

## **CONCENTRADOR CON DOBLE REFLEXION PARA COCINA SOLAR COMUNAL (2da. Parte)**

**L. R. Saravia<sup>1</sup>**

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. (UNSa-CONICET)  
Universidad Nacional de Salta,  
Calle Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina  
Fax: 54-387-4255489, [E-mail: saravia@unsa.edu.ar](mailto:saravia@unsa.edu.ar)

**y M. Flores Barahona**

Universidad Nacional de Honduras, Tegucigalpa

**RESUMEN.-** En la Reunión de Trabajo de la ASADES del 2002 se presentó un artículo en el que se proponía el uso de un concentrador de doble reflexión como parte de las cocinas comunales solares, que se están desarrollando para su utilización en escuelas albergues de las zonas áridas andinas y semiandinas. El primer espejo es una parábola con un foco a 50 cm del vértice y el segundo es una hipérbola cuyo foco coincide con el de la parábola. El segundo foco de la hipérbola estará ubicado muy cerca del absorbedor. Los rayos del sol que llegan paralelos al eje de la parábola inciden sobre ésta y el haz reflejado, al llegar a la hipérbola va a parar al segundo foco de la misma. La zona de la parábola que rodea al vértice, con un diámetro de 60 cm, no es espejada y allí se coloca una caja aislada con cubierta de vidrio que contiene el absorbedor. El diseño soluciona el problema de un acceso sencillo al absorbedor para el manejo de la cocina, ya que el mismo queda colocado detrás del espejo. En este trabajo se presenta un diseño basado en el uso de un programa geométrico, el Cabri, se detalla la construcción del primer prototipo y se discuten los primeros resultados experimentales. Se ha comprobado que el colector funciona con buena eficiencia, permitiendo la obtención de temperaturas de hasta 300 C en un tiempo que está en el orden de los 40 minutos.

**Palabras clave:** concentrador doble reflexión, cocinas comunales, diseño geométrico

### **INTRODUCCION**

El requerimiento de cocción en las zonas áridas andinas y subandinas de la Argentina constituye un problema de entidad tanto en lo que tiene que ver con la mejora del nivel de vida de los habitantes como en el mantenimiento del medio ambiente.

Uno de los requerimientos es la atención de comedores comunales en escuelas o centros para atención de personas donde usualmente es necesario alimentar a grupos de 30 a 100 personas.

El uso de combustibles no renovables provistos desde zonas más pobladas resulta difícil y oneroso debido a la situación de aislamiento de la mayoría de las comunidades. Por otro lado, la disponibilidad de leña es mala debido a la aridez de la región. El nivel de radiación solar en estas regiones es muy bueno por lo que la cocción solar constituye una posible solución. Saravia y otros(1999, 2002) han propuesto utilizar cocinas con concentradores de unos 2 m<sup>2</sup> de área y llevar a cabo la cocción u horneado en una caja aislada, que se llamará "caja caliente" donde se coloca la olla o se hornea. La cocina trabaja en forma diferenciada según el tipo de cocción. Para el hervido en olla se coloca en el foco del concentrador una pequeña caldera con agua, la que se evaporará al incidir los rayos solares. El vapor se transporta con una manguera hasta la olla colocada en la caja, donde se la hace burbujear para calentar la comida. En el caso del horneado, en el concentrador se colocan barras de aluminio negras, las que se calientan a 300 C. A esa temperatura se las coloca en el horno pudiéndose producir comidas horneadas como pan, asado, etc. El espejo propuesto es del tipo fresnel, formado por troncos de cono reflejantes que definen un foco con forma de segmento sobre el eje central colocado a unos 50 cm del vértice del concentrador.

Los ensayos realizados durante 2 años han permitido poner a punto el sistema. La experiencia adquirida ha

1.- Investigador del CONICET

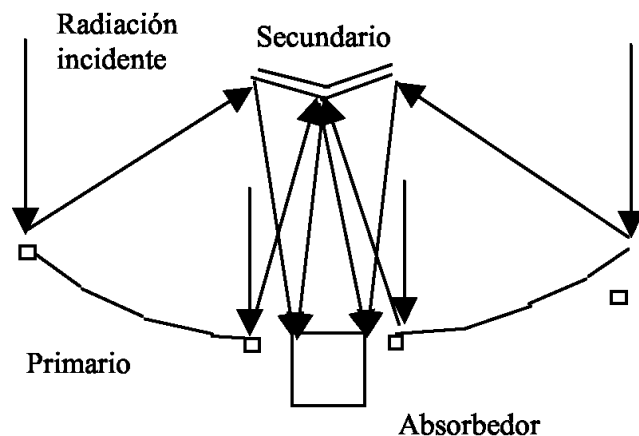


Fig. 1.- Muestra el esquema del espejo de doble reflexión, indicando la posición de los espejos y el absorbedor

indicado que la colocación del foco en la posición indicada produce algunos problemas para retirar la caldera o las barras, ya que se encuentra algo alejado de la persona parada frente al concentrador y es necesario estirar los brazos para levantar un cierto peso. Se han buscado soluciones al problema, teniendo dos alternativas que se encuentran en estudio. Una de ellas, cuyo diseño fue presentado en la Reunión de ASADES del 2002 (Saravia, 2002), consiste en el uso de un concentrador de doble reflexión cuyo esquema se muestra en la figura 1. El espejo primario es una parábola que refleja el haz incidente hacia el foco, colocado a unos 50 cm del vértice. El secundario es una hipérbola cuyo foco coincide con el de la parábola. Los rayos, al llegar a la hipérbola, son desviados hacia el segundo foco de la hipérbola, que se coloca a la altura del

absorbedor según se muestra en la figura 1. Para tener acceso al mismo un círculo de 60 cm se deja sin espejos en la parábola. Esto no es un inconveniente ya que allí no llegan rayos solares por la sombra que produce el espejo primario. Esta idea fue presentada en el trabajo mencionado, donde se realizó un estudio teórico con simulación, mostrando que el sistema funcionaría en la forma adecuada. La colocación del absorbedor detrás del espejo cambia totalmente el problema de acceso, ya que se encuentra muy cerca de una persona parada por detrás del espejo, la que puede manipular los utensilios en forma muy sencilla. Durante el 2003 y 2004 se ha procedido a la construcción y ensayo inicial del nuevo concentrador.

En las secciones que siguen se exponen el diseño final del sistema, los aspectos constructivos y el ensayo inicial del nuevo sistema.

## DISEÑO DEL CONCENTRADOR

La figura 2 muestra el diseño del concentrador con doble reflexión dibujado con el programa Cabri II Plus de la compañía CABRILOG(2004), que permite realizar trazados geométricos disponiendo de un conjunto de operaciones geométricas muy completo.

Se define un sistema de ejes con el eje x horizontal. En el origen se colocará el vértice de la parábola. Se dibuja una rejilla de puntos distanciados 10 cm entre ellos a escala real. En el dibujo se está usando una escala 1/10 por lo que las dimensiones que aparecen anotadas están divididas por 10.

Se busca diseñar un concentrador con un área efectiva de recepción solar de unos 2.5 m<sup>2</sup>. Los concentradores antes usados tenían un área efectiva en el orden de los 2 m<sup>2</sup>. En este caso la doble reflexión introduce una segunda pérdida óptica, la reflexión en la hipérbola, del orden del 15 al 20%, por lo que se ha aumentado algo el diámetro total a 1.88 m, llevando el área efectiva a 2.5 m<sup>2</sup>, tratando de que la potencia disponible en el absorbedor sea aproximadamente la misma. La circunferencia central que no está cubierta con espejo tendrá un radio de 30 cm, en vez de los 20 cm anteriores, con el fin de que se pueda manejar fácilmente el absorbedor desde la parte posterior del concentrador. La parábola tendrá una distancia focal de 50 cm, similar a la de los concentradores anteriores y su eje será vertical. Estos datos son suficientes para trazar la parábola.

Se coloca el punto representativo del foco de la parábola Fp a una distancia de 50 cm del vértice V colocado en el origen. La recta directriz de la parábola será horizontal y estará colocada a 50 cm por debajo del vértice. El Cabri necesita 5 puntos para determinar la parábola, de los cuales por ahora tenemos el vértice. Un segundo punto, P1, es el que determina el borde exterior, a 94 cm del eje si el diámetro es de 188 cm. Para dibujarlo se traza la vertical a 94 cm y se dibuja el punto en que corta a la directriz. Se traza el segmento entre el foco Fp y el corte con la directriz. Por definición de la parábola la distancia de P1 al foco será igual a la distancia de P1 a la directriz. Esto significa que si se traza la mediatriz del segmento recién trazado, su corte con la recta vertical que pasa por P1, ya trazada, determina a P1. Un tercer punto P2 es el que define la circunferencia interior, a 30 cm del eje. Su trazado es similar al anterior: se traza la recta vertical a 30 cm y la mediatriz del segmento entre Fp y el corte de la directriz con la vertical. Finalmente se trazan los simétricos de P1 y P2 respecto al eje, P1s y P2s.

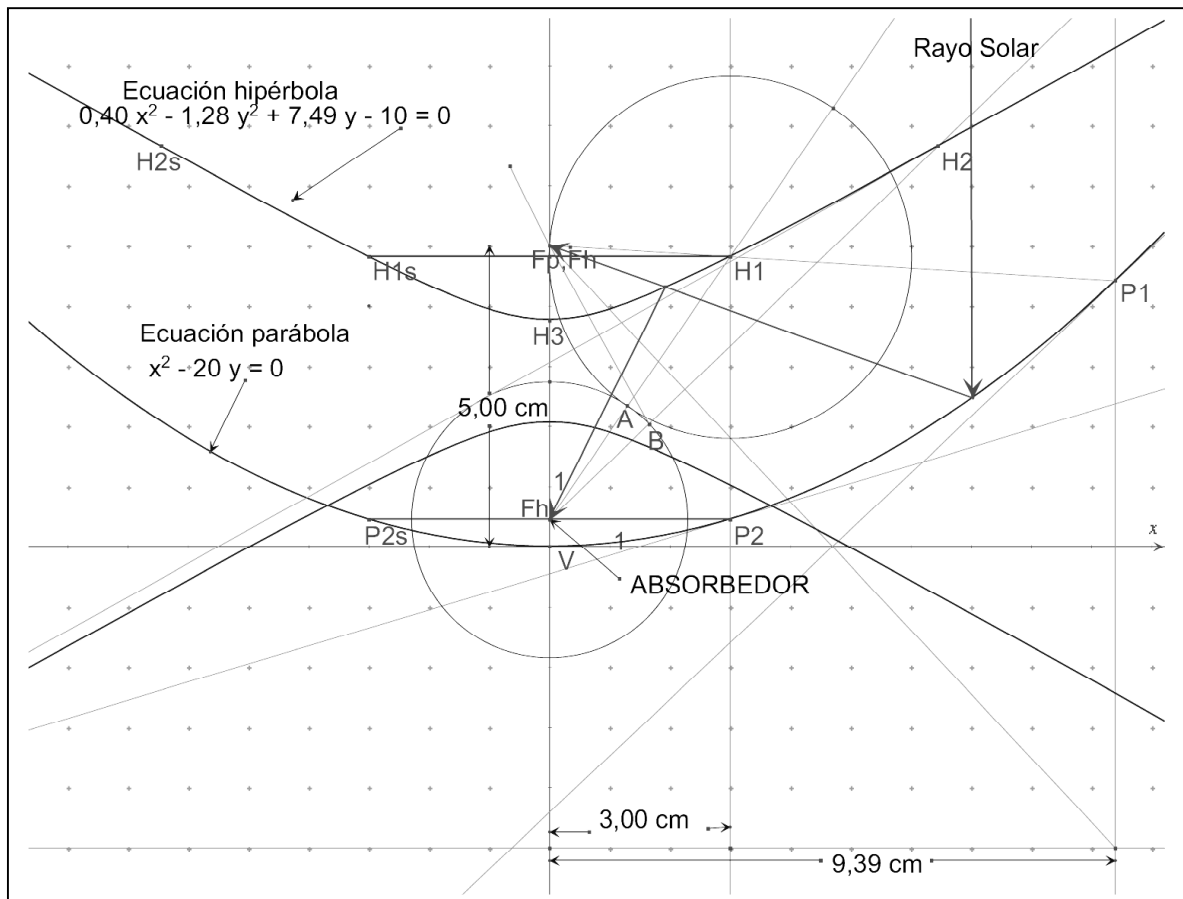


Fig. 2.- Diseño del concentrador con doble reflexión dibujado con el programa Cabri. Se aprecian la parábola, la hipérbola, el absorbedor y el trazado de un rayo como ejemplo. Las dimensiones aparecen divididas por 10.

Los 5 puntos: V, P1, P2, P1s y Ps2, permiten dibujar la parábola. Se le puede pedir al Cabri la ecuación de la parábola dibujada, la que se muestra en la figura. El coeficiente del término en  $x^2$  es  $\frac{1}{4} \cdot f$  donde  $f$  es la distancia focal. Debe tenerse en cuenta la escala usada, en la cual  $f$  vale 5.

Para la hipérbola se sabe que su foco  $F_h$  debe estar sobre el foco  $F_p$  de la parábola. Su segundo foco  $F_h$  debe estar en el absorbedor para que el haz que llega paralelo al eje de la parábola incida sobre el centro del absorbedor, como se muestra con un rayo en la figura 2. (este haz se trazó después de disponer del dibujo completo). Un punto determinable de la hipérbola es el  $H_1$ , que limita a la hipérbola en su borde exterior. Estará determinado por el rayo solar que golpea el borde de la parábola en  $P_1$ , al reflejarse pasará por el foco  $F_p$  y su corte con la hipérbola es  $H_1$ . Sabemos que el borde exterior debe estar a 30 cm del eje ya que conviene que la hipérbola tenga el mayor diámetro posible compatible con que no haga sombra sobre el espejo primario. Por tanto,  $H_1$  queda determinado por el rayo solar reflejado y por la recta vertical a 30 cm del eje. Un segundo punto es el vértice  $H_3$ . Se sabe que la hipérbola cumple que la diferencia entre la distancia de un punto a los dos focos es constante. Esa diferencia la tenemos ya que conocemos el punto  $H_1$  y los dos focos y se determina como sigue: Se une  $H_1$  con el foco  $F_h$  inferior, segmento que da la distancia de  $H_1$  a  $F_h$ . La otra distancia de  $H_1$  al otro foco,  $H_1-F_p$  tiene una magnitud que se debe restar a la distancia anterior. Para ello se traza la circunferencia de centro en  $H_1$  que pasa por  $F_p$  y se corta con el segmento  $H_1-F_h$ , dando el punto  $A$ . El segmento  $F_h-A$  es la diferencia buscada. Esta circunferencia corta la vertical en un punto. El punto medio entre este corte y el foco  $F_p$  es el punto  $H_3$ . Para determinar un tercer punto,  $H_2$ , se dibuja una semirrecta cualquiera. El corte con la circunferencia de centro  $F_h$  que pasa por  $A$  es  $B$ . La mediatriz del segmento  $F_p-B$  corta la recta  $F_h-B$  para dar el punto buscado  $H_2$ . Los puntos  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  con los simétricos  $H_{1s}$  y  $H_{2s}$  definen la hipérbola. La ecuación es calculada por el Cabri y se muestra en la figura 2.

De esta manera se completa el diseño básico del concentrador. Se muestra el camino de un rayo solar a título de ejemplo. Este dibujo corresponde a un concentrador perfecto en el sentido de que los rayos se concentran en un punto. En la realidad, las superficies se construirán en forma aproximada y el punto se convertirá en una mancha luminosa. La parábola se aproxima con una construcción tipo fresnel, es decir, con una serie de conos definidos por un conjunto de cuerdas inscriptas en la parábola. Aquí se ha elegido tomar puntos cada 8 cm a lo largo del

eje x para definir las cuerdas. Conocidas las coordenadas de estos puntos, que se obtienen con precisión a partir del Cabri ya que el mismo es capaz de dar las coordenadas de los puntos que se marquen, se calculan los diámetros de los aros a construir. Esta parte no se incluyó en la figura 2 para que no se complicara el dibujo. El cálculo se hace mediante una planilla de cálculo en forma similar a lo realizado en trabajos anteriores, por lo que no se repetirá aquí. Para la hipérbola se decidió construirla con triángulos cuyos ejes pasan por el eje de simetría de la hipérbola, es decir, son radiales. Al lado exterior del triángulo se le dio un tamaño de 5 cm. Se fabricaron 3 circunferencias en hierro redondo de 6 mm las que se soldaron al eje central. Sus diámetros son los apropiados para que al apoyar los triángulos tomen la forma hiperbólica. Sus valores fueron obtenidos del dibujo de la figura 2.

Es posible realizar una estimación del tamaño de la mancha luminosa producida por el uso de conos en vez de la forma exacta usando el programa Cabri, como se hizo en el trabajo anterior (Saravia, 2002). Sin embargo, el Cabri no permite analizar la dispersión causada por la estructura radial de la hipérbola ya que ésta constituye una estructura tridimensional cuyo estudio no puede ser encarado con un programa bidimensional. Existen programas que permiten estudiar problemas lumínicos a nivel tridimensional usando técnicas de trazado inverso de rayos (“raytracing”), de los cuales el que utiliza una predicción basada en las leyes físicas es el denominado “Radiance” de la Universidad de California (Ward y Shakespeare, 1998). Por el momento no se ha emprendido esta tarea, aunque se ha comenzado a trabajar con dicho programa. En la siguiente sección se comentarán los resultados obtenidos en lo que se refiere a la dispersión de los rayos por vía experimental con un prototipo.

### LA CONSTRUCCION Y ENSAYO DEL CONCENTRADOR

El concentrador fue construido de acuerdo a los resultados del diseño utilizando láminas de aluminio de alta reflexión de 0.4 mm de espesor. La parábola se armó sobre una estructura de 16 brazos radiales con perfiles rectangulares de hierro de 10mmx20mm a los que se le da la forma de un polígono abierto de acuerdo a lo que se obtiene de las cuerdas colocadas sobre la parábola en el Cabri. Un aro interno y otro externo dan fortaleza al conjunto.

El concentrador se apoya en el suelo a través de una estructura de base rectangular apoyada en ruedas que le permiten dar un movimiento alrededor de un eje vertical. El concentrador tiene ejes horizontales a ambos lados, los que se apoyan en la estructura y permiten girar al mismo alrededor de dicho ejes. Los dos ejes permiten mover al concentrador para seguir al sol. Este tipo de estructura deja libre el círculo central por el cual se tiene acceso a los absorbedores que se pueden usar en el equipo.



Fig. 3.- Muestra una foto del concentrador construido con los dos reflectores y su base. El absorbedor que se aprecia no es el definitivo.

La figura 3 muestra una foto del equipo armado con sus dos espejos y su base. Se aprecian los ejes horizontales a ambos lados. Las ruedas aún no están colocadas. El absorbedor no es el definitivo.

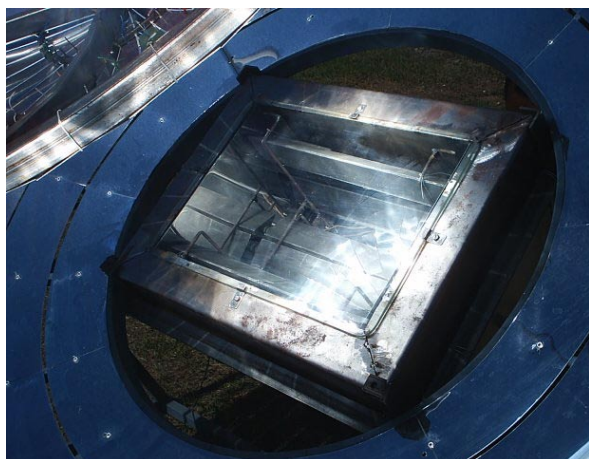
La mancha luminosa que se proyecta sobre el absorbedor tiene un tamaño algo mayor a los 20 cm. Para aprovechar este haz se ha diseñado un absorbedor en forma de caja con una ventana rectangular del tamaño de los vidrios templados para cocinas que se consiguen en el mercado, aproximadamente 25x35 cm<sup>2</sup>. La figura 3 muestra el absorbedor utilizado. La caja tiene una puerta posterior por la cual se pueden

retirar el sistema que se caliente.

Se hicieron unas pruebas iniciales colocando las barras triangulares disponibles del equipo anterior, colocadas sobre las paredes de la caja. El ensayo no dio buenos resultados debido a que la iluminación era muy despareja, produciendo variaciones grandes de temperaturas entre las barras, algunas a más de 300 C y otras bastante menos. No obstante, la carga y descarga se simplificó mucho, ya que la puerta tiene un acceso muy directo por

atrás. Para eso lo mas conveniente es inclinar el concentrador hacia delante, lo que es muy sencillo dada la colocación del eje.

En la siguiente etapa se construyeron barras de aluminio de forma de paralelepípedo, con una longitud similar al ancho de la caja y de poco espesor. 6 de ellas se colocaron horizontalmente con el lado de poco espesor mirando hacia fuera. Su peso es de 1 kg cada una. Las barras se distribuyeron más apretadas al centro y más separadas en los bordes, tratando de que aquellas que reciben una radiación menor presentasen un área de captación mayor. Esta distribución dio resultados mucho mejores, con muy poca dispersión en a temperatura obtenida.



*Fig. 4.- Muestra la caja con ventana de vidrio templado usada como absorbedor*

Los ensayos realizados con barras han demostrado resultados similares a los obtenidos con los concentradores de reflexión única ya ensayados, obteniéndose temperaturas en el orden de los 300 C a partir de temperatura ambiente en un tiempo de exposición del orden de los 40 minutos .

Otro aspecto importante de estos colectores es la caída de la potencia obtenida que se produce cuando el colector se desvía respecto a la alineación ideal. Esto tiene lugar debido a que parte de los rayos concentrados ya no llegan al absorbedor. Si esta caída es aceptable mientras la radiación solar se desvía por un tiempo de más de media hora, se puede encarar el uso del sistema sin necesidad de adaptar un sistema automático de seguimiento del sol.

Con el fin de ensayar esta dependencia se ha preparado un sistema de medida de la potencia incidente con una constante de tiempo pequeña, de manera que se pueda apreciar la variación a medida que el sol se traslada respecto al concentrador en reposo. El sistema a usar, ya ensayado en otros colectores, consiste en colocar un serpentín , en este caso plano, formado por una cañería de cobre de unos 8 mm a la que se le da una forma de espiral plano que va cubriendo toda la superficie de recepción del haz. Por la cañería circula un fluido a flujo constante conocido y se mide la temperatura de entrada y salida. El producto del calor específico del fluido por el flujo másico y el salto de temperatura dará la potencia que llega. La constante de tiempo del equipo es del orden de 2 minutos, por lo que se puede seguir bien la variación de potencia a medida que pasa el sol delante del colector en reposo. Las medidas realizadas demuestran que la caída de potencia es menor del 10 % cuando el sol se mueve por 30 minutos dispuestos en forma simétrica respecto al máximo. Parte de este resultado se debe a que la mancha de luz, con un diámetro de unos 20 cm, se mueve a lo largo de la ventana que tiene 35 cm. Durante ese período la potencia disponible entra enteramente en el absorbedor.

## CONCLUSIONES

Las medidas realizadas muestran que el concentrador de doble reflexión se desempeña en forma muy similar a los concentradores de una reflexión antes usados, por lo que en principio puede ser una solución para el problema de accesibilidad al absorbedor. Sus posibilidades reales de uso dependerán de los costos que implican su uso. Este sistema es en principio algo mas costoso debido a la necesidad de construir un reflector extra y de aumentar en un 20 % el área efectiva del espejo primario para compensar las pérdidas sufridas en la segunda reflexión.

Desde un punto de vista más básico se ha mostrado la posibilidad de realizar enteramente el diseño del sistema mediante el uso de un programa geométrico, el Cabri, lo que resulta muy cómodo y rápido. También visualiza mejor el proceso de diseño.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo financiero del CONICET, el FONCYT y el Consejo de Investigación de la UNSa

## REFERENCIAS

Programa Cabri II Plus versión 1.2.5, *Manual de uso*, compañía Cabrilog, [www.cabri.com](http://www.cabri.com) (2004).

Saravia, L., Cadena, C., Caso, R. Y Fernández, C., *Cocinas solare comunales con concentrador y acumulador sólido*, ERMA, ASADES, vol. 6, p.p. 7-16, 1999

Saravia, L. R., *Concentrador con doble reflexión para cocina solar*, AVERMA, Vol. 6, No. 1, p.p. 03.01 a 03.06, 2002.

Saravia, L., Cadena, C., Caso, R. y Fernández, C., *Cocinas solares comunales de uso múltiple*, ERMA, ASADES, Vol. 10, pp. 51-56, 2002.

Ward Larson, G. y Shakespeare, R., *Rendering with Radiance*, Space and Light edition, 1998, revised Edition, 2003.

**ABSTRACT.**- Saravia(2002) has presented an article where the use of a double reflection concentrator in large solar cookers is proposed. The first mirror is a parabola with a 50 cm focus distance and the second one is a hyperbola with one of its focus coincident with the parabola focus, while the second one is near the absorber. The solar rays parallel to the parabola axis reflect twice and reach the absorber. Mirrors are not installed in a circle surrounding the parabola vertex, leaving a place for the absorber. The handling of the different absorber types becomes quite easy. A concentrator design based in the use of a geometric program called Cabri has been developed . A prototype was built and the first experimental results have been obtained. They show that the behavior of this concentrator is quite similar to the older models, but it is much easier to manage it.

**Keywords:** double reflection concentrator, communal cookers, geometrical design