórica es exactamente la misma, con la variante de que ahora la sección trapezoidal puede hacerse tan alta como se desee y está cerrada por su parte superior, privilegiando el funcionamiento como horno, más bien que como comal. Collares Pereira (2003) y sus colaboradores también han desarrollado sistemas basados en la óptica anidólica, pero con recipientes de sección rectangular, que no siempre permiten una concentración óptima para un determinado ángulo de aceptación solar. La figura 12 muestra la sección transversal del concentrador del horno-comal Tolokatsin. El semiángulo de aceptación es T_o (en la figura T_o es 18°) y el absorbedor tiene una anchura $2a$ en su base, y una altura b . La relación $r = a/b$ puede tomar cualquier valor real. Cuando $r \rightarrow 0$, el absorbedor se reduce a una cuña con un ángulo de amplitud $2T_o$; cuando $r \rightarrow \infty$ el absorbedor se reduce a una plancha plana. El espejo curvo DF está articulado en el punto D para poder plegarse para su fácil transporte y almacenamiento (ver figura 12).

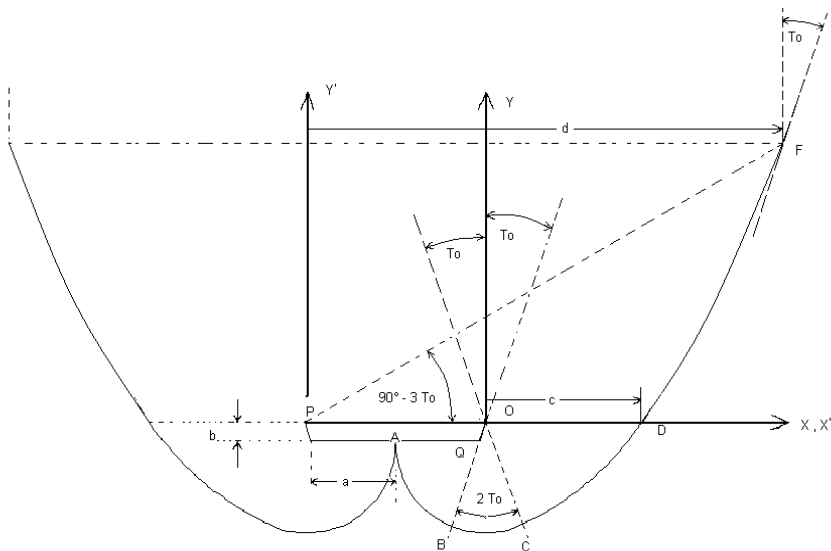


Figura 12. Vista transversal del concentrador multicompuesto y el absorbedor de sección transversal de la cocina solar Tolokatsin 3. El espejo DF está articulado en el punto D para poder plegarse.

Descripción del concentrador solar. - Se busca una concentración solar óptima para una determinada ventana de captación solar, definida por un ángulo de aceptación $2T_o$ que determina el tiempo que puede concentrar la luz solar sin necesidad de ajustar la orientación del concentrador en su seguimiento solar.

Para un concentrador de canal con un absorbedor con base plana, se ha propuesto como sección transversal un trapecio isósceles con una base de anchura $2a$, una altura b , y caras laterales con una inclinación igual al semiángulo de aceptación, es decir T_o , como se muestra en la figura 12.

El concentrador es simétrico con respecto a la mediatriz de la base del concentrador (una recta vertical – no mostrada en la figura - que pasa por el punto A, que es el punto medio de dicha base). En esta figura se representa la vista transversal de los siguientes espejos de curvatura simple:

La curva AB es un arco de circunferencia con centro en el punto Q y radio $R = a$.

La curva BC es otro arco de circunferencia, pero con el punto O como centro, y radio r igual con $a + b \sec(T_o)$.

La curva CD es una parábola con vértice en el punto C y foco en el punto O. Su eje por consiguiente está inclinado un ángulo T_o con respecto a la vertical.

La curva DF es otra parábola con eje inclinado el mismo ángulo T_o , pero con foco en el punto P. Esta parábola se trunca de acuerdo con el “criterio de Rincón”, que consiste en truncar el espejo cuando la tangente a éste tenga un ángulo de inclinación igual al semiángulo de aceptación T_o . Esto ocurre para un ángulo de truncamiento igual a $90^\circ - 3T_o$, independientemente de la geometría del absorbedor. La tangente a la parábola en el punto F tiene precisamente un ángulo de inclinación igual a $-T_o$, como se muestra en la figura 12 (se satisface el criterio de Rincón). Otro criterio para truncar es el sugerido por Collares et al. (1985), pero está restringido a concentradores solares del tipo CPC.

Así, los puntos A, B, C, D con respecto al marco cartesiano XY tienen las siguientes coordenadas:

A $(-a - b \tan T_o, -b)$; B $(-(a + b \sec T_o), -(a + b \sec T_o) \cos T_o)$; C $((a + b \sec T_o) \sin T_o, -(a + b \sec T_o) \cos T_o)$;

D $(2(a + b \sec T_o)/(1 + \sin T_o), 0)$

Y las coordenadas del punto F, con respecto al marco $X'Y'$ son:

$$x'_f = 2[a + b \tan T_o + (a + b \sec T_o)/(1 + \sin T_o)](1 + \sin T_o)(\sin 3T_o)/(1 - \cos 4T_o)$$

$$y'_f = 2[a + b \tan T_o + (a + b \sec T_o)/(1 + \sin T_o)](1 + \sin T_o)(\cos 3T_o)/(1 - \cos 4T_o)$$

y las distancias c y d mostradas en la figura miden respectivamente:

$$c = 2(a + b \sec T_o)/(1 + \sin T_o); \quad d = 2[a + b \tan T_o + (a + b \sec T_o)/(1 + \sin T_o)]$$

Con esta construcción todos los rayos que ingresen dentro de una ventana angular de amplitud $2T_o$ serán captados por el absorbedor, con una concentración geométrica C_g (bidimensional) dada por:

$C_g = L/P$, en donde:

$$L = 2[r + \tan T_o + (r + \sec T_o)/(1 + \sin T_o)](\sin 3T_o)(\cos T_o) - (r + \tan T_o)[1 - \cos 4T_o](\cos T_o)$$

$$P = (1 + \sin T_o + 2r \cos T_o)[1 - \cos(4T_o)], \quad y \quad r = a/b$$



Figura 13. Prototipo del horno-comal solar Tolokatsin 3 en operación. Nótese el espejo plano articulado transversal a los espejos curvos. Este puede plegarse, al igual que los espejos curvos que sobresalen del absorbedor de sección trapezoidal, en el que se han colocado unos “tlacoyos”, alimento prehispánico del antiguo Anáhuak.



Figura 14. Proceso de plegado y transporte manual del horno-comal Tolokatsin 3. Los espejos curvos laterales y el espejo plano posterior se pliegan para disminuir el espacio ocupado y facilitar su transporte.

Para completar el concentrador, se colocan cuatro espejos planos transversales a los espejos curvos y uno más articulado y ajustable de acuerdo con la altura solar, como se muestra en la figura 13, que es una fotografía de un prototipo de este horno en operación. El horno-comal solar Tolokatsin cuenta además con una cubierta de vidrio templado removible para disminuir las pérdidas de calor por convección. Con base en la experiencia, se recomiendan valores de la concentración solar $C_g > 4$ para poder freír fácilmente.

Los resultados operacionales han mostrado que este diseño es muy exitoso en cuanto a que permite tanto hornear como freír con una cocina que es muy ligera, compacta, fácil de transportar, como se muestra en la figura 14, y de relativo bajo coste. La construcción en serie de estas cocinas permitirá abatir aún más su coste, para estar al alcance de todos.

CALENTADOR DE AIRE DE ALTA TEMPERATURA. El calentamiento solar de aire está siendo cada vez más utilizado para la calefacción de interiores de edificaciones, entre muchas otras aplicaciones, como el secado de productos agropecuarios o materiales para diversos fines, el enfriamiento solar por adsorción, etcétera. Existe en la literatura una gran cantidad de estudios sobre calentamiento solar de aire (Duffy y Beckman, 1991; DGS, 2005), y en operación los sistemas integrados a edificios, con decenas de metros cuadrados de áreas de captación, se encuentran por casi doquier en Estados Unidos, Canadá, Alemania y otros países de Europa. Debido a que la conductividad térmica del aire es del orden de un vigésimo de la correspondiente conductividad térmica del agua, y a que el calor específico por unidad de volumen del aire es cerca de tres órdenes de magnitud menor que el del agua, en el calentamiento de aire hay dos aspectos fundamentales que cuidar: incrementar en lo posible la pobre transferencia de calor entre la superficie absorbidora y el aire a calentar, y minimizar la caída de presión a través del captador, causada en buena medida por dispositivos o elementos estratégicos empleados para inducir turbulencia en el flujo de aire y mejorar así la transferencia de calor (Varun et al., 2007). A pesar de que es relativamente fácil calentar aire, aún con bajos niveles de irradiancia, en general, el rendimiento térmico de los captadores solares para calentamiento de aire es inferior que el de calentadores de agua, a menos que se logren disminuir sensiblemente las pérdidas de calor con algún diseño que aisle efectivamente al aire caliente. Este es el objeto de este trabajo, que presenta un novedoso captador solar para el calentamiento de aire que permite alcanzar incrementos en la temperatura del orden de 100°C con rendimientos térmicos cercanos a 50%, gracias a un concentrador solar y a la reducción de pérdidas térmicas del aire que al circular entre el absorbedor y espejos de sección de arco circular queda bien aislado del medio exterior. Este excelente desempeño, que los calentadores de aire convencionales difícilmente podrían alcanzar, los hace ideales para aplicaciones tales como un baño Sauna solar, el secado a alta temperatura y sistemas de acondicionamiento de aire.

Absorbedor

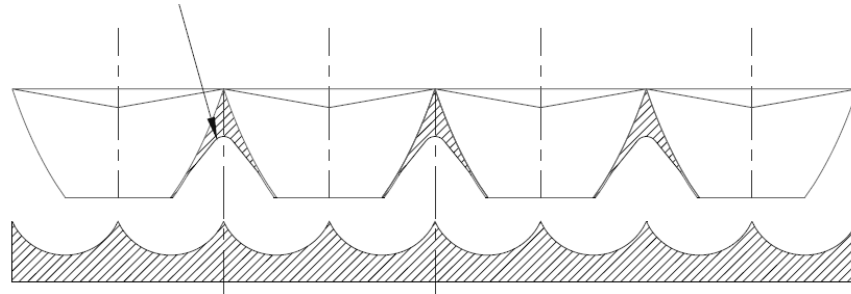


Figura 15. Esquema del calentador de aire con base en la óptica anidológica. Consiste en una serie de concentradores solares del tipo CPC que envían la luz que previamente pasa a través de unas cuñas transparentes que actúan como lentes para lograr un ángulo de aceptación mayor a 47° , para no requerir seguimiento solar. Esta luz es reflejada por espejos cuyas secciones son arcos de circunferencia –mostrados en la parte inferior del conducto de aire a calentar- hacia el absorbedor, que puede ser calentado a temperaturas superiores a 100°C . El aire circula entre los espejos de sección circular, el absorbedor discontinuo, y las partes inferiores planas de los CPC. La región achurada es aislante térmico.

El captador consiste en un concentrador solar multicompuesto que consta de los siguientes elementos: Unas cuñas ligeras de plástico transparente que hacen la función de lentes para permitir un ángulo de aceptación superior a 47° , con el objeto de no requerir de seguimiento solar, en el caso de que el captador se desee emplear como una techumbre fija de una edificación, por ejemplo. La luz refractada por las cuñas –que por supuesto pueden constituir una lente tipo Fresnel- ingresa a una serie de concentradores del tipo CPC truncados óptimamente de acuerdo con el criterio de Rincón. En el espacio entre los espejos parabólicos del CPC se coloca el absorbedor, que son segmentos metálicos recubiertos con película selectiva, como se muestra en la figura 15. La luz que sale de los CPC es reflejada por espejos cuyas secciones son arcos de circunferencia. El aire circula entre estos últimos espejos y el absorbedor, formando remolinos que mejoran la transferencia de calor entre el absorbedor y el aire a calentar. Los detalles de este movimiento vorticoso de gran escala y su efecto en el número de Nusselt es materia de otros estudios. La temperatura de salida puede regularse controlando el flujo másico del aire. En la figura 16 se muestra un trazado de rayos que ilustra el principio de operación del concentrador solar multicompuesto, en que se basa el calentador de aire. Los rayos inciden sobre la cubierta transparente de captador con un ángulo de $23,5^\circ$ con respecto a la vertical. Se observa que todos estos rayos extremos son captados.

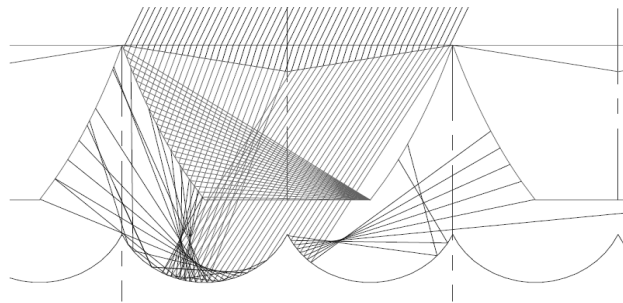


Figura 16. Trazado de rayos que inciden sobre la cubierta transparente del captador con un ángulo de $23,5^\circ$ con respecto a la vertical, mostrando que todos los rayos son captados y dirigidos hacia el lugar en donde se coloca el absorbedor. Esta construcción permite alcanzar altas temperaturas del orden de 100°C con rendimientos térmicos superiores al 50%.

Diseño del concentrador. - El diseño del concentrador multicompuesto se basa en los siguientes tres puntos:

1. Consta de una serie de concentradores solares bidimensionales del tipo CPC para absorbedor plano, truncados con el criterio de que los rayos paralelos a los rayos extremos no sean bloqueados por los espejos del CPC (criterio de Rincón). Esto conlleva a un ángulo de truncamiento, independiente de la geometría del absorbedor, igual a $90^\circ - 3\theta_0$, siendo θ_0 el semiángulo de aceptación del concentrador. En lugar del absorbedor plano, para cada canal CPC, va una placa transparente que permite el paso de los rayos reflejados hacia los espejos de sección circular mostrados en las figuras 15 y 16.
2. Una concentración geométrica C_g con un valor de al menos 2, para permitir que quepan los espejos de sección circular sin fugas ópticas. Ver figura 15.
3. El empleo opcional de cuñas transparentes, sólidas o tipo Fresnel, para aumentar el ángulo de aceptación al menos a $23,5^\circ$, en el caso de requerir que el captador funcione de manera estacionaria durante todo el año.

Los puntos 1 y 2 anteriores, conducen a un valor del semiángulo de aceptación del concentrador de $\theta_0 = 14,4808^\circ$. Este es pues el valor del semiángulo de aceptación que satisface el criterio de truncamiento de Rincón y permite una concentración geométrica de dos. Valores más altos de la concentración solar conllevan a semiángulos de aceptación menores, por lo que se adopta este valor de θ_0 para los espejos del CPC, y se considera el empleo de las cuñas de refracción para incrementar el semiángulo de aceptación a $23,5^\circ$ como se muestra en la figura 17.

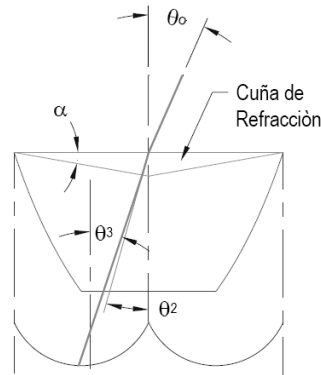


Figura 17. Vista transversal de un canal CPC truncado óptimamente y con una concentración geométrica $C_g = 2$. El semiángulo de aceptación para estas condiciones es $\theta_0 = 14,4808^\circ$. Para incrementar este valor a $23,5^\circ$ que permite una instalación fija del captador –colocados en dirección Este-Oeste, con una inclinación igual a la latitud del lugar de instalación– se emplean las cuñas de refracción.

Se puede prescindir de las cuñas si el captador puede ajustarse periódicamente, pero para una instalación fija, por ejemplo en una techumbre de grandes dimensiones, éstas son necesarias para incrementar el semiángulo de aceptación de $14,4808^\circ$ a al menos $23,5^\circ$.

Existen varios materiales plásticos comerciales de bajo coste para construir estas cuñas, cuyo diseño puede hacerse con facilidad basándose en la figura 4. Como ejemplo, para uno de estos materiales cuyo índice de refracción es $n = 1,49$, el ángulo de la cuña sería de $9,98^\circ$ para que rayos que incidan con un ángulo de $23,73^\circ$ respecto a la normal a la cubierta transparente, incidan en los espejos del CPC con un ángulo de $14,48^\circ$, como se muestra en la figura 19.

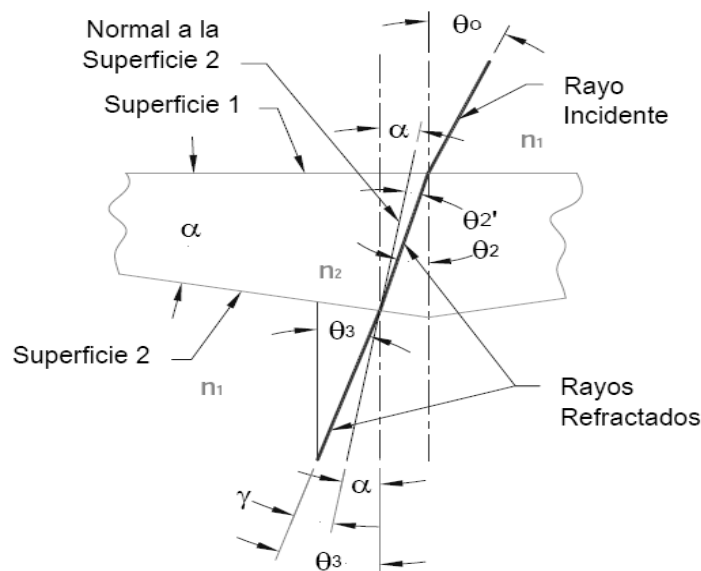


Figura 18. Esquema de un cuña transparente cuyo índice de refracción es n_2 . Un rayo incidente con un ángulo θ_0 con respecto a la vertical, abandona la cuña con un ángulo menor θ_3 .

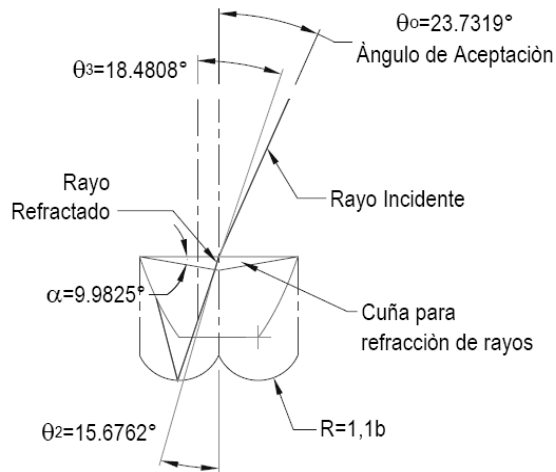


Figura 19. Un rayo incidente con un ángulo de $23,73^\circ$ respecto a la normal a la cubierta transparente, sale de la cuña ($n = 1,49$) con un ángulo respecto a la vertical de $18,48^\circ$, que es el ángulo de diseño del CPC.

Los rayos que abandonan los CPC son reflejados por los espejos inferiores de sección circular hacia los absorbedores metálicos que van colocados en las cavidades formadas entre las caras posteriores de los espejos de los CPC. Estos absorbedores alcanzan temperaturas del orden de 200°C en condiciones de cielo despejado, y calientan al aire contenido en dichas cavidades, que circula por convección natural o forzada, formando remolinos que incrementan la transferencia de calor sin incrementar sensiblemente la caída de presión en su recorrido. Tanto el absorbedor como el aire caliente quedan bien aislados térmicamente del medio circundante, por lo que las pérdidas son reducidas. Los detalles de la formación de los remolinos en la corriente de aire y su efecto en la mejora en la transferencia de calor son objeto de estudios experimentales y computacionales en desarrollo y se espera que sus resultados puedan ayudar a afinar el diseño de estos calentadores de aire. Los resultados operacionales de los dos prototipos construidos a la fecha son sumamente alentadores, pero requieren disminuir la incertidumbre en los resultados para ser reportables. Las aplicaciones inmediatas son calentamiento de aire para baño sauna doméstico, secado de materia orgánica previa su combustión, y enfriamiento solar por adsorción. La figura 20 muestra una fotografía del prototipo de calentador solar de alta temperatura.



Figura 20. Prototipo del calentador solar de aire de alta temperatura.

CONCLUSIONES

Las aplicaciones fototérmicas de la energía solar son muchísimas, pueden emplear tecnología desarrollada en México, son muy rentables y efectivas. En este artículo se reporta el desarrollo de cuatro concentradores solares multicompuestos para emplearse en temascales, hornos y comales solares, y calentadores de aire de alta temperatura, que permiten disminuir sensiblemente el consumo de leña, pero su uso se puede extender a otras aplicaciones como hornos para cerámica u otros propósitos cuyas temperaturas de operación

sean superiores a 400 °C. Para mayores temperaturas, del orden de miles de grados Celsius, basta con incrementar la concentración geométrica e implementar un sistema de seguimiento automático del Sol.

Se ha desarrollado una nueva cocina solar que permite hornear y freír alimentos, con un concentrador solar multicompuesto de fácil construcción y buen rendimiento basado en la óptica anidólica. Su diseño compacto y ligero lo hacen ideal para su uso en días de campo o bien, cotidianamente en el hogar. Por su bajo coste se espera que pueda estar al alcance de toda la población de México y otros países en desarrollo.

Se ha diseñado un novedoso captador solar para calentamiento de aire que permite incrementos en su temperatura del orden de 100°C con rendimientos térmicos muy aceptables. Si bien son mucho más complicados que los calentadores solares de aire convencionales – por cierto muy exitosos-, su desempeño puede justificar su empleo para ciertas aplicaciones que requieran temperaturas de 100° C o superiores.

REFERENCIAS

1. R. Winston, J. C. Miñano, P. Benítez, N. Shatz and C. Bortz (2005), *Nonimaging Optics*, Elsevier Academic Press, USA.
2. Rabl A.(1976) Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators. *Solar Energy* 18: 497-511.
3. Estrada C., Dorantes R., Rincón E. (1998), A Parabolic Dish Concentrador from a Telecommunication Antenna, Proc. 1998, Annual Conference American solar Energy Society, p. 267-270, Boulder, CO, USA.
4. Rincón M.E., Osorio J.F. y Velasco O. E. (2004), El nuevo comal solar Tolokatsin II, Libro de Actas del VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 14-18 Septiembre, Vigo, España, Vázquez M. y Seara J. (Eds), pp 613-618, AEDES, España.
5. Rincón E. y Osorio F. (2002), Los hornos y los comales solares Tolokatsin, Memoria XXVI Semana Nacional de Energía Solar, 11-15 Noviembre, Chetumal, México, Dorantes R., Rincón E, Hernández L. y Pérez L. (eds), pp 269-276, ANES, México.
6. Rincón E. y Osorio F. (2000), A novel solar hot plate for cooking, Proceedings of ISES Millennium Solar Forum 2000, 17-21 September, México City, Gasca C., Rincón E. y Hernández L. (Eds), pp 211-214, ANES e ISES, México.
7. Rincón E. y Osorio F. (1999), El comal solar Tolokatsin, Memoria XXIII Semana Nacional de Energía Solar, 6-8 Octubre, Morelia, México, Rincón E., Álvarez G. y Dorantes R. (Eds), pp. 231-233, ANES, México.
8. Rincón E.A. y Lentz A.E. (2008), La cocina solar Tolokatsin3, Libro de Actas del XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 17-21 Junio, Vigo, España, Vázquez M. y Santos J. (Eds), pp. 617-622, AEDES, España.
9. Collares Pererira M., Almeida J.P. y Correia de Oliveira J., (2003), Description and Testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics, Proceedings of ISES Solar World Congress, June, Goteborg, Suecia.
10. Collares Pereira M., Carvalho M.J., Gordon J.M. y Rabl A. (1985), Truncation of CPC Solar Collectors and its Effect on Energy Collection, *Solar Energy*, 35, 5.
11. Duffie J.A. and Beckman W.A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. Wiley Interscience, New York.
12. The German Solar Energy Society (2005), *Planning and installing solar thermal systems: a guide for installers, architects, and engineers*, James & James. London.
13. Varum, Saini R.P., Singal S.K. (2007), A review on roughness geometry used in solar air heaters, *Solar Energy*, Vol. 81, Num. 11, 1340- 1350.