

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ABSORBEDORES DE ALUMINIO EMPLEADOS EN COCINAS SOLARES CON CONCENTRACIÓN<sup>1</sup>

Carlos Cadena<sup>2</sup> y Luis Saravia<sup>3</sup>  
INENCO, Instituto UNSa-CONICET  
Av. Bolivia 5150, 4400, Salta. Argentina  
Fax: ++54-387-4255489, email: cadena@unsa.edu.ar

**Resumen.** En el presente trabajo se presentan algunos resultados experimentales y la simulación con el programa SCEPTRE<sup>®</sup> de un absorbedor de aluminio empleado en cocinas solares con el fin de caracterizar su comportamiento térmico. Se midió la temperatura en diferentes puntos de la barra estando sometida al calentamiento provocado por la acción del sol, cuando incide en el concentrador. Se realizó un conjunto de experiencias para determinar la conductividad térmica del material empleado, compuesto principalmente de aluminio (se emplean las latitas de los envases de gaseosas), y se diseñó un modelo computacional unidimensional donde se incluyen los flujos de energía, la conducción del calor y las pérdidas correspondientes, realizándose una comparación con los resultados experimentales obtenidos.

**Palabras clave:** absorbedor, aluminio, conductividad térmica, calentamiento, Sceptre

### INTRODUCCIÓN

Durante los dos últimos años los autores han desarrollado una cocina solar comunal con fines que se explican en detalle en otros trabajos (Saravia et al., 1999). La cocina colecta la energía solar en concentradores que calientan un cilindro de aluminio que hace las veces de absorbedor y que se muestra en la figura 1. El cilindro se ha dividido en 10 gajos constituidos por barras de sección triangular para facilitar su manipulación. La radiación se recibe a través de un vaso de vidrio Pyrex<sup>®</sup> en la parte inferior, mientras que la barra continua hacia arriba dentro de un cilindro aislado (no incluido en la figura) para aumentar su masa de acumulación. En un trabajo previo (Saravia et al., 2001), se ha estudiado el funcionamiento del concentrador utilizando para el absorbedor, un modelo donde se supone que la masa de aluminio tiene una temperatura única debido a la alta conductancia térmica del material. La hipótesis ha permitido estudiar el comportamiento medio del absorbedor, pero no reproduce los resultados experimentales, en cuanto no predice las altas diferencias de temperatura a lo largo de las barras, del orden de los 100°C, debidas al importante flujo térmico, de más de un kilovatio. Con el fin de mejorar los modelos se procedió a estudiar experimentalmente la evolución de la temperatura del conjunto de barras en su función habitual. Dado que las barras se construyen en la Universidad con un aluminio que tiene un alto contenido de impurezas, su conductividad térmica puede ser bastante distinta de la



*Figura 1.- Muestra el absorbedor con las barras de aluminio y la cubierta de pyrex.*

<sup>1</sup> Parcialmente financiado por CIUNSa y CYTED

<sup>2</sup> P. Principal CONICET

<sup>3</sup> Investigador CONICET

correspondiente al aluminio puro, por lo que también se ha encarado la medida de la misma. Finalmente, con la utilización del programa Sceptre, se simula el comportamiento de las barras con un modelo clásico de resistencias y capacitores.

En trabajos anteriores (Saravia y Saravia, 2000) se describió la utilización del programa SCEPTRE<sup>®</sup>, empleado para el estudio térmico de sistemas solares el que mediante analogías convierte la descripción de los flujos de calor del sistema en un circuito eléctrico. Los programas de computación para la resolución numérica de circuitos eléctricos que posean ciertas características permiten analizar sistemas complejos cuyo estudio no sería factible por vía analítica. El SCEPTRE es un programa de “libre disponibilidad” bajo el sistema operativo GNU/Linux y sus características son muy convenientes para encarar estos estudios como se explica en detalle en un trabajo anterior. Recientemente se ha creado un paquete más completo, llamado SIMUTERM, en el que el SCEPTRE trabaja en forma conjunta con otros programas que facilitan el tratamiento y entrada de datos (Saravia y Alía de Saravia, 2001)

Las analogías planteadas hasta ahora solo contemplan elementos térmicos con parámetros concentrados, donde se pueden identificar temperaturas bien definidas para cada elemento. Tal es el caso de un aislante en forma de pared plana unidimensional, a cada una de cuyas caras se asigna una única temperatura, o un acumulador con un fluido que homogeneiza su temperatura por convección. La analogía puede extenderse hasta cierto límite en el caso en que exista una distribución continua de temperatura, como el de una pared unidimensional sólida, donde se tiene una distribución de temperatura en la dirección del espesor. Para ello se puede plantear una técnica en diferencias finitas, donde se divide el sistema en partes pequeñas, a cada una de las cuales se asigna una temperatura definida y una masa térmica.

En las secciones siguientes se describe la medida de la conductividad térmica del aluminio utilizado, el modelo térmico de la barra, la medida de la misma y la comparación de los resultados.

### CONDUCTIVIDAD DEL MATERIAL

Para determinar la conductividad del material empleado en la construcción de las barras, se realizó un ensayo como el que se muestra en la figura 2. Por un extremo de la barra, se introduce calor por medio de una resistencia eléctrica, mientras que el otro extremo se fija a una temperatura inferior (fuente fría).

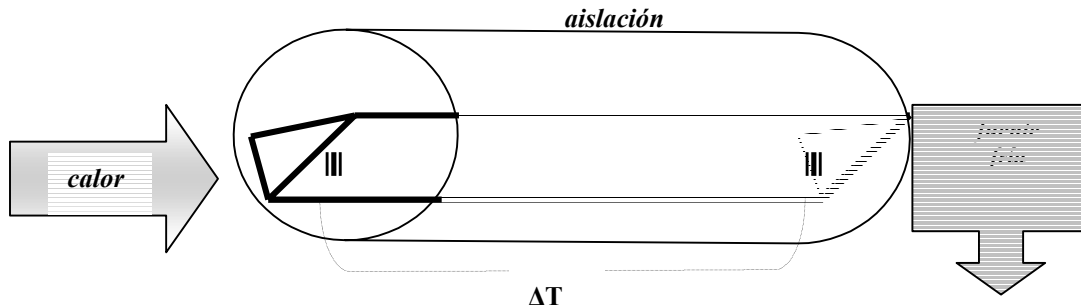


figura 2: diagrama esquemático del ensayo de conductividad

Con una fuente estabilizada y con una resistencia de nichrome arrollada en un extremo se calienta la barra y se mide la evolución hacia el estado estacionario. El conjunto está debidamente aislado para minimizar las pérdidas de calor por lo que se puede admitir la hipótesis de flujo unidimensional. Se realizaron dos perforaciones de 1 mm de diámetro en ambos extremos para introducir allí sendas termocuplas y medir directamente la diferencia de temperaturas. Esto se hizo con un termómetro Fluke, encontrándose que inicialmente las temperaturas son iguales y al cabo de un cierto tiempo se diferencian, alcanzándose finalmente un estado estacionario. Se obtiene el valor de conductividad aplicando la ecuación (1):

$$W = k \cdot A \cdot \Delta T / E \quad (1)$$

Los resultados experimentales se muestran en la tabla 1

$$k = 140 \text{ W/m} \cdot \text{°C} \quad (2)$$

Cabe destacar que el aluminio puro tiene una conductividad superior, del orden de 200 W/m/C y que esta diferencia se debe a la existencia de impurezas e

Tabla 1. Resultados de la medida experimental de conductividad

Potencia de entrada	13	vatios
Area	.0006	m <sup>2</sup>
Diferencia de temperaturas	28.5	°C
Espesor	.2	m

imperfecciones en la fundición realizada en la universidad con materiales de baja pureza.

## EL CÁLCULO DEL MODELO

El primer paso a dar, consiste en transformar el sistema térmico en un modelo circuital (Kreith y Kreider, 1978). Su estudio numérico se encara a través del programa SCEPTRE que utiliza el método de variables de estado para resolver el problema (Novender, 1998, Becker, 1973, Bowers, 1971). Las diferencias de tensión sobre los elementos del circuito y las corrientes en los mismos se constituyen en las variables a determinar en el cálculo numérico. A esos efectos el modelo circuital le es presentado al programa, mediante un archivo que contiene una descripción del circuito en código ASCII, que también posee información adicional, tal como las condiciones iniciales del circuito, las variables calculadas que son de interés para el usuario, y las condiciones auxiliares.

La simulación del funcionamiento del circuito se realiza en dos fases. En la primera el Sceptre analiza el archivo de entrada y si no tiene errores, genera las subrutinas FORTRAN que resuelven las ecuaciones de la red. En la segunda fase, las subrutinas son compiladas y linkeditadas con módulos que tiene en su librería. El programa ejecutable resultante monitorea el tiempo real de simulación y va generando los valores de las variables cuyo resultado se solicitó en el archivo de entrada. Un programa adicional capaz de manejar los archivos de salida del Sceptre permite analizar los resultados obtenidos en forma gráfica.

## MODELO DE UNA BARRA DE ALEACIÓN DE ALUMINIO: EL ABSORBEDOR

Un esquema de la barra a simular se muestra en las figuras 3. La barra es un prisma triangular de 0.031 m de ancho por 0.04 m de alto, y cuando funciona como absorbedor de calor en el foco del espejo, está acoplada mecánicamente a otra barra, y funciona como un cilindro sólido, compuesto por diez barras en posición axial, tal como se observa en la figura 3.

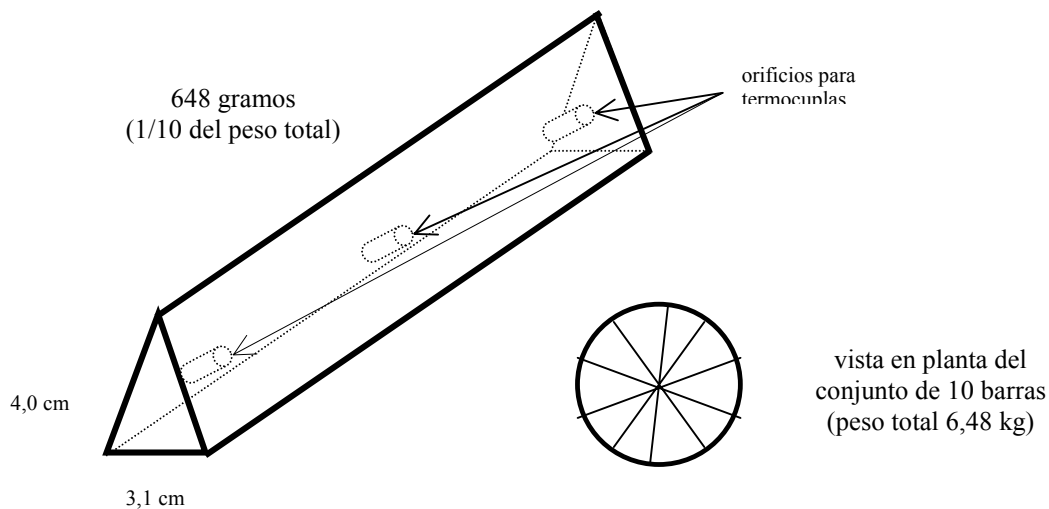


Figura 3: esquema de la ubicación de termocuplas en la barra, y de la disposición de las barras en el foco del concentrador

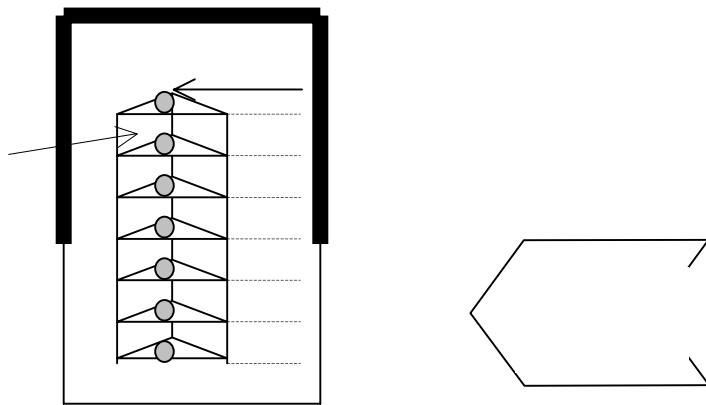
En la vista esquemática de la figura 4 se observa que la parte inferior del conjunto, está recubierto por un vidrio tal cual se vio en la figura 1. Su parte superior y la tapa, están recubiertos por un material aislante compuesto esencialmente por lana de vidrio. El material de las barras está pintado de negro para absorber la radiación.

El modelo considera a la barra dividida en seis sectores, tres de los cuales están aislados y otros tres cubiertos por la cubierta de vidrio. Los inferiores que toman la radiación solar proveniente del concentrador, tendrán un elevado coeficiente global de pérdidas, convectivo y radiativo y los superiores aislados, una elevada resistencia térmica básicamente conductiva. Los coeficientes de pérdida usados en la simulación tienen valores de 36 y 2 [w/m<sup>2</sup>/°C] respectivamente. Los nodos en los extremos tendrán una masa asociada mitad de la adjudicada a los cinco restantes. Para estos se usó una masa de 108 gramos con una capacidad calorífica de 800 J/kg/°C.

La figura 5 muestra el circuito térmico equivalente del nuestro modelo, el que se introducirá en el programa SCEPTRE mediante un archivo ASCII. Cada elemento recibe un nombre, empezando con una R para las resistencias térmicas con el

agregado de una D para las conductivas, una V para las convectivas y otra R para las radiativas, una C para condensadores (acumuladores), una E para fuentes de tensión (temperatura dada) y una J para fuentes de corrientes (flujos energéticos). El valor de cada elemento puede depender de las variables del circuito, ya sea voltajes (temperaturas), que empiezan con una V o corrientes (flujos térmicos) que comienzan con una I. Para este caso se ha adoptado una descripción sencilla, con resistencias térmicas constantes. Las condiciones iniciales contienen las tensiones en cada condensador (temperatura del acumulador), las que determinan el estado inicial de todo el circuito. Las resistencias R1 a R6 corresponden a la conexión de aluminio entre nodos y son conductivas, mientras que las R11 a R17 que se ven en la figura 5 representan las pérdidas laterales. Los flujos J4 a J7, de tipo JQ, indican la radiación incidente, y los condensadores C1 a C7 representan la masa térmica de aluminio.

Los datos de cada elemento están consignados en el esquema de la figura 5, donde se muestra la información en forma de tablas que contienen todos los parámetros, las condiciones iniciales, y las variables de salida (outputs). Las condiciones iniciales suponen una temperatura constante en todos los nodos, igual a 20°C.



### MEDICIÓN DE TEMPERATURAS EN LA BARRA

Las barras han sido ensayadas, mostrándose los resultados en la figura 6, con el fin de determinar sus parámetros de funcionamiento más importantes. Se colocaron tres termocuplas: en los extremos y centro de una de las barras con el fin de determinar la energía que se va acumulando en el absorbedor. En la figura 6 se muestra, curvas Temp1, Temp4, y Temp7, la variación de las tres temperaturas, partiendo con las barras a temperatura ambiente y midiendo durante 70 minutos. Durante el día del ensayo, se midió la radiación solar directa normal al concentrador, encontrándose que se ha mantenido prácticamente constante durante la experiencia, en un valor igual a  $960 \text{ W/m}^2$ . Conviene aclarar que ese día, no hubo nubes.

El extremo iluminado de las barras adquiere la mayor temperatura, 420°C, después de 70 minutos de funcionamiento, mientras que la temperatura media de la barra en ese momento fue de 367 °C. Cuando la barra se emplea calentándola para la cocción, no se alcanza esta temperatura, ya que se la extrae cuando su temperatura media llega a 300°C. Se constata que entre los extremos de la barra se tiene un salto de temperatura significativo, del orden de los 100°C.

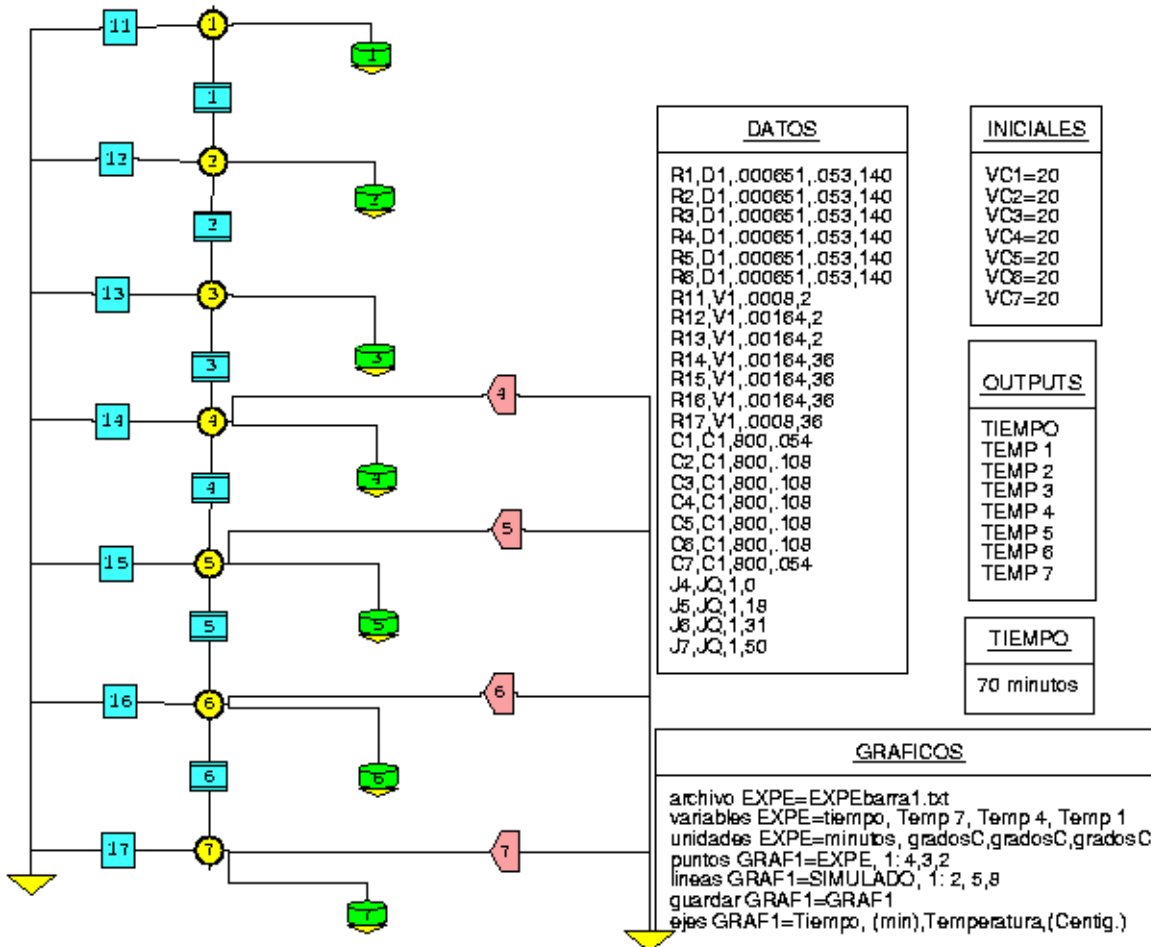


Figura 5.- Muestra el circuito térmico equivalente y las tablas de datos

La figura 6, muestra la evolución de temperaturas simuladas: TEMP1, TEMP4, y TEMP7 con este modelo, así como las medidas. Se observa una razonable similitud entre ambos conjuntos de temperaturas. El modelo permite predecir el salto de temperaturas entre los extremos de la barra, lo que estaba ausente en el modelo utilizado en un trabajo anterior. (Saravia, et al. 2001)

## CONCLUSIONES

Del análisis comparativo entre las experiencias llevadas a cabo y el modelo térmico planteado con el Sceptre, se muestra que existe una buena aproximación, tanto entre la evolución de las temperaturas, como en su valor final y su dispersión a lo largo de la barra.

El análisis numérico ha permitido determinar los valores de los distintos coeficientes de transferencia térmica, los que serán de utilidad en futuros estudios.

La incorporación de este modelo a uno más general correspondiente al funcionamiento global del concentrador, permitirá encarar una modelización de la cocina solar en su conjunto.

Por otra parte, el Sceptre ha mostrado ser un programa muy adaptable para la simulación de sistemas térmicos a parámetros concentrados. Las herramientas auxiliares que se han discutido mejoran las posibilidades de uso del mismo en el estudio de sistemas solares térmicos.

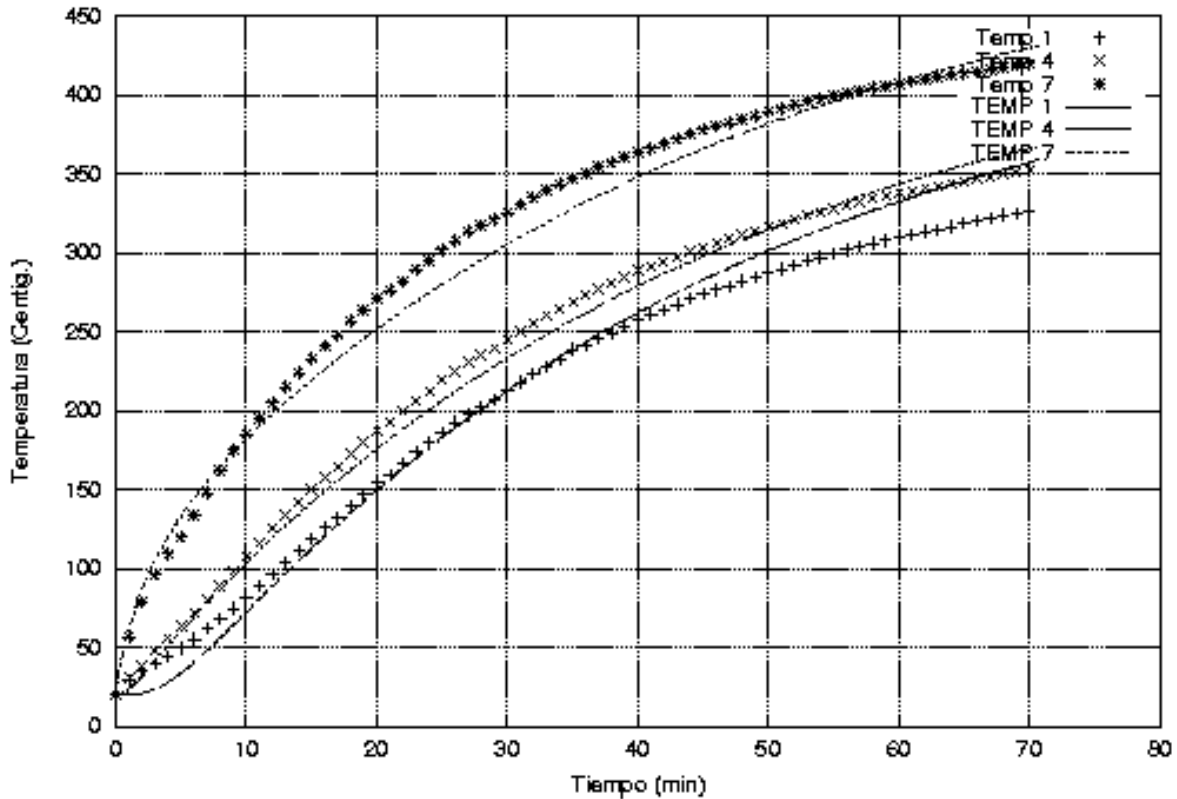


Figura 6.- Muestra los resultados experimentales y simulados de las temperaturas a lo largo de la barra.

**REFERENCIAS**

Saravia, L. y otros, (1999). Cocinas solares comunales con concentrador y acumulador sólido. ERMA. 6., 7-16.  
 Saravia, L y Saravia, D. (2000).. Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. AVERMA, 4, 1, 08.17-08.22.  
 Saravia, L. y Alía, D. (2001). AVERMA. *Simuterm*. Enviado para publicación a la Reunión de ASADES 2001.  
 Becker D. (1973) Extended SCEPTRE: Vol. 1, User Manual, AFWL – TR – 73.  
 Bowers J. C. And Sedore S. R. (1971) *SCEPTRE: A Computer Program for Circuit and System Analysis*, Prentice Hall.  
 Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2da. Edición, Wiley Interscience, New York.  
 Kreith F. y Kreider J. F.(1978) *Principles of Solar Engineering*, McGraw Hill.  
 Novender W. R. (1998) Revision and Edition of the Extended Sceptre, User Manual, *Giessen-Friedberg University*, Germany  
 Novender W. R. (1999) SCEPTRE: simulación de circuitos eléctricos no lineales, *Linux Journal, versión española*, 3, 41-44.

**THERMAL BEHAVIOR OF ALUMINIUM ABSORBERS USED IN SOLAR COOKER CONCENTRATORS**

**Carlos Cadena y Luis Saravia**

**ABSTRACT.-** Experimental results and a numerical simulation of a solar cooker concentrator aluminium absorber are presented . The aluminium thermal conductivity corresponding to the absorber built in the University has also been measured . The different thermal loss coefficients have been adjusted to obtain a reasonable simulation result when compared to the experimental values.