

FÍSICA TÉRMICA DE UNA COCINA SOLAR DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

V. Passamai^{1,2}, T. Passamai¹, S. Pareja¹ y L. Pizarro³

INENCO – CIUNSa – CONICET

Facultad de Ciencias Exactas

Av. Bolivia 5150 – 4400 Salta. R. Argentina

Tel.: 0054-387-4255389 – Fax: 0054-387-4255489 – E-mail: passamai@unsa.edu.ar

RESUMEN: Una cocina solar de pequeñas dimensiones, consistente en una olla liviana, con tapa, de color oscuro, encerrada en una bolsa de plástico transparente resistente a la temperatura (polipropileno), colocada sobre un colector concentrador solar de cartón, con superficie reflectante de papel aluminizado, fue utilizada para calentar agua en condiciones de laboratorio, bajo la acción de una lámpara incandescente de 1000 W de potencia nominal, que simula la radiación solar. Un modelo teórico que describe la física térmica de esta cocina fue desarrollado y se comparan los resultados experimentales con dicho modelo, obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: cocción solar, cocina solar pequeña, simulación térmica.

INTRODUCCIÓN

Una cocina solar de pequeñas dimensiones (de 7 cm de alto y 17 cm de diámetro, denominada por ello “mini cocina solar”, Passamai et al., 2004), para una ración, consiste en una olla liviana (0,5 kg) de color oscuro, con tapa, encerrada en una bolsa de plástico transparente resistente a la temperatura, que va colocada sobre un colector-reflector de cartón y superficie reflectante de papel aluminizado de 1,20 m de ancho por 0,7 m de largo. Su plano de construcción se encuentra en Passamai (2006) y detalles de la misma se pueden ver en la Figura 1.



Figura 1: Olla oscura, cobertura de polipropileno y cocina solar pequeña.

Cuando es expuesta a la radiación solar, responde a tres mecanismos concurrentes para producir la cocción de un alimento. Esquemáticamente, éstos se pueden plantear como la superposición de tres efectos:

a) por la absorción de cuerpo negro de la radiación, supuesto el caso que el recipiente que contiene el alimento está recubierto por una pintura de ese color u oscura: por su absorptividad, la superficie capta la radiación incidente y la refleja (o lo hace en muy poca proporción), con lo que aumenta la temperatura de la pared metálica de la cual está construida (si se trata de una olla enlozada o de teflón con tapa y cerrada, se entiende fácilmente el mecanismo). Por conducción a través de las paredes, el calor fluye hacia el interior, calentando luego su contenido. Esto se ilustra en la Figura 2, donde la olla se representa con un círculo negro.

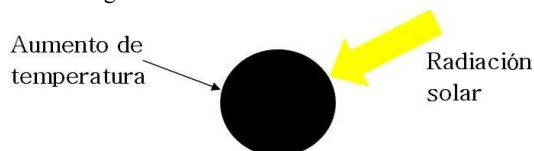


Figura 2: Absorción de la radiación solar directa mediante un cuerpo negro.

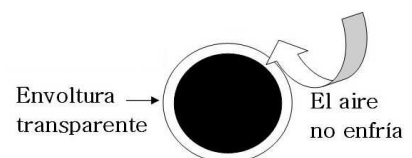


Figura 3: Efecto invernadero.

b) Por efecto invernadero, si el cuerpo se encuentra recubierto por una superficie transparente que impida su enfriamiento por acción de vientos del ambiente donde se encuentra, se refuerza el efecto de la temperatura. Esto se explica esquemáticamente mediante la Figura 3.

¹ Facultad de Ciencias Exactas, ² Investigador del CONICET, ³ Facultad de Ciencias de la Salud.

c) Como el cuerpo presenta una zona de sombra en la cara opuesta a la de incidencia de los rayos solares, si se incorpora un elemento espejado que recoja la radiación y la haga incidir sobre dicha región, producirá el tercer efecto de ganancia de energía. La Figura 4 muestra un corte esquemático en dos dimensiones, que simplifica el sistema tridimensional.

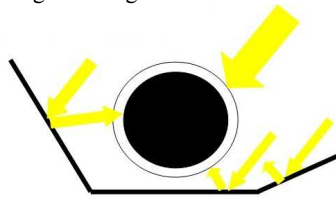


Figura 4: Radiación de respaldo a las pérdidas por sombra.

En particular, en Salta, si se desea realizar el calentamiento de agua, la cual puede usarse como patrón elemental para las pruebas que se presentan, su ebullición se logra al cabo de dos horas y media, si típicamente se comienza la exposición al sol alrededor de las 10:30 de una mañana soleada.

Otros tipos de cocinas solares han sido descritos en la bibliografía. Las denominadas “de tipo caja” (Binark, A. K. y Türkmen, N., 1996; Hussain et al., 1997; Nahar, 2003; Passamai, 1998, 1998a, 1999; Stoll et al., 1999; Tilca et al., 1998) fueron ampliamente tratadas, al igual que las concentradoras que usan superficies parabólicas o simiales (Sonune, A. V. y Philip, S. K., 2003).

En este trabajo se desea plantear y verificar la descripción física del proceso con una cocina solar pequeña, empleando las ecuaciones del transporte de energía involucradas.

ECUACIONES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN CADA CASO

Analizando cada uno de los casos expuestos en la introducción, se pueden tener tres ecuaciones básicas para la descripción cuantitativa de la dinámica térmica de la temperatura del agua contenida en la olla:

- Cuando se expone la olla oscura a la incidencia de radiación, con el agua en su interior, aprovechando solamente el efecto de cuerpo negro, la ecuación de balance de energía es:

$$IA = mc \frac{dT}{dt} + h_r A_r (T - T_a) + h A_c (T - T_a) \quad (1)$$

donde I es la radiación incidente, A es el área que recibe dicha radiación (puede tomarse como $A = \pi d^2/4$, con d igual al diámetro medio de la olla), m es masa de agua con calor específico c y temperatura T que se calienta en función del tiempo, h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, A_r la superficie que corresponde al intercambio radiativo, h el coeficiente convectivo de transferencia de calor hacia el medio ambiente, T_a la temperatura del aire de dicho medio ambiente y A_c el área de intercambio convectivo. En esta ecuación se desprecia la conducción por la base, pues la olla se encuentra colocada sobre un elemento de plástico resistente al calor, que apoya en la periferia y tiene una celda de aire en contacto, lo que se estima que minimiza las pérdidas por conducción.

- Como se dijo, si se rodea la olla con una superficie transparente que la cubra, se elimina la convección hacia el medio ambiente. Por otra parte, si se considera que sigue habiendo pérdida radiativa por la parte sombreada que no recibe radiación, resulta:

$$IA = mc \frac{dT}{dt} + h_r A_r (T - T_a) \quad (2)$$

donde la pérdida radiativa es considerada formalmente igual que la anterior, bajo la suposición que la superficie transparente lo es totalmente a la radiación térmica de onda larga. Al no incluirse la pérdida convectiva, la temperatura del agua se incrementa respecto del caso anterior.

- Finalmente, si se coloca una superficie como la que se indicó esquemáticamente en la Figura 4, y que corresponde al modelo construido, de modo que se gana una reflexión o incidencia de radiación extra, “de respaldo”, se obtendrá:

$$IA + I' A_r = mc \frac{dT}{dt} + U A_p (T - T_a) \quad (3)$$

donde I' es la radiación neta que ahora recibe el sistema por reflexión y A_r el área de incidencia de la misma. Si para simplificar se supone que la parte sombreada de la olla tiene una superficie $A_r = A$, con ello será $IA + I' A = I(1 + I'/I)A = I \kappa A$, donde el coeficiente $1 + I'/I = \kappa > 1$ es la mejora lograda por el mayor aporte de radiación al sistema. El coeficiente κ absorbe la aproximación realizada en cuanto a igualar las superficies de asoleamiento con la de asoleamiento reflejado. Por su parte, U es el coeficiente global de pérdida de calor y A_p es el área de pérdidas globales que se puede establecer igual a ηA , con η a determinar. La naturaleza de estas pérdidas es radiativo-convectiva, se encuentran incluidas en este nuevo término –aunque

menguadas respecto de los valores anteriores probablemente— y antes estaba cada una especificada por su cuenta. Como estas pérdidas globales se pueden considerar pequeñas, por la aparición del nuevo término de incidencia de la radiación en el primer miembro, la temperatura T se verá incrementada aún más que antes.

Con las consideraciones vistas, la ecuación final para este caso es:

$$I\kappa A = mc \frac{dT}{dt} + UA_p(T - T_a) \quad (4)$$

MATERIAL Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Para simplificar y poder controlar mejor las experiencias, las mismas se realizaron en laboratorio, contando con una lámpara incandescente de 1000 W de potencia total como fuente térmica para simular la radiación solar. Si bien la calidad espectral de la lámpara incandescente no es similar a la solar, su uso en este trabajo se realizó teniendo en cuenta que el valor de I , medido con un solarímetro Kipp & Zonnen CM5, cuyo error en la lectura de la radiación se estima entre el 5 y 10 % en relación a piranómetros de precisión, tuviera valores iguales. No interesa la respuesta espectral —aún si la hubiera— del calentamiento por radiación incidente sobre la olla, del agua contenido en la misma, sino su respuesta térmica global a I , para valores solares totales similares a los medidos cerca del mediodía. Con un Variac, se pudo variar la intensidad de radiación incidente sobre la tapa de la olla, desde 300 W/m^2 hasta alrededor de 1000 W/m^2 , manteniendo la lámpara a una distancia constante de la tapa del recipiente, igual a $0,55\text{ cm}$, para la cual se obtuvo un valor de radiación del orden de 1060 W/m^2 . Se estima el error en la medición de la radiación en un 10%, habida cuenta que existen variaciones espaciales de ésta sobre la cocina solar. Experiencias preliminares llevaron a la conclusión que mediante este método se logra hervir una cierta cantidad de agua cuando las condiciones son las que corresponden a la superposición simultánea de los tres efectos antes descriptos y la radiación es la necesaria para ello.

Mediante una termocupla de cobre-constantán se midió la temperatura del agua en el interior de la olla, habiéndose tomado la precaución de realizar un pequeño orificio en la tapa del recipiente para introducir, a través del mismo, una termocupla. Asimismo, se puso cuidado al pasar el sensor a través de la superficie transparente que rodea el recipiente (resistente a una temperatura de $170\text{ }^\circ\text{C}$, como es el caso del polipropileno, que no se deteriora), para impedir que pierda vapor de agua a través del orificio, sellando éste para esos efectos. Otra termocupla se usó para medir la temperatura del medio ambiente.

Las termocuplas se conectaron a un sistema de captación automática de datos, consistente en una plaqueta de la firma Keithley, instalada a una PC. La frecuencia elegida para la toma de los datos fue de cinco minutos.

DATOS OBTENIDOS

Las curvas de la Figura 5 muestran la evolución de los datos de temperatura del agua, $T(t)$, para cuatro casos de radiación, $1053, 550, 402$ y 341 W/m^2 incidentes sobre la cocina solar, conteniendo la misma cantidad de agua (350 g), tomados de las respectivas experiencias de laboratorio. Las mismas muestran un aumento sostenido hasta lograr la condición estacionaria, a partir de la cual, por interrupción de la acción de la lámpara, se deja enfriar el sistema y se registra hasta que llega la temperatura del agua a igualar la del medio ambiente. La parte de enfriamiento se midió y se presenta en la figura, pero no fue nuestro interés realizar su simulación, aunque la misma es inmediata.

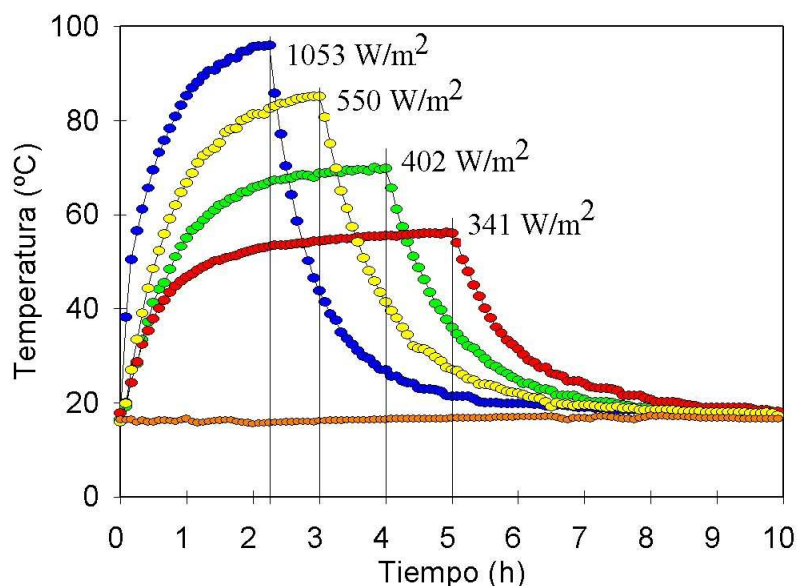


Figura 5: Distintos niveles de radiación y temperaturas obtenidas para el agua.

RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE CAMBIO

Cuando se aporta radiación con respaldo, se tiene que vale la ecuación (4). Despejando, se encuentra que la rapidez de aumento de la temperatura del agua es:

$$\frac{d(T - T_a)}{dt} = \frac{I\kappa A - U\eta A(T - T_a)}{mc} \quad (5)$$

En el instante inicial, el agua está a temperatura ambiente, $T=T_a$, con lo que, en ese momento es válida la siguiente ecuación:

$$\left. \frac{d(T - T_a)}{dt} \right|_{inicial} = \frac{I\kappa A}{mc} \quad (6)$$

Como es de esperar, cuanto más alta es la radiación I incidente, mayor es la rapidez inicial de aumento de la temperatura T .

A medida que la temperatura crece, el término $U\eta A(T - T_a)/(mc)$ también aumenta y la rapidez de crecimiento de la temperatura, dada por (5) es cada vez más pequeña. Esto significa que la temperatura se aproxima a su valor final T_e de estado estacionario (de equilibrio con el medio) o a la de ebullición, como fue el caso para $I=1053 \text{ W/m}^2$. Obviamente, cuando la temperatura alcanza este valor, su rapidez de crecimiento es cero. Entonces la ecuación (5) se transforma en:

$$\frac{d(T - T_a)}{dt} = 0 = \frac{I\kappa A - U\eta A(T_e - T_a)}{mc} \quad (7)$$

y vale en ese caso, la siguiente:

$$T_e - T_a = \frac{I\kappa}{\eta U} \quad (8)$$

En esta última, los valores de radiación y temperaturas se obtuvieron por medición en el laboratorio.

Por otro lado, si se reordena la ecuación (5) del siguiente modo:

$$\frac{d(T - T_a)}{(T - T_a) - \frac{I\kappa}{U\eta}} = -\frac{U\eta A}{mc} dt \quad (9)$$

se separan las variables, con $T - T_a$ en el lado izquierdo y t en el derecho. Además, como $d(T - T_a) = d[(T - T_a) - I\kappa/(U\eta)]$, se puede hacer el cambio de variable $u = T - T_a - I\kappa/(U\eta)$, con lo que, entre $t=0$ y t , para $T(0) = T_a$ y $T(t)$, respectivamente, u será: $u(0) = -I\kappa/(U\eta) = u_o$ y $u(t) = T - T_a - I\kappa/(U\eta) = u$, o sea que:

$$\int_{u(0)}^{u(t)} \frac{du}{u} = -\frac{U\eta A}{mc} \int_0^t dt \quad (10)$$

quedando, por tanto:

$$\ln \frac{u}{u_o} = -\frac{U\eta A}{mc} t \quad (11)$$

o sea:

$$u = u_o e^{-\frac{U\eta A}{mc} t} \quad (12)$$

Retomando las variables originales:

$$T = T_a + \frac{I\kappa}{U\eta} \left(1 - e^{-\frac{U\eta A}{mc} t} \right) \quad (13)$$

o bien, definiendo una "constante de tiempo":

$$\tau = \frac{mc}{U\eta A} \quad (14)$$

resulta, en definitiva:

$$T = T_a + (T_e - T_a)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (15)$$

donde T_a , T_e y τ son tres parámetros fundamentales que dependen de los datos obtenidos en forma experimental.

SIMULACIÓN ANALÍTICA Y EXPERIMENTOS

En relación a la expresión (15) para el caso considerado, los valores correspondientes a sus parámetros fueron obtenidos luego del análisis de los datos experimentales. Los mismos se presentan en este trabajo en la Tabla 1.

Reemplazando los parámetros de dicha tabla 1 en la ecuación (15) y comparando las curvas obtenidas gráficamente (que en la Figura 6 se presentan en con líneas continuas), con los datos (que aparecen como círculos tanto en la Figura 5, como la 6), se observa, cualitativamente, un buen ajuste.

Experimento:	1	2	3	4
τ (s)	1610,8	2737,1	2903,4	2440,4
T_a (°C)	17,9	15,9	16,4	17,9
T_e (°C)	96,0	85,2	70,1	56,2

Tabla 1: Datos obtenidos para T_a , T_e y τ de las experiencias realizadas.

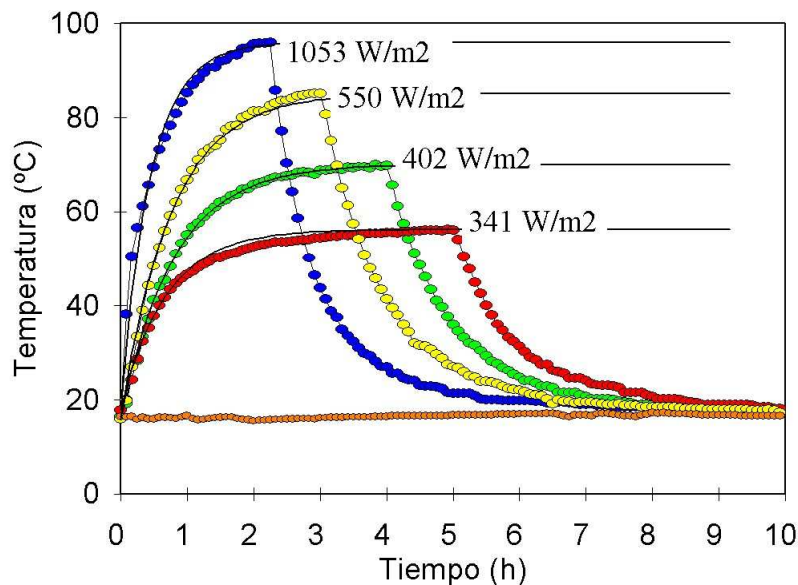


Figura 6: Superposición de las simulaciones de las experiencias con los datos experimentales.

Para determinar, de manera cuantitativa, el grado de ajuste entre los valores medidos y los analíticos del modelo, se calculó el error relativo porcentual promedio para todos los puntos, usando la fórmula:

$$\varepsilon_i \% = \frac{|T_i - T_{calc,i}|}{T_i} 100 \quad (15)$$

donde T_i es el valor medido de temperatura (para el tiempo en que se hizo la medición) y $T_{calc,i}$ el valor calculado correspondiente. Luego se determinó el promedio de los ε_i % para todos los valores. Las temperaturas fueron determinadas en unidades Kelvin. Los valores obtenidos de estos errores porcentuales promedios estuvieron comprendidos entre 0, 1 % y 0,6 % para los cuatro casos presentados.

CONCLUSIONES Y TRABAJO PROPUESTO

Se presentó un sencillo modelo de cocina solar que, además de ser fácil de construir y usar, puede ser empleado como herramienta de enseñanza para cursos introductorios de carreras de grado que incorporen el uso de la energía solar como fuente energética.

Se pretendió mostrar, con esquemas de flujos de radiación, conceptos básicos de cuerpo negro, efecto invernadero y balances térmicos dinámicos, la generación de ecuaciones de la física térmica involucrada en este tipo de sistemas.

Aun cuando el trabajo tiene muchas aproximaciones entre lo que se dijo en el modelo teórico y la realidad experimental, los resultados obtenidos son satisfactorios, pues los errores en las simulaciones son menores que el 1 % respecto de los datos

tomados en laboratorio, en promedio. Se debe advertir y tener en cuenta, no obstante, que se usó el parámetro τ para ajustar cada curva simulada con su correspondiente experimental, de modo que el error promedio global fuera mínimo. Por lo tanto, puede tomarse este método como indirecto para determinar τ .

Como trabajo futuro por realizar, se propone efectuar experiencias para validar las ecuaciones (1) y (2), correspondientes a los casos dados por las figuras 2 y 3, así como el proceso de enfriamiento posterior de todos los casos analizados a partir del corte de radiación. Además, será conveniente realizar los cálculos y mediciones conducentes a una evaluación de los valores de cada uno de los términos del segundo miembro de las ecuaciones (1), (2) y (3).

De las figura 5 ó 6, así como de la ecuación (4) y su resolución desarrollada en este trabajo (ecuaciones (5) a (15)), es dable comparar con un sistema eléctrico de comportamiento similar, consistente en la carga y descarga de un condensador, o la circulación transitoria de corriente para una autoinducción (Sears, F. et al., 2005).

Se considera importante también que el sistema analizado tenga solución analítica pues, como suele ser de interés, es posible plantear métodos numéricos aproximados para comparar una y otra forma de resolver la ecuación diferencial (4).

Es conveniente comparar este estudio con el realizado anteriormente (Binark y Türkmen, 1996; Hussain et al., 1997; Passamai, 1998, 1999; Nahar, 2003) para cocinas de tipo caja.

REFERENCIAS

- Binark, A. K. y Türkmen, N. (1996). Modelling of a hot box solar cooker. *Energy Conversion Management*. 37, 3, 303-310.
- Hussain, M.; Das, K. C. y Huda, A. (1997). The performance of a box-type solar cooker wiht auxiliary heating. *Renewable Energy*, 12, 2, 151-155.
- Nahar, N. M. (2003). Performance and testing of a hot box storage solar cooker. *Energy Conversion and Management*. 44, 1323-1331.
- Passamai, V. (1999). Simulación del comportamiento térmico de una cocina solar (Parte II). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 3, N° 2, 08.85-08.88.
- Passamai, V. (1998a). Experiencias de laboratorio y de campo con un horno solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 2, N° 1, 02.29-02.32.
- Passamai, V. (1998). Simulación del comportamiento térmico de una cocina solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 2, N° 1, 02.33-02.36.
- Passamai, V. et al. (2004). Vinculaciones humanas e institucionales a través del uso de la energía solar: la Comisaría del Menor y las mini cocinas solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 8, N° 2, 10.07-10.11.
- Passamai, V. (2006). Sitio web institucional. <http://www.unsa.edu.ar/passamai/PlanoMinicocina.pdf>.
- Sears, F.; Zemansky, M.; Young, H. y Freedman, R. (2005). *Física Universitaria*. Pearson Educación. Volumen 2.
- Sonune, A. V. y Philip, S. K. (2003). Development of a domestic concentrating cooker. *Renewable Energy*. 28, 1225-1234.
- 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, N° 1, 03.81-03.84.
- Suharta, H.; Sayigh, A. M.; Abdullah, M. y Mathew, K. K. (2001). The comparison of three types of Indonesian solar box cookers. *Renewable Energy*. 22, 379-387.
- Tilca, F.; Mealla Sánchez, L. y Passamai, V. (1998). Resultados de primeros ensayos en un equipo de tres cocinas solares semejantes. *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 2, N° 1, 02.17-02.20.

ABSTRACT: A small solar cooker, consisting of a light-weight dark colored lidded pan, enclosed in a transparent heat resistant plastic (polypropylene) bag, put on a solar carboard collector, with a reflective surface made of aluminized paper, was used to heat water in the laboratory, under a $1000 W$ incandescent lamp that simulates solar radiation. A theoretical model describing the thermal physical behavior of this cooker was developed and experimental results were compared with it. Satisfactory results were obtained.

Keywords: solar cooking, small solar cooker, thermal simulation.