

## SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA COCINA SOLAR

V. Passamai<sup>†</sup>

INENCO – CIUNSA\* - CONICET

Facultad de Ciencias Exactas

Av. Bolivia 5150 – 4400 Salta. R. Argentina

Tel.: 0054-87-255389 – Fax: 0054-87-255489 – Email: &lt;passamai@unsa.edu.ar&gt;

## RESUMEN

Se presenta un modelo matemático para la simulación del comportamiento térmico de un horno solar y se muestran los resultados de su aplicación a experiencias realizadas en el laboratorio. Se establecen conclusiones relativas a la importancia del parámetro densidad superficial x calor específico del material de la placa colectora y el carácter conductivo del calor para la cubierta transparente de policarbonato.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con lo observado experimentalmente en el laboratorio (Passamai, 1998), el calentamiento de un horno solar por acción de la radiación constante proveniente de una lámpara, presenta un comportamiento claramente capacitivo, en ausencia de alimentos. Esta respuesta es típica de una masa expuesta a radiación, con aire ambiente que la rodea, un área de ingreso de la radiación y de pérdidas térmicas.

Para ello se puede realizar un balance térmico global, comenzando con la principal componente del horno, la placa colectora, en una hipótesis de transferencia de calor unidimensional y no acoplado, que permita formular una ecuación diferencial para la superficie, cuya solución expresa el comportamiento observado. Por otro lado, como las otras superficies tienen un comportamiento similar, de cada una se obtiene, por ajuste con los datos a través del coeficiente global de pérdida de calor como variable de sintonización, una estimación de dicho coeficiente.

Resolviendo entonces las ecuaciones que surgen del modelo acoplado de transferencia de calor para todo el horno como un conjunto, siempre en una dimensión espacial, contenida en el plano perpendicular a la superficie horizontal donde se encuentra el horno solar, se tendrá una repetición de la simulación del comportamiento térmico, teniendo en cuenta esta vez las interacciones térmicas entre las partes del horno entre sí y con su medio ambiente.

## ESQUEMAS DE FLUJOS DE CALOR E HIPÓTESIS DE TRABAJO

En el mencionado trabajo de Passamai (1998) se realiza una descripción completa del funcionamiento térmico del horno solar, basada en mediciones de laboratorio, efectuándose en éste una presentación esquemática que permita visualizar los flujos de calor que intervienen en el calentamiento de la cocina, plantear las ecuaciones de la dinámica térmica, resolver las mismas y comparar con las temperaturas medidas.

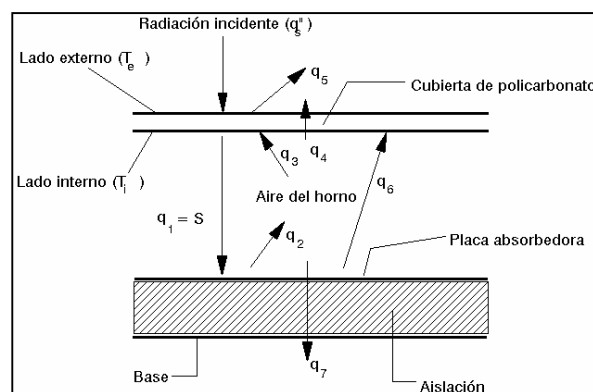


Figura 1: Esquema térmico detallado de un horno solar.

Despreciando la inclinación de la cubierta transparente respecto de la horizontal, un horno solar de tipo caja puede considerarse como un colector solar plano que opera en condiciones no estacionarias. La densidad de radiación solar incidente, por unidad de superficie, estará dada por  $q''_s$  ( $W/m^2$ ). De ésta,  $S$  es la fracción absorbida por la placa colectora. La temperatura inicial de todo el sistema es  $T_a$  (igual a la del ambiente) y, a medida que recibe radiación, la placa aumenta su temperatura hasta

<sup>†</sup> Investigador Adjunto del CONICET

\* Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, organismo financiador.

$T(t)$  con el transcurso del tiempo. Por su parte, la cubierta transparente, de policarbonato, adquiere una temperatura en la cara interna,  $T_i$ , mayor que la temperatura de la cara externa,  $T_e$  (esto fue medido por Passamai, 1998). En general, el mecanismo de esta situación puede establecerse, de manera completa, a través de un diagrama del sistema físico, de acuerdo con Incropera y De Witt (1990), según lo ilustra la Figura 1.

En dicha figura se tiene:

- $q_1$ : radiación neta incidente sobre la placa absorbedora, igual a  $S$  ( $W/m^2$ )
- $q_2$ : densidad de flujo de calor por convección libre de la placa al aire del horno
- $q_3$ : convección del calor desde el aire a la cara interna de la cubierta transparente
- $q_4$ : flujo de calor por conducción a través de la cubierta
- $q_5$ : pérdida global de calor desde la cubierta hacia el aire ambiente
- $q_6$ : intercambio radiativo entre la placa y el lado interno de la cubierta
- $q_7$ : pérdida de calor a través de la aislación térmica, en la base (despreciando los laterales)

Se tienen en cuenta las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Se supone que la masa de la placa colectora está distribuída a lo largo de un plano, de modo que  $f\sigma$  es la masa por unidad de área efectiva de que se dispone para esta aproximación unidimensional ( $f$  es un factor de corrección, a determinar, que afecta la densidad másica superficial real de la chapa colectora del horno solar),
2. la temperatura de la placa,  $T(t)$ , es uniforme a lo largo de su espesor,
3. la cubierta transparente, de policarbonato, no está a una temperatura uniforme (Passamai, 1998),
4. dicha cubierta absorbe calor proveniente de la placa únicamente (la diferencia entre  $q''_5$  y  $S$  es debida a la reflexión, no existe absorción del calor por la placa transparente de policarbonato),
5. se desprecia la inercia térmica de la cubierta transparente, suponiendo en cada instante un perfil lineal de temperaturas a lo largo de su espesor,
6. se desprecia la masa del aire, en el sentido de aporte inercial térmico, y se supone que sólo actúa como medio para el flujo convectivo del calor,
7. el aislante de la base pierde calor de manera conductiva, despreciándose su inercia térmica,
8. todas las pérdidas de calor ocurren como si existiera un único sumidero cuya temperatura es la del medio ambiente,
9. la temperatura del ambiente se mantiene constante,
10. las pérdidas de calor por la base son las más pequeñas del sistema.

## ECUACIONES DE BALANCE DE CALOR

Con las hipótesis anteriores se plantean los siguientes balances térmicos, por unidad de área de colección, en los sistemas que constituyen el esquema básico de la figura 1:

1. Placa absorbedora:

$$S = f\sigma c \frac{dT}{dt} + U_p(T - T_i) + h_1(T - T_h) + \frac{k_b}{d_b}(T - T_b) \quad (1)$$

2. Aire del horno:

$$h_1(T - T_h) = h_2(T_h - T_i) \quad (2)$$

3. Cubierta transparente, lado interno:

$$U_p(T - T_i) + h_2(T_h - T_i) = \frac{k}{d}(T_i - T_e) \quad (3)$$

4. Cubierta transparente, lado externo:

$$U_c(T_e - T_a) = \frac{k}{d}(T_i - T_e) \quad (4)$$

5. Base:

$$U_b(T_b - T_a) = \frac{k_b}{d_b}(T - T_b) \quad (5)$$

6. Balance global placa-aire:

$$S = f\sigma c \frac{dT}{dt} + U(T - T_a) \quad (6)$$

Básicamente, la ecuación (6) es la que tiene en cuenta el comportamiento capacitivo del sistema.

**RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES**

Comenzando con (6), con la condición inicial  $T(0)=T_a$ , resulta:  $T = T_a + \frac{S}{U} (1 - e^{-\frac{U}{f\sigma c}t})$ . Con los datos de una experiencia de calentamiento, realizada con el horno solar descrito en Passamai (1998), bajo radiación constante de una lámpara de tungsteno de 1000 W de potencia, se pudieron obtener los siguientes parámetros, con un ajuste promedio entre curva teórica y datos de temperatura de placa del 2 %:

$$S=637 \text{ W/m}^2, U=9.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}, f=4.8,$$

para una placa de chapa de hierro de 0.5 mm de espesor pintada de negro.

Por su parte, para resolver el resto de ecuaciones, se puede hacer uso de la hipótesis 10 enunciada antes, por la que un balance global de pérdidas se expresa de la siguiente forma (Duffie y Beckman, 1991):

$$U_c(T_e - T_a) = U(T - T_a) \quad (7)$$

Esta expresión, equivalente a la constancia de la relación  $(T_e - T_a)/(T - T_a)$  durante el tiempo de realización de la experiencia, se verificó experimentalmente en el laboratorio, no así la linealidad entre  $T$  y  $T_b$  expresada por la ecuación (5). No obstante, de la ecuación (7) se puede despejar  $T_e - T_a$  para llevar a la (4), resultando  $T_r - T_e = dU/k(T - T_a)$ . Si además se tienen en cuenta las ecuaciones (3) y (4), despreciando en la (3)  $h_2(T_h - T_i)$ , por ser las temperaturas del aire del horno y la interior de la cubierta transparente aproximadamente iguales, se tiene:  $T_e(t) = T_a + U/U_c [T(t) - T_a]$ . De manera semejante,  $T_i(t) = T_e(t) + dU_c/k [T_e(t) - T_a]$ . Finalmente, de la (2) se puede obtener la temperatura del aire del horno,  $T_h(t)$ .

**COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS ANALÍTICOS Y LOS DATOS**

Se realizó una experiencia de calentamiento del horno vacío con una radiación proveniente de lámpara (Passamai, 1998). La medida de dicha radiación sobre la cubierta transparente fue de 1000 W/m<sup>2</sup>, mientras que en el interior del horno, sobre la placa colectora, llegaba a alrededor de 600 W/m<sup>2</sup>. Se midieron las temperaturas sobre la placa colectora interna, del aire del horno, de la cubierta de policarbonato en sus lados interno y externo, en la base del horno y del aire ambiente, obteniéndose la figura 2.

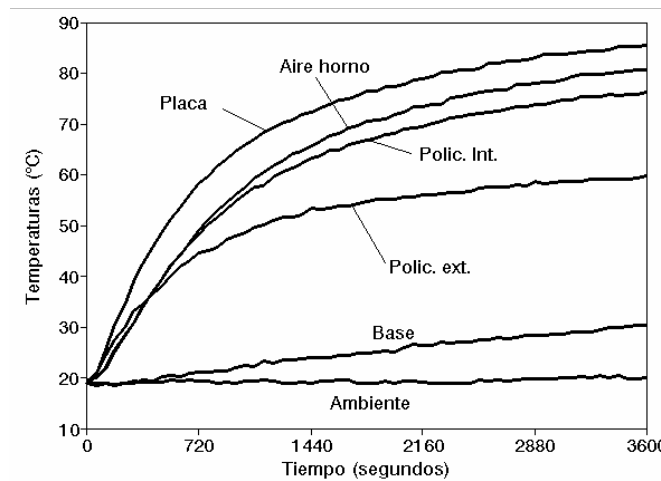


Figura 2: Experiencia de calentamiento del horno solar con radiación de lámpara.

Empleando el procedimiento explicado, se superpusieron los gráficos de las curvas experimentales y simuladas, obteniéndose la Figura 3 para las temperaturas de placa y cubierta transparente, tanto en el lado interno como externo. Este último cálculo se realizó de modo tal que la minimización del error porcentual medio entre una y otra curva de temperatura (2 %) dio por resultado el valor del coeficiente  $U_c$ .

$$U_c = 15.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Por su parte, del gráfico de la temperatura del aire del horno, minimizando su error respecto a los datos hasta un 3,5 % (figura 4), se obtuvo, para un espesor de la cubierta transparente de 0,4 cm:

$$k = 0.18 \text{ W/(mK)}.$$

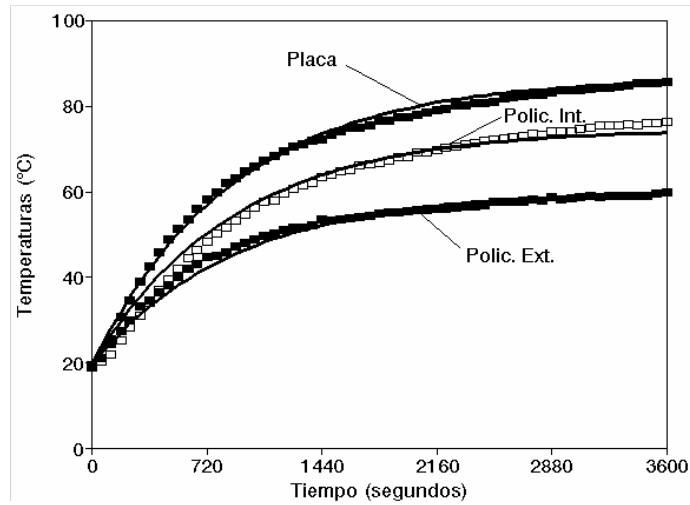


Figura 3: Curvas de temperatura simuladas (líneas continuas) y datos (símbolos) del calentamiento del horno.

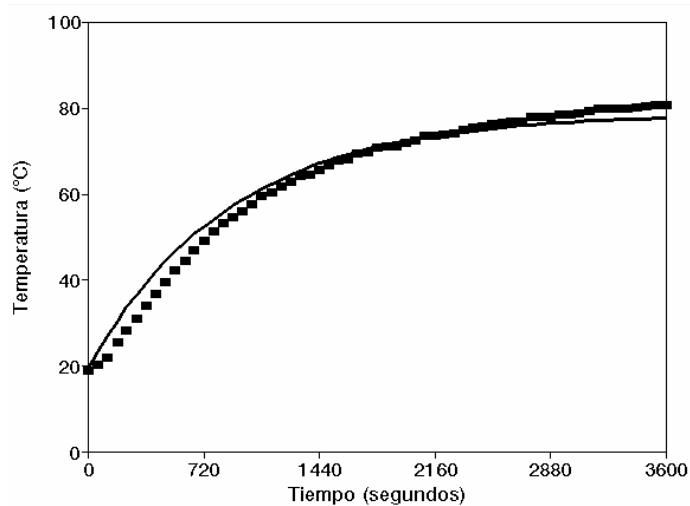


Figura 4: Calentamiento del aire del horno y su simulación.

## CONCLUSIONES

Las hipótesis realizadas para simplificar el modelo permitieron la resolución satisfactoria del mismo, así como la obtención de algunos de los parámetros térmicos del horno solar.

Se espera aplicar el modelo a escala de campo para poder verificar el mismo bajo radiación solar.

La simulación podrá permitir realizar comparaciones entre hornos solares con distintos materiales como placa colectora, cuyo parámetro  $\sigma c$  se introdujo en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª Edición, pp. 288-289. Wiley-Interscience, New York.
- Incropera F. P. y DeWitt D. P. (1990) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3ª. Edición, pp. 22-29. John Wiley & Sons. New York.
- Passamai V. (1998). Experiencias de laboratorio y de campo con un horno solar. Presentado en la Revista de ASADES, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*