

## COEFICIENTE DE PÉRDIDAS POR LA CUBIERTA DE DISTINTAS TAPAS DE COCINAS SOLARES TIPO CAJA

M. Checura, V. Passamai

INENCO-DF-UNSa

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – Consejo de Investigaciones de la  
Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) C.P. 4400 – Salta  
Tel. 0387-4255389. E-mail: [passamai@unsa.edu.ar](mailto:passamai@unsa.edu.ar)

**RESUMEN:** Se evalúan los coeficientes de pérdidas debidos a las cubiertas transparentes de una cocina solar de tipo caja con un reflector de área igual al área de apertura, para cuatro tipos de cubiertas distintas: vidrio simple, vidrio doble, policarbonato alveolar y policarbonato alveolar doble; con el objetivo de cuantificar su valor y determinar cual de ellas permite un mejor comportamiento de la cocina solar, obteniendo que las mejores cubiertas son el policarbonato alveolar doble y el doble vidrio, seguidas de cerca por el policarbonato alveolar simple y finalmente el vidrio simple de 6 mm. Además, se determinó la relación entre el coeficiente de pérdidas debido a la cubierta y el coeficiente global de pérdidas para cada una de ellas, observando que a pesar de que el vidrio doble tiene un  $U_c$  menor que el del policarbonato alveolar doble, este último permite un mejor comportamiento térmico de la cocina solar debido a su mayor transmitancia.

**Palabras clave:** coeficientes de pérdidas térmicas, cubiertas de cocinas solares, cocina solar, energía solar.

### INTRODUCCIÓN

Casi la totalidad de las personas que viven en las áreas rurales de los países en vías de desarrollo consumen energía proveniente fundamentalmente de la leña y del gas envasado. La leña la obtienen mayormente producto de las podas anuales de frutales o de las especies nativas existentes en el lugar (aumentando la deforestación y aportando a la merma de la biodiversidad). El gas envasado lo obtienen directamente de las empresas productoras o de sus distribuidores, implicando que tienen que viajar grandes distancias para obtenerlo, teniendo en cuenta además el aumento en los precios de este producto cada año. Toda esta energía es utilizada principalmente para preparación de alimentos, lavado de ropa y calentamiento de habitaciones y agua para aseo. Con el aumento sostenido del precio del petróleo, es evidente que el acceso a los recursos no resulta equitativo y los que padecen son los que se encuentran más lejos de los centros de aprovisionamiento.

El uso de la energía solar es un pilar fundamental para lograr el tan anhelado desarrollo equitativo y sustentable al que aspiramos en nuestras sociedades, dado que utilizar la energía solar es de gran ayuda para las personas de bajos recursos cuya vida depende fundamentalmente del consumo de gas envasado o leña (y sus variaciones en precios o disponibilidad), a la vez que el hacer uso de las energías renovables disponibles en el lugar es una parte importante del desarrollo sustentable.

Es mirando estos hechos que el potenciar un mayor uso de las cocinas solares como solución parcial para mitigar los impactos sobre el medioambiente, disminuir el consumo energético y mejorar la calidad de vida y economía familiar, tiene cada vez más sentido. Luego, uno de los objetivos fundamentales al desarrollar cocinas solares es identificar la conveniencia de los materiales a utilizar. Estos deben ser adecuados desde el punto de vista térmico y económico para su uso.

Con el objetivo de mejorar el comportamiento de la cocina solar tipo caja, existen antecedentes de investigaciones sobre testeo de materiales reflectantes (Saravia y Suárez, 2000), testeo de materiales de la chapa metálica (Tilca et al., 1999), evaluaciones generales del comportamiento de cocinas solares tipo caja de diferentes características (Passamai, 1998; Stoll et al., 1999; Passamai y Passamai, 2002), y su variación con el tiempo y frecuencia de uso (Estévez et al., 2008).

De la necesidad de evaluar materiales para la cubierta de una cocina solar tipo caja nació un estudio (Lema et al., 2006) donde se aprecia la importancia de evaluar el coeficiente de pérdidas por la cubierta,  $U_c$ , de las cocinas solares tipo caja debido a diferentes materiales, con un método distinto al del primer factor de mérito ( $FI$ ) propuesto en el protocolo de la RICSA (Castel et al., 2000). De dicho estudio se identifica además, la necesidad de cuantificar  $U_c$ , para poder tener una estimación de las pérdidas debido a la cubierta y su relación con el coeficiente global de pérdidas,  $U$ .

Según estudios realizados (Mullick et al., 1987; 1991), los coeficientes de pérdidas por las cubiertas ( $U_c$ ) de las cocinas solares tipo caja y de las cocinas solares concentradoras, tienen una influencia extremadamente importante en la eficiencia térmica de ellas. Las pérdidas térmicas debidas a las cubiertas transparentes de una cocina solar, de tipo caja, son las principales responsables de la baja eficiencia de dichos dispositivos de cocción. Para predecir o evaluar la eficiencia térmica de una cocina solar,  $U_c$  debe ser calculado como una función de la temperatura de la chapa metálica colectora de la radiación,  $T_p$ , de la temperatura ambiente del lugar,  $T_a$ , de la velocidad del aire,  $v$ , y de las características físicas intrínsecas de los materiales utilizados.

El cálculo de  $U_c$  de una cocina solar tipo caja, con cubierta simple o doble, se basa en los mismos principios físicos (pero con geometrías un tanto diferentes, lo que hace que algunas correlaciones que se usan en colectores solares de placa plana no sean aplicables a este caso) que el de un colector solar de placa plana con cubierta simple o doble, respectivamente. Ambos son funciones de muchas variables, como la temperatura de la chapa metálica ( $T_p$ ), emitancia de la chapa metálica ( $\epsilon_p$ ), emitancia de la cubierta ( $\epsilon_c$ ), espacio entre cubiertas ( $L$ ), temperatura ambiente ( $T_a$ ) y velocidad del aire ( $v$ ). Por este motivo este trabajo hizo uso de las ecuaciones utilizadas para los colectores solares de placa plana para analizar la cocina solar de tipo caja. Los coeficientes de pérdidas térmicas de una cocina solar, tanto globales ( $U$ ) como individuales (de cubierta,  $U_c$ , laterales,  $U_l$  y de la base,  $U_b$ ), son mejor medidos y calculados con datos de experimentos en laboratorio, que permiten que el sistema alcance un estado estacionario de las temperaturas a evaluar debido a la no variabilidad de condiciones externas, como la radiación, la velocidad del aire y la temperatura ambiente. Es por este motivo que se realizaron experiencias de laboratorio para la obtención de  $U_c$  para las distintas cubiertas a estudiar.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Descripción del sistema

El sistema ensayado consta de una cocina solar de tipo caja, mostrada en la Figura 1, y de dimensiones descritas en la Tabla 1. La cocina solar está formada, básicamente, por una caja interior de chapa metálica de aluminio pintado de negro mate que actúa como superficie colectora de la radiación; dicha caja está contenida en un armazón de madera cubierto por una estructura exterior de policarbonato alveolar en los lados, en la base, en el fondo y en la tapa rebatible. La chapa interior y la estructura exterior se encuentran separadas por lana de vidrio en los lados, en el fondo y en la base, que actúa como material aislante del calor producido por la chapa metálica.

La superficie transparente reposa sobre un marco de madera que está sobre la chapa metálica, inclinado  $13^\circ$  respecto a la horizontal y admite diferentes materiales de cubierta, como vidrio simple, doble vidrio, policarbonato alveolar simple y doble u otros, los cuales se colocan sobre el marco de madera. Para aumentar la cantidad de radiación captada en la chapa metálica, se dispone de un reflector de policarbonato recubierto con papel metalizado que actúa como tapa cuando la cocina no está en uso. El acceso al recipiente de cocción se realiza a través de la cubierta removible por la parte superior de la cocina.



Figura 1: Cocina solar tipo caja usada: a) Vista superior frontal; b) Vista completa; c) Vista lateral y d) Vista fondo.

A fin de simular el efecto de la radiación solar, se dispuso de una lámpara incandescente a una distancia de 0,81 m sobre la base de la cocina solar de manera perpendicular a la misma, como se aprecia en la Figura 1b).

Elemento	Dimensiones (m)	Características
Tapa / Reflector	0,57 × 0,43	Papel metalizado.
Base cocina	0,58 × 0,32	Entre las bases existe un aislamiento de lana de vidrio de 0,03 m.
Base colector	0,52 × 0,30	
Fondo cocina	0,58 × 0,20	Entre los fondos existe un aislamiento de lana de vidrio de 0,015 m.
Fondo colector	0,52 × 0,17	
Lateral fondo, alto	0,17	Entre los lados existe un aislamiento de lana de vidrio de 0,025 m por lado.
Lateral punta, alto	0,10	
Área apertura	0,52 × 0,38	Reposa sobre un marco de madera.
Cobertura	0,57 × 0,43	Removible de distintos materiales.

Tabla 1: Tabla de datos característicos de la cocina solar tipo caja usada.

La toma de datos se realizó con un datalogger Keithley conectado a una PC 386 que guarda los datos con una frecuencia regulable. Los datos de radiación de la lámpara dentro de la cocina con y sin cubiertas, se midieron con un solarímetro Kipp & Zonen CM5, cuyo error de medición se estima en un valor máximo de 10 % en relación a piranómetros de precisión. La evolución de las temperaturas a lo largo del tiempo se midió con un grupo de termocuplas de cobre-constantán.

#### Procedimiento

Con el objetivo de establecer la radiación horizontal incidente sobre la chapa colectora se realizaron medidas de radiación de la lámpara dentro de la cocina solar sin cubierta, con y sin el reflector puesto en un ángulo de 95° con respecto de la base de la cocina. Posteriormente se procedió a realizar medidas de la radiación de la lámpara dentro de la cocina con las distintas configuraciones de cubiertas a estudiar, con y sin el reflector en el mismo ángulo que en el caso anterior. Antes de realizar cada medida de radiación se esperó 5 minutos para que la lámpara incandescente alcanzara una temperatura constante y entrara en régimen para así entregar una tasa de radiación estable. De igual manera, antes de cada medición, se esperó a que la temperatura de la placa colectora fuese igual a la del ambiente. Para cada cubierta estudiada se tomaron datos de radiación con una frecuencia de 10 segundos durante 10 minutos y se promediaron los valores para obtener la radiación incidente sobre la placa colectora, los que se muestran en la Tabla 2.

Elemento	Radiación s/reflector (W/m <sup>2</sup> )	Radiación c/reflector (W/m <sup>2</sup> )
Cocina sin tapa	770	1025
Vidrio 4 mm.	660	875
Vidrio doble	540	720
Policarbonato alveolar simple	610	810
Policarbonato alveolar doble	580	775

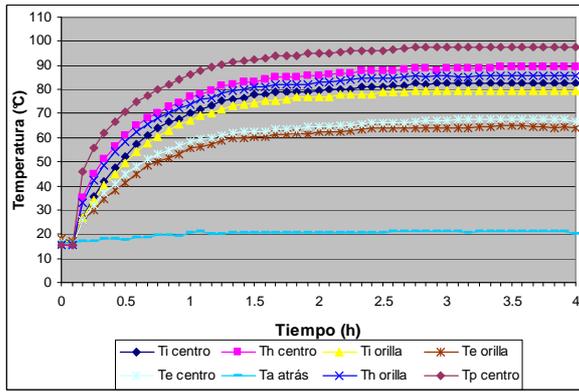
Tabla 2: Tabla de radiación horizontal incidente sobre la placa colectora.

Luego de medir la radiación incidente sobre la chapa metálica colectora para cada caso, y para poder calcular los coeficientes globales de pérdida ( $U$ ) y los coeficientes de pérdida de la cubierta ( $U_c$ ) debidos a cada cubierta transparente, es que se realizaron cuatro experiencias separadas de calentamiento de la cocina solar.

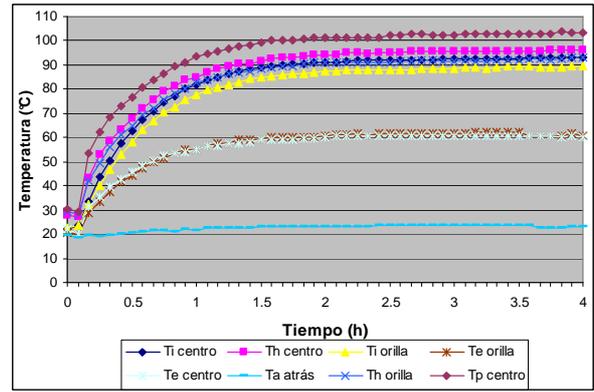
En las cuatro experiencias de calentamiento, se usó la misma configuración de la cocina solar de manera de estandarizar las experiencias. Dicha configuración estándar del procedimiento se detalla a continuación. Se usó la cocina con el reflector puesto en un ángulo de 95° con respecto de la base de la cocina que fue puesta justo debajo de la lámpara incandescente. La experiencia de calentamiento tuvo una duración de 4 horas, tiempo en el cual se alcanzó la temperatura estacionaria de los elementos medidos. Se midieron las temperaturas de dichos elementos solo para el proceso de calentamiento de la cocina solar (y no para su posterior enfriamiento) con ocho termocuplas, que fueron adosadas a la superficie a medir mediante cinta adhesiva y entre ellas una fina lamina de papel metálico (como el de la superficie reflectante) con el fin de evitar que midan la radiación incidente. Una de ellas fue puesta a medir la temperatura ambiente, 10 cm por detrás de la cocina solar. Otras dos fueron colocadas en la parte externa de la cubierta, la primera en su centro y la otra a 10 cm de la primera, hacia el costado de la cocina. Dos termocuplas fueron colocadas para medir las temperaturas de la parte interna de la cubierta, la primera en su centro y la otra a 10 cm de la primera hacia un lado de la cocina. Dos termocuplas fueron puestas a medir la temperatura del aire dentro de la cocina solar, la primera en el centro de la cocina y la otra a 10 cm de la primera hacia un lado de la cocina, ambas a una altura de 5 cm de la chapa metálica. Finalmente se puso una termocupla para medir la temperatura de la chapa metálica en el centro de ésta.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

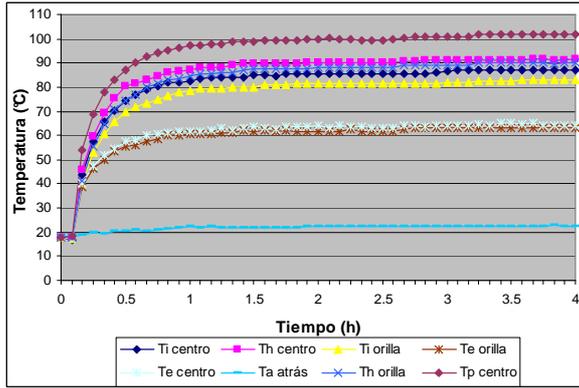
En la Figura 2, que se ve a continuación, se aprecian las gráficas de cada una de las cuatro experiencias, donde se muestran las temperaturas antes mencionadas. Las variables mostradas son:  $T_a$  = Temp. ambiente,  $T_e$  = Temp. externa de la cubierta,  $T_i$  = Temp. interna de la cubierta,  $T_h$  = Temp. del aire en la cocina (aire del horno) y  $T_p$  = Temp. de la chapa metálica (placa). En dichas gráficas podemos observar que las diferencias en las temperaturas que fueron medidas en el centro y a 10 cm hacia un lado no son significativas, alcanzando un máximo de 4 °C, por lo que podemos suponer, en una primera aproximación, que la distribución de las distintas temperaturas es uniforme a lo largo de su área. La única cubierta que presenta diferencias notables es la de policarbonato alveolar doble, notando que dichas diferencias se aprecian en la parte externa de la cubierta donde alcanza los 10 °C.



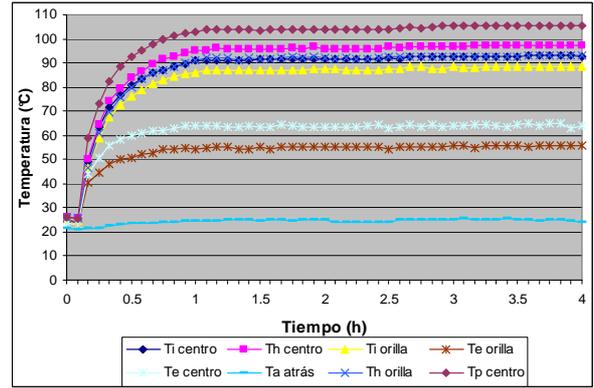
a) Vidrio simple de 6 mm.



b) Vidrio doble.

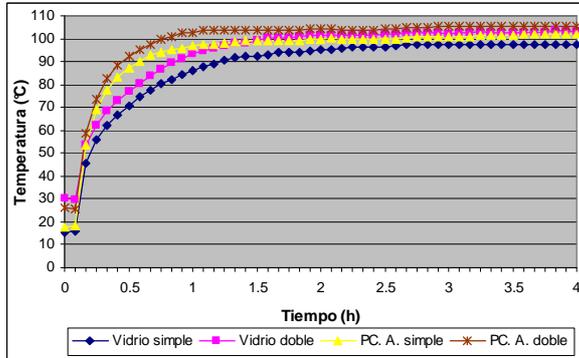


c) Policarbonato alveolar simple.

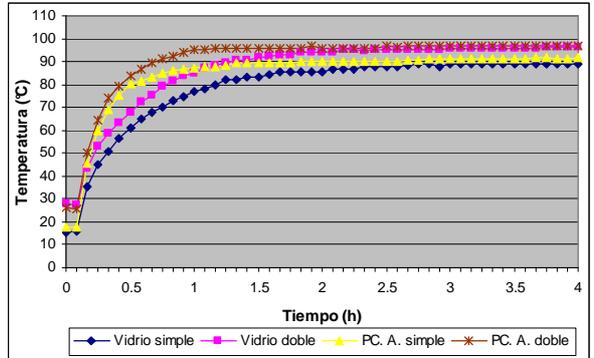


d) Policarbonato alveolar doble.

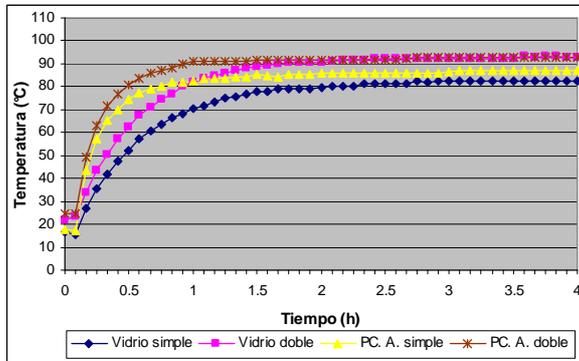
Figura 2: Gráficos de calentamiento de la cocina solar: a) vidrio simple de 6 mm; b) vidrio doble; c) policarbonato alveolar simple y d) policarbonato alveolar doble.



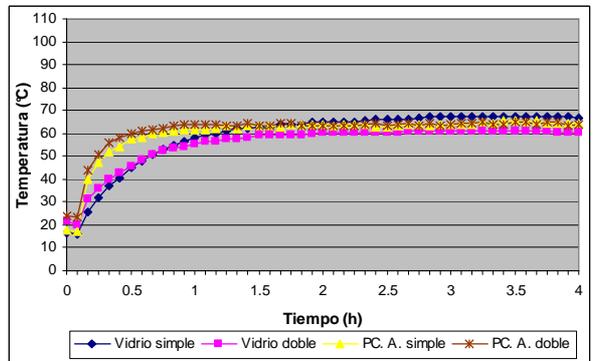
a) Chapa metálica.



b) Aire del horno.



c) Parte interna de la cubierta.



d) Parte externa de la cubierta.

Figura 3: Gráficos de calentamiento de la cocina solar: a) Chapa metálica; b) Aire del horno; c) Parte interna de la cubierta y d) Parte externa de la cubierta.

En la Figura 3 se muestra, en un mismo gráfico, la evolución de las temperaturas para el aire del horno, la parte interna de la cubierta, la parte externa y la chapa metálica para las cuatro cubiertas estudiadas.

En las Figuras 2 y 3, en los casos de doble cubierta,  $T_e$  corresponde a la parte externa de la cubierta superior y  $T_i$  corresponde a la parte interna de la cubierta inferior.

## ANÁLISIS

De las gráficas de la Figura 3 podemos apreciar que la temperatura de estado estacionario se alcanza luego de la tercera hora de la experiencia en todos los casos, por lo que se trabajó con los datos de ese rango de tiempo para los cálculos sucesivos. La única excepción apreciable del tiempo de alcance de la temperatura de estado estacionario se observa en la Figura 2 b) para el vidrio doble, en donde se aprecia que en los últimos diez minutos hubo un nuevo aumento de las temperaturas de la chapa metálica, de la parte interna de la cubierta y del aire del horno. Dado que dicho aumento no es apreciablemente grande, se supuso que se había alcanzado la temperatura de estado estacionario, al igual que las otras cubiertas. Los valores promediados de las distintas temperaturas durante la última hora de experiencia se muestran en la Tabla 3.

Elemento	Temperatura de placa (°C)	Temperatura del horno (°C)	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C)	Temperatura ambiente (°C)
Vidrio 6 mm	97,6	89,0	82,7	67,4	21,1
Vidrio doble	102,9	95,8	92,7	60,7	23,4
Policarbonato alveolar simple	101,6	91,3	86,9	64,6	22,5
Policarbonato alveolar doble	105,3	97,0	92,8	64,2	25,1

Tabla 3: Tabla de temperaturas en estado estacionario.

Como luego de recibir la radiación, la placa se calienta y con ello, el resto del sistema, las pérdidas que tendrá el conjunto serán en relación al sumidero dado por la temperatura ambiente, lo que define un coeficiente global de pérdidas. Tomando en cuenta que la temperatura de la placa llega a un estado estacionario ( $T_p = \text{cte.}$  en todas las paredes internas), usando la ecuación (6) de Passamai (1998), obtendremos que:

$$U = \frac{S}{T_p - T_a} \quad (1)$$

donde  $U$  es el coeficiente global de pérdidas y  $S$  la radiación horizontal incidente sobre la chapa colectora.

Reemplazando los valores medidos en las Tablas 2 y 3 en la ecuación (1), obtendremos una primera aproximación de los valores del coeficiente global de pérdidas para la cocina solar, con cada una de las cubiertas.

Elemento	$U$ (W/m <sup>2</sup> K)
Vidrio de 6 mm	11,45
Vidrio doble	9,05
Policarbonato alveolar simple	10,25
Policarbonato alveolar doble	9,66

Tabla 4: Tabla de coeficientes globales de pérdida ( $U$ ) de la cocina solar.

Para el cálculo de  $U_c$  recurrimos a los métodos descritos en Duffie y Beckman (1991) para el cálculo del coeficiente de pérdidas por la cubierta para una placa absorbadora plana. Para esto escribimos el coeficiente  $U_c$  en término de los coeficientes individuales de pérdidas  $U_{p-i}$ ,  $U_{i-e}$ ,  $U_{e-a}$  (que se definen más adelante) y del coeficiente correspondiente a las pérdidas conductivas debido a la cubierta, que veremos está relacionado con  $(d_i+d_e)/k_c$ , de la siguiente manera:

$$U_c^{-1} = U_{p-i}^{-1} + U_{i-e}^{-1} + U_{e-a}^{-1} + \frac{(d_i + d_e)}{k_c} \quad (2)$$

donde  $U_{p-i}$  corresponde a las pérdidas de la placa hacia la parte interna de la cubierta,  $U_{i-e}$  corresponde a las pérdidas de la parte interna de la cubierta hacia la parte externa de la misma,  $U_{e-a}$  corresponde a las pérdidas de la parte externa de la cubierta hacia el ambiente y  $(d_i+d_e)/k_c$  corresponde a las pérdidas por conducción entre las partes de las cubiertas y a través de la cubierta hacia el ambiente, donde  $d_i$  es el espesor de la cubierta interna,  $d_e$  es el espesor de la cubierta externa y  $k_c$  es la conductividad térmica de la cubierta. Debemos notar que en el caso del vidrio de 6 mm,  $U_{i-e}$  y  $d_i$  no existen por el hecho de ser solo una cubierta simple.

Cada coeficiente individual de pérdidas está compuesto por la suma algebraica de las pérdidas producidas por radiación y convección entre el par de superficies dadas, con lo cual tendremos que:

$$U_{p-i} = h_{c,p-i} + h_{r,p-i} \quad ; \quad U_{i-e} = h_{c,i-e} + h_{r,i-e} \quad ; \quad U_{e-a} = h_{c,e-a} + h_{r,e-a} \quad (3)$$

donde  $h_c$  es el coeficiente de pérdidas debido a la convección y  $h_r$  es el coeficiente de pérdidas debido a la radiación. Los subíndices  $p-i$  corresponden al sistema placa-interior de la cubierta, los  $i-e$  corresponden al sistema interior-exterior de la cubierta y los  $e-a$  corresponden al sistema exterior de la cubierta-aire ambiente.

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas debido a la radiación ( $h_r$ ) entre dos superficies, acudimos a la siguiente ecuación, dada también por Duffie y Beckman (1991):

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (4)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y tiene un valor de  $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,  $T_1$  es la temperatura de la primera superficie,  $T_2$  la de la segunda superficie,  $\varepsilon_1$  es la emitancia de la primera superficie y  $\varepsilon_2$  la de la segunda superficie.

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas debido a la convección entre dos superficies planas paralelas ( $h_{c,p-i}$  y  $h_{c,i-e}$ ), acudimos a la siguiente ecuación obtenida de la definición del número adimensional de Nusselt:

$$h_c = Nu \cdot \frac{k}{L} \quad (5)$$

donde  $Nu$  es el número de Nusselt para el fluido entre las superficies,  $k$  es la conductividad térmica del fluido entre las superficies y  $L$  es el espacio entre las mismas.

Para calcular el número de Nusselt debemos recurrir a las correlaciones obtenidas de la experimentación (Hollands et al., 1976), que se obtienen al establecer la relación entre los números adimensionales de Nusselt y de Rayleigh, y el ángulo de inclinación de las superficies entre  $0^\circ$  y  $75^\circ$ :

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[ 1 - \frac{1708 \cdot (\text{sen}(1.8\beta))^{1.6}}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cdot \cos(\beta)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (6a)$$

El signo más (+) en el exponente de los últimos dos corchetes de la ecuación (6a), significa que solo los valores positivos de los paréntesis deben ser usados, en caso contrario deberá usarse 0. El número adimensional de Rayleigh se calcula usando la siguiente fórmula:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (6b)$$

donde  $g$  es la intensidad del campo gravitatorio terrestre,  $\beta'$  es el coeficiente de expansión volumétrico del fluido (para un gas ideal se toma  $\beta' = (1/T_f)$ ,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las superficies,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido y  $\alpha$  es la difusividad térmica del fluido. Las propiedades del fluido entre las superficies deben ser evaluadas a la temperatura media de las superficies, es decir,  $T_f = (T_1 + T_2)/2$ .

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas debido a la convección entre una superficie plana y el aire ambiente ( $h_{c,e-a}$ ), se usara la ecuación empírica deducida para dicho coeficiente (Wattmuff et al., 1977), llamado  $h_w$ :

$$h_w = 2,8 + 3,0 \cdot v \quad (7)$$

donde  $v$  es la velocidad del aire.

En la Tabla 5, que viene a continuación, se detallan las principales características de las cubiertas estudiadas:

Elemento	$k$ (W/mK)	$L$ (mm)	$d$ (mm)	$\varepsilon$
Chapa de Aluminio	237	13,5	5	0,95
Vidrio 6 mm	1,4	-----	4	0,9
Vidrio doble	1,4	12,5	4 – 6	0,9
Policarbonato alveolar simple	0,2	4	15 – 15	0,75
Policarbonato alveolar doble	0,2	$2 \times 2,5$	1 – 0,5 – 1	0,75

Tabla 5: Tabla de datos de las cubiertas.

A partir de los datos experimentales de temperatura, medidos en el laboratorio y expuestos en la Tabla 3, los valores de las características físicas intrínsecas de las cuatro cubiertas y de la chapa metálica mostrados en la Tabla 5, reemplazamos en las ecuaciones (4), (5) y (7) para obtener los valores de los coeficientes individuales de pérdidas. Con éstos se calcula el valor de  $U_c$ , según la ecuación (2), para cada una de las cubiertas, según se indica en la Tabla 6. Además, se muestran los valores

porcentuales de  $U_c$  con respecto a  $U$  y los de la diferencia entre el  $U_c$  del vidrio de 6 mm con el de cada cubierta, relativo al del vidrio de 6 mm:

Elemento	$U_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	$100 \times (U_c/U)$	$100 \times (U_{c,v6mm} - U_c)/U_{c,v6mm}$
Vidrio 6 mm	4,96	43,4	0,0
Vidrio doble	3,34	36,9	32,7
Policarbonato alveolar simple	4,19	40,9	15,5
Policarbonato alveolar doble	3,48	36,1	29,8

Tabla 6: Tabla de coeficientes de pérdidas por las cubiertas ( $U_c$ ) de la cocina solar.

## CONCLUSIONES

A partir de las gráficas mostradas en la Figura 3, es posible inferir que las cubiertas tienen un efecto significativo sobre las curvas de calentamiento de la cocina solar tipo caja, tanto en su forma como en su temperatura máxima alcanzada, notando que el uso específico de una de ellas nos da curvas características para cada caso. En las cubiertas de vidrio es posible notar que la temperatura de estado estacionario se logra de manera más lenta que en el caso de los policarbonatos alveolares. En el caso de las temperaturas máximas alcanzadas, se aprecia que de forma decreciente, las mejores cubiertas son el policarbonato alveolar doble y el doble vidrio, seguidas de cerca por el policarbonato alveolar simple y finalmente el vidrio simple de 6 mm.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 6, calculados con las fórmulas mostradas en este trabajo, es posible deducir que las cubiertas que poseen un menor coeficiente de pérdidas son, de forma decreciente, el doble vidrio y el policarbonato alveolar doble, seguidas por el policarbonato alveolar simple y finalmente el vidrio simple de 6 mm al igual que lo notado en las gráficas de la Figura 3. Se observa también que las cubiertas que tienen un menor valor de  $U_c$  poseen también un menor valor de  $U$ .

También se observa, de los porcentajes de  $U_c$  con respecto a  $U$  que, a pesar de que las cocinas estén a mayor temperatura, el hecho de tener una mejor aislación en la cubierta (es decir un menor  $U_c$ ), les permite disminuir la cantidad porcentual de calor que se pierde por la cubierta en relación con el coeficiente global de pérdidas. Por otro lado, a pesar de que el vidrio doble tiene un  $U_c$  menor que el del policarbonato alveolar doble, este último permite un mejor comportamiento térmico de la cocina solar debido a su mayor transmitancia y, por consiguiente, una mayor energía recibida en la chapa metálica. La relación  $U_c/U$  para el policarbonato alveolar doble es levemente menor que para el vidrio doble.

Dado que el trabajo se desarrolla en condiciones de radiación constante (tanto en magnitud como dirección) y sin efectos del viento, se restringe la aplicación de los resultados para casos prácticos. Ha de tenerse en cuenta, que por la constancia lograda en condiciones de laboratorio, se determinan valores fijos de estos coeficientes en condiciones de estancamiento, pero en los casos reales los coeficientes de pérdidas varían, conforme lo hacen la radiación, la temperatura ambiente y el viento.

## NOMENCLATURA

Símbolo	Unidades	Símbolo	Unidades
$d_e$ = Espesor de la cubierta externa.	m	$d_i$ = Espesor de la cubierta interna.	m
$h_c$ = Coeficiente de pérdidas debido a la convección.	(m <sup>2</sup> K)/W	$h_r$ = Coeficiente de pérdidas debido a la radiación.	(m <sup>2</sup> K)/W
$k$ = Conductividad térmica del fluido entre las superficies.	W/(m <sup>*</sup> K)	$k_c$ = Conductividad térmica de la cubierta.	W/(m <sup>*</sup> K)
$L$ = Espacio entre cubiertas.	m	$Nu$ = Numero de Nusselt.	
$Ra$ = Numero de Rayleigh.		$S$ = Radiación horizontal incidente.	W/m <sup>2</sup>
$T_a$ = Temperatura ambiente.	°C	$T_e$ = Temperatura externa de la cubierta.	°C
$T_h$ = Temperatura del aire en la cocina (horno).	°C	$T_i$ = Temperatura interna de la cubierta.	°C
$T_p$ = Temperatura de la chapa metálica (placa).	°C	$U$ = Coeficiente global de pérdidas.	W/(m <sup>2</sup> K)
$U_c$ = Coeficiente de pérdidas por la cubierta.	W/(m <sup>2</sup> K)	$U_{e-a}$ = pérdidas de la parte externa de la cubierta hacia el ambiente	(m <sup>2</sup> K)/W
$U_{i-e}$ = pérdidas de la parte interna de la cubierta hacia la parte externa de la misma	(m <sup>2</sup> K)/W	$U_{p-i}$ = pérdidas de la placa hacia la parte interna de la cubierta	(m <sup>2</sup> K)/W
$\alpha$ = Difusividad térmica del fluido.	m <sup>2</sup> /s	$\beta$ = Angulo de inclinación de la cubierta.	Grados sexagesimales
$\beta'$ = Coeficiente de expansión volumétrico del fluido.	1/(°C)	$\sigma$ = Constante de Stefan-Boltzmann.	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\epsilon_p$ = Emitancia de la chapa metálica.		$\epsilon_c$ = Emitancia de la cubierta.	
$\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido.	m <sup>2</sup> /s		

## REFERENCIAS

- Castel M, Finck Pastrana A., Collares Pereira M., Fonseca S. y Estévez A. (2000). Protocolo de cocción solar de RICSA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, Nº 1, 03.77-03.80.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991) Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª Edición. Wiley-Interscience, New York.
- Estévez A., Buenanueva F., Orduna D. y Cuitiño G. (2008). Estudio del comportamiento de hornos solares tipo caja en el tiempo y con la frecuencia de uso. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 12, 03.71-03.78.
- Hollands K. G. T., Unny T. E., Raithby G. D. y Konicek L. (1976). Free convection heat transfer across inclined air layers. ASME Journal of Heat Transfer, 98, 189.
- Lema A., Pontin M., Ghirardotto M. y Sanmartino A. (2006). Estudio de diferentes materiales de cubierta para cocinas solares tipo caja. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10, Nº 1.
- Mullick S. C., Kandpal T. C. y Saxena A. K. (1987). Solar Energy, 39, 353.
- Mullick S. C., Kandpal T. C. y Kumar S. (1991). Solar Energy, 46, 139.
- Passamai V. (1998). Simulación del comportamiento térmico de una cocina solar. Avances en Energías. Renovables y Medio Ambiente Vol. 2, Nº 1.
- Passamai V. y Passamai M. (2002). Experiencias con cocinas solares tipo cookit de costo mínimo. Avances en Energías. Renovables y Medio Ambiente Vol. 6, Nº 2, 10.33-10.36.
- Saravia L. y Suárez H. (2000). Testeo de materiales reflectores para cocinas solares tipo caja. Avances en Energías. Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, 8.75-8.80.
- Stoll D., Giroux J. F. y Passamai V. (1999). Experiencias controladas realizadas con distintas cocinas solares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, Nº2. 3.81-3.84.
- Tilca F., Mealla Sánchez L. y Passamai V. (1999). Conclusiones finales sobre la conveniencia del uso de algunos materiales en cocinas solares tipo caja. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 3, Nº 1.
- Watmuff J.H., Charters W.W.S. y Proctor D. (1977). Solar and wind induced external coefficients for solar collectors COMPLES, Nº2, 56.

## ABSTRACT

In this work the heat loss coefficients of four types of cover are evaluated. The transparent covers have a reflector of the same area as the opening area and four different materials for the cover were used: simple glass, double glass, alveolar polycarbonate and double alveolar polycarbonate. The objective was to quantify their heat loss coefficient value and determine which of them allows for a better thermal behaviour of the solar cooker. Besides, the relation between the global heat loss coefficient and the cover heat loss coefficient was determined for each one of them.

**Keywords:** heat loss coefficient, solar cooker's cover, solar cooker, solar energy.