

Artículo Original

Evaluación térmica de hornos solares tipo caja en la ciudad de Barranquilla¹

Luis Enrique Mealla Sánchez²

Artículo recibido: 25 de mayo de 2015 / Artículo aceptado: 30 de noviembre de 2015

RESUMEN

El comportamiento térmico de los hornos solares fue discutido a cabalidad a lo largo de los años por un sinnúmero de investigadores que dedicaron tiempo a su estudio. Existen diversos aportes al respecto. El presente trabajo pretende establecer una comparación entre los resultados obtenidos a partir de una metodología propuesta en la bibliografía consultada con los obtenidos con la simulación realizada con SIMUSOL, sobre todo cuando se comparan los coeficientes globales de pérdida medidos con los simulados y el comportamiento de los hornos en distintas condiciones de prueba.

Palabras clave: energía solar, SIMUSOL, evaluación térmica.

1 Cocción solar ¿una alternativa para comunidades emergentes de Barranquilla? Barranquilla 2008-2011 – UAC.

2 Msc (c) Física, Energías Renovables . Grupo de Investigación en Energías Alternativas (GEA). Correo electrónico: luis.mealla@uac.edu.co

Thermal evaluation of box type solar ovens in Barranquilla, Colombia

ABSTRACT

The thermal performance of solar ovens has been thoroughly discussed over the years by many researchers who took the time to study the subject. There are many contributions in this area. This paper aims to establish a comparison between the results obtained from a methodology proposed in the bibliography consulted and those obtained with the simulation carried out with SIMUSOL, especially when comparing the overall loss coefficients with the simulated ones and the ovens' performance under different test conditions.

Keywords: solar energy, SIMUSOL, thermal tests.

Avaliação térmica de fornos solares tipo caixa na cidade de Barranquilla

RESUMO

O comportamento térmico dos fornos solares foi discutido ao pé da letra ao longo dos anos por um inúmero de investigadores que dedicaram tempo ao seu estudo. Existem diversos aportes ao respeito. O presente trabalho pretende estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos a partir de uma metodologia proposta na bibliografia consultada com os obtidos com a simulação realizada com SIMUSOL, sobretudo quando se comparam os coeficientes globais de perda medidos com os simulados e o comportamento dos fornos em diferentes condições de prova.

Palavras chave: energia solar, SIMUSOL, avaliação térmica.

■ INTRODUCTION

Los hornos solares por su simplicidad en la construcción y por convertir directamente la radiación solar en potencia de cocción de alimentos son atractivos para su uso y estudio. Existe muchísima bibliografía referente al análisis térmico de artefactos que utilizan los mismos principios de funcionamiento. Existen varios métodos de evaluar este comportamiento, entre los que se destaca el propuesto por (Funk & Larson, 1998) y (Funk, 2000) quienes en este y en posteriores trabajos muestran una metodología de medición y evolución del comportamiento térmico de cocinas y en especial de hornos solares.

Posteriormente (De Castell, Pastrana, Collares, Vázquez y Esteves, 1999), propone un método que resulta cómodo cuando se va a evaluar hornos solares. Este método propone dos relaciones que agrupan parámetros de tipo constructivo y variables meteorológicas que predicen el comportamiento de los hornos. Si bien ese comportamiento está bien descrito por tales relaciones y las experiencias de campo se ajustan al modelo muy bien, cuando se intenta realizar la simulación con una herramienta tan sencilla como lo es SIMUSOL (Alia & Saravia, 2003), los resultados se apartan sensiblemente de lo esperado.

En este trabajo se comparan las medidas realizadas en campo con los resultados de simulación utilizando SIMUSOL, tanto en el calentamiento en vacío como el realizado con agua. Se comparan los parámetros correspondientes a los coeficientes globales de pérdida medidos según el modelo propuesto por De Castell et al. y los resultantes del

ajuste durante el calentamiento realizados con SIMUSOL. Además se realizan las medidas para el calentamiento con agua y se comparan estas curvas con las simuladas.

■ MEDIDAS DE CAMPO

Se construyeron cuatro hornos solares de carga superior combinando placas colectoras de chapa de hierro y chapa de aluminio pintadas de negro mate (Nandwani, 2013). También se combinaron en las cuatro dos pulgadas de aislante de lana de vidrio y en otras se utilizó una capa delgada de lana de vidrio y hojas de papel periódico compactado a fin de completar las dos pulgadas de aislación. Para la cobertura externa se eligió madera terciada y las cubiertas fueron fabricadas de un marco de madera con una o dos capas de vidrio de 0,4 mm de espesor. En caso de que la cubierta estuviese constituida por dos vidrios, la distancia entre ellos se estableció en 0,01 m para evitar pérdida convectiva. Se sellaron con silicona los puntos de contacto entre el vidrio y la madera para evitar la entrada de humedad.

Todas las cocinas presentan un área de apertura de 0,45 m x 0,54 m = 0,24 m², el área colectora es de chapa de hierro o aluminio pintadas de negro mate con 1,15 m² de área de placa. El peso de las cocinas fluctúa según la combinación de la placa colectora aislante, pudiendo tener entre 5 kg cuando se trata de aluminio con lana de vidrio y 10 kg cuando se trata de hierro con papel periódico compactado.

Evidentemente todas son transportables. Las dimensiones de las cajas se establecieron de tal manera que la inclinación de la cubierta

sea la latitud del lugar (aproximadamente 11°), de manera cada una de ellas tiene 0,62 m de frente, 0,51 m de fondo y 0,40 m de alto promedio. El volumen del interior de las cocinas es $0,53 \text{ m} \times 0,33 \text{ m} \times 0,35 \text{ m} = 0,06 \text{ m}^3$. Por supuesto, se dispuso que las ollas o utensilios para la cocción fuesen removibles y que no estuviesen provistos junto con las cocinas. No se dispuso el calentamiento por otra fuente y para hacer la comparación no se dispone de superficies reflectantes. No hay acceso directo a las ollas, solo se puede realizar por la parte superior de las cocinas. Por la calidad del cerramiento de las cubiertas (realizado con goma de sellamiento de puertas de neveras, adherida al marco de madera y reforzada con clavos) y que la tensión de las gomas de cierre no es elevada, se previó una significativa seguridad intrínseca al sobrecalentamiento. Las cocinas fueron diseñadas solamente para preparar alimentos y no se tuvo en cuenta la posibilidad de almacenar agua caliente.

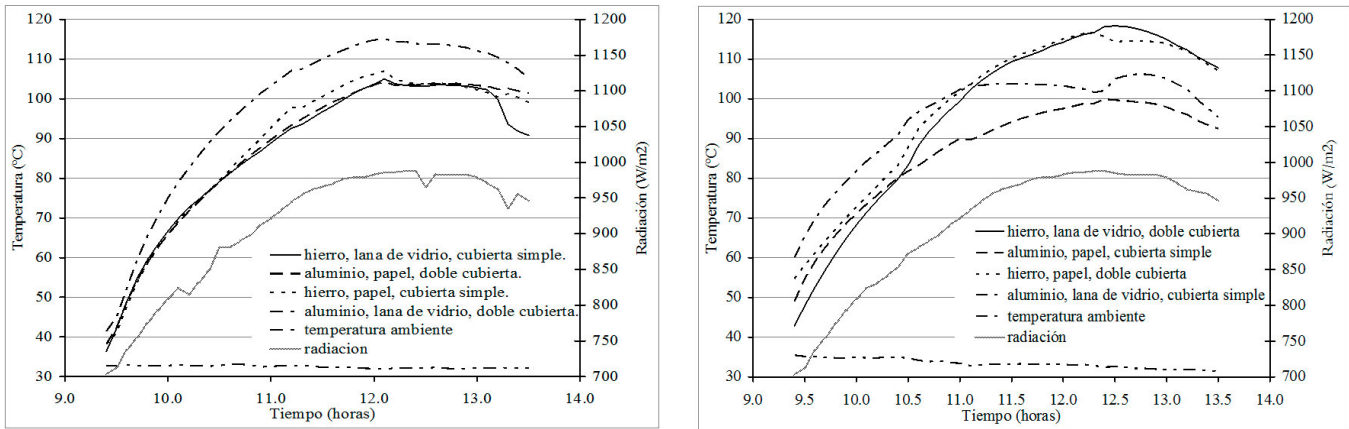
Los ensayos se realizaron en un patio cerrado que permitió el resguardo de las cocinas. La temperatura ambiente en todas las pruebas osciló entre los 28 y los 33 °C. Por estar cerca del ecuador, el mediodía solar no fluctúa demasiado respecto del mediodía oficial. Se realizaron dos tipos de pruebas para medir el comportamiento térmico de las cuatro cocinas (Maella, Tilca & Passamai, 1999). Un primer grupo de pruebas tuvo como objetivo medir la relación entre la energía colectada a través de la cubierta y las pérdidas térmicas de tipo convectivo y radiativo. Estas pruebas se realizaron en vacío (sin ollas) y cada una de las cocinas se evaluó con simple y doble cubierta de vidrio sin reflectores.

Un segundo grupo de pruebas se realizó con agua, manteniendo la proporción de seis litros por metro cuadrado de área de apertura. Para todas las cocinas se trabajó con 1,43 litros de agua precalentada a 40 °C en ollas de aluminio pintadas de negro mate de 20 centímetros de diámetro y 25 centímetros de altura. Se intentó comparar la potencia utilizada en la cocción con las pérdidas al ambiente. Se midieron parámetros como el tiempo en que la olla alcanza los 80 °C y el tiempo en que retiene esa temperatura una vez que se deja la cocina sin operador.

En todos las pruebas se procedió a reorientar las cocinas cada quince minutos a fin de tener siempre radiación normal al plano de la cubierta, pero como el sitio se encuentra en una latitud próxima al ecuador, la necesidad de reorientar más aún cerca del medio día solar no fue tan evidente en el periodo en que se eligió. Para cada prueba individual se repitió en días sucesivos al menos dos intentos.

Con relación las medidas de calentamiento de placa sin ollas en el interior de la cocina, el objetivo fue medir la relación entre la eficiencia óptica de las cocinas y los coeficientes globales de pérdida. Se midió desde las 9 hasta las 13 horas la temperatura de placa en las cuatro cocinas, temperatura ambiente y radiación en el plano normal. Cada cocina se evaluó con cubierta de vidrio simple y doble. Los datos de temperatura de placa, ambiente y radiación se muestran en la figura 1.

Figura 1. Evolución de las respectivas temperaturas y la radiación en el tiempo

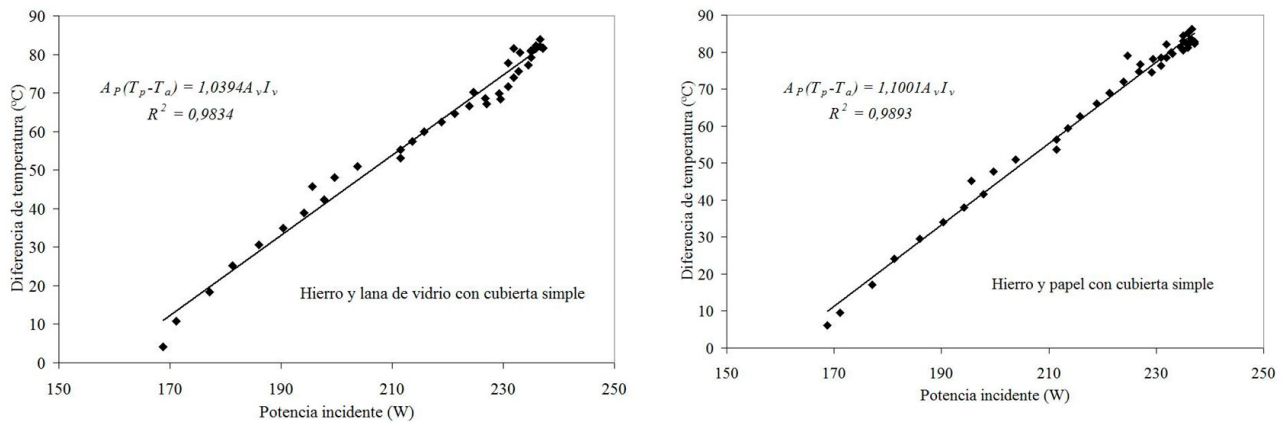


Claramente se observó la rápida respuesta de la temperatura de placa con los cambios en la radiación. Para comparar la relación entre la energía recibida por la placa y las pérdidas térmicas convectivas y radiativas se utiliza el modelo propuesto por De Castell et al. (1999) donde se propone que la masa de la placa no acumula energía. Se utiliza la siguiente relación:

$$A_p(T_p - T_a) = \left(\frac{\eta_0}{U_L}\right) A_v I_v \quad (1)$$

Se observó que en el modelo propuesto existe una relación lineal entre el salto de temperatura y la energía recibida por la cocina, por lo tanto se realizan ajustes lineales para encontrar el cociente entre la eficiencia óptica de la cocina y las pérdidas térmicas resultando esta como la pendiente de la ecuación 1. Algunos ejemplos de ajuste se pueden observar en la figura 2.

Figura 2. Ajuste lineal entre la diferencia de temperatura y la potencia recibida por la cocina

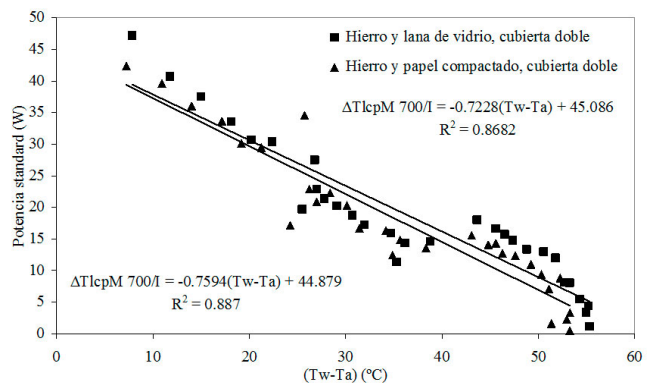
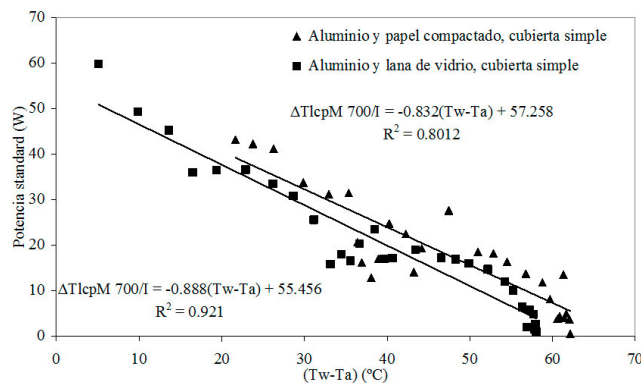


Después, se procedió a realizar ensayos con agua, para medir la potencia de cocción acumulada en el líquido de prueba y cómo esta se veía influenciada por las pérdidas hacia el ambiente a través de la cubierta y los laterales. De Castell et al. [1999] proponen un modelo donde se acumula energía únicamente en el líquido de prueba, y la única fuente de energía es la que llega a través de la cubierta y las pérdidas se reflejan en un coeficiente global. La siguiente ecuación muestra lo enunciado por el modelo.

$$(M_c)_w \frac{dT_w}{dt} = F'(\eta_0 I_v A_v - U_L A_p (T_p - T_a)) \quad (2)$$

El análisis propuesto por De Castell et al. [1999] sugiere comparar la potencia de cocción acumulada por el líquido de prueba pero estandarizada por la radiación solar estándar y por el cociente con la radiación observada durante la prueba. Para esto, se realizaron varios ensayos donde se procedió a precalentar las cocinas a las 9:00 horas y se colocaron 1,43 litros de agua a las 11:00 y se reorientaron hasta las 13:00 cada 15 minutos. Después se dejaron en la última posición y se midió la temperatura hasta las 17:00 aproximadamente. La figura 3 muestra dos de los distintos ajustes entre la potencia de cocción standard y la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente.

Figura 3. Ajuste lineal entre la potencia standard y la diferencia de temperatura del líquido de prueba

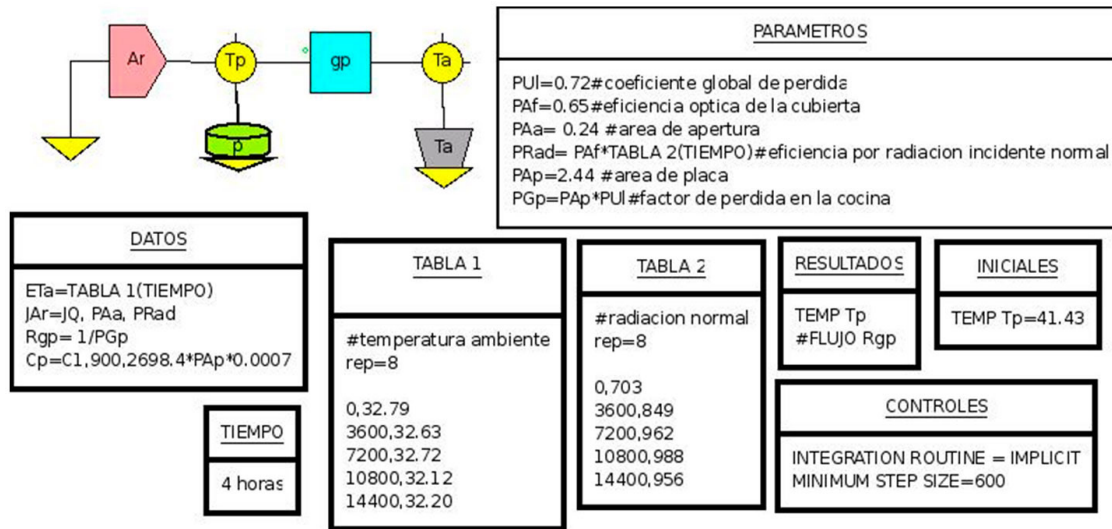


SIMULACIÓN

Se utilizó SIMUSOL [Alía y Saravia, 2003] para probar un circuito con un acumulador que tiene en cuenta la masa de la placa y la masa del aire encerrada, tal como lo muestra la figura 4. En esta se omitieron las

tablas completas de radiación y temperatura ambiente por su longitud. Las variables de entrada son la temperatura ambiente mediadas en la prueba de campo y la radiación normal incidente. El parámetro de ajuste es el coeficiente global de pérdida.

Figura 4. Esquema representativo del circuito térmico propuesto para la simulación



Para el calentamiento se obtuvieron ocho curvas que se contrastan con los datos de placa medidos en el campo, esto se observa en la figura 5

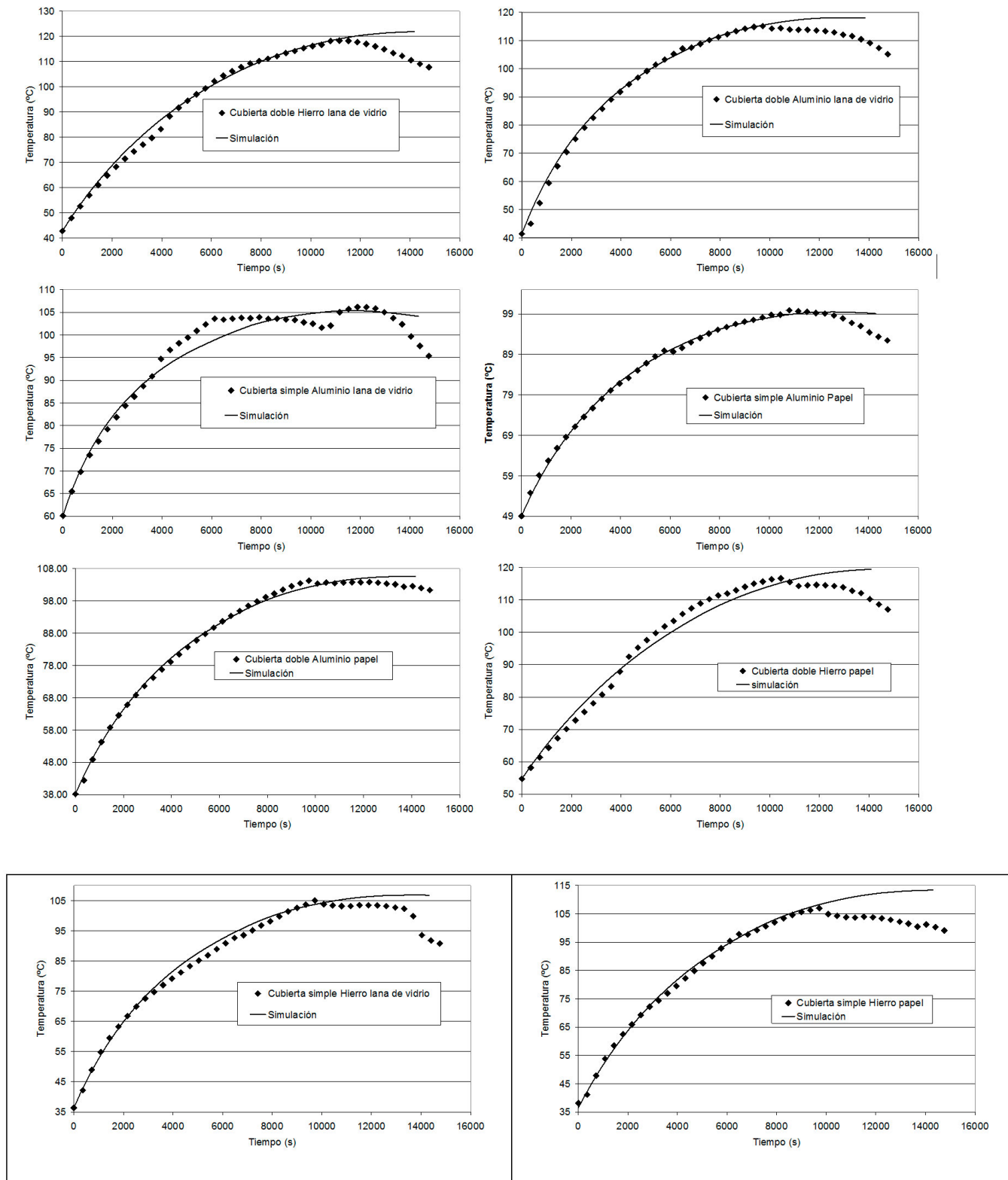
En contraste con la ecuación (2) donde no se supone acumulación, en esta simulación sí se toma en cuenta aunque sea pequeña, ya que la placa tiene una masa nada despreciable y el aire ocupa un volumen considerable dentro de las cocinas. Los valores de la eficiencia óptica se tomaron de Placco, Saravia & Cadena [s.f.], donde el valor para una sola cubierta se toma 0,8 y para doble cubierta 0,65. Se respetan las dimensiones de placa, el material del cual están hechas (densidad) y el calor específico de cada una de ellas. El parámetro de ajuste se toma del coeficiente global de pérdida. El tiempo tiene la misma duración que el de la toma de datos. La radiación incidente es tomada normal a la cubierta, se multiplica por el área de apertura y por la eficiencia óptica

de la cubierta, toda esa energía se divide en pérdidas al ambiente y en la acumulación en la placa y el aire dentro de la cocina.

Si bien no se realiza un exhaustivo análisis térmico de la cavidad y su intercambio con sus alrededores, se observa una muy buena aproximación de la simulación con los datos.

Utilizando los esquemas en SIMUSOL para las distintas disposiciones de placa, aislación y cubierta, se procedió a realizar la simulación utilizando el mismo circuito pero modificando el término de acumulación, recordando que se agregaba una masa de 1,4 kg de agua y, por consiguiente, la capacidad calorífica cambiaba en proporción al agua aportada. La figura 6 muestra las curvas resultantes de la simulación para cuatro disposiciones de cocinas de aluminio, en las que se observa una no muy buena concordancia entre ambas curvas.

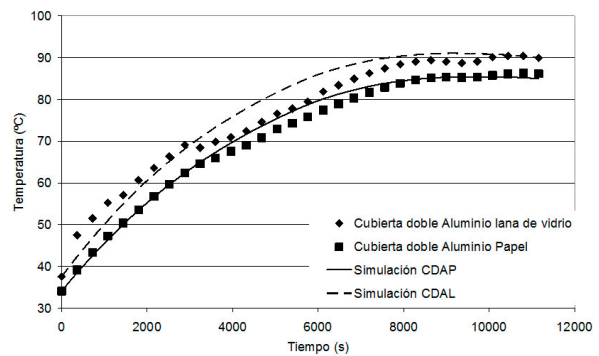
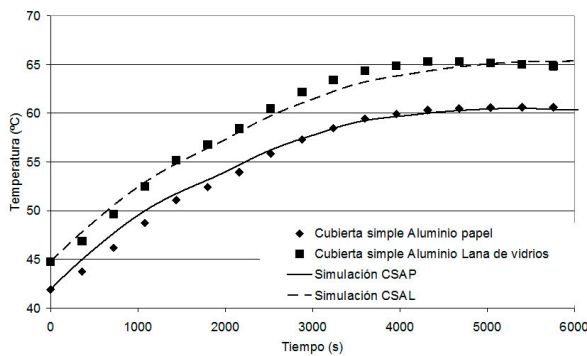
Figura 5. Temperaturas de placa real y simulada para distintas configuraciones de placa, aislación y cubierta transparente



Se observa que el comportamiento en cuanto al la tendencia es simular pero al parecer la masa es demasiada, por lo tanto la curvatura no es importante, como lo es en los datos reales de temperatura de agua. Para realizar esta simulación se supuso que ambas, placa y agua, estaban a la misma temperatura, pero

se observa que en los datos tomados en las pruebas de campo, existe una diferencia de tres grados entre el agua y la placa. Por otra parte, si se modifica el calor específico del conjunto se logra mejores curvaturas. Este tipo de comportamiento no era el esperado en la simulación.

Figura 6. Temperatura de agua y sus respectivas simulaciones para cuatro configuraciones con placa de aluminio



RESULTADOS

Como se señaló anteriormente, se realizaron las pruebas para que las cuatro cocinas se probaran con cubierta simple y doble, pudiendo observarse en la tabla 1 los resultados de los ensayos realizados para calentamiento en vacío en donde se resalta los dos coeficientes globales de pérdida, los obtenidos mediante las pruebas de campo y la simulación.

Los datos se manejaron según lo sugerido por De Castell et al. (1999). Se observa el valor de esta potencia para cuando la diferencia de temperatura tiene un valor de 50 °C y el tiempo en minutos para alcanzar una diferencia de temperatura de 80 °C. La tabla 2 muestra en resumen todos los datos relevantes para este conjunto de pruebas.

Tabla 1. Resultados de los ajustes entre ganancia y pérdida en las distintas cocinas

Placa	Aislante	Cubierta	U_L medido (W/ °C)	U_L simulado (W/ °C)
Hierro	Lana de vidrio	simple	0,77	1,1
Aluminio	Papel compactado	doble	0,61	0,60
Hierro	Papel compactado	simple	0,73	0,9
Aluminio	Lana de vidrio	doble	0,56	0,72
Hierro	Lana de vidrio	doble	0,46	0,78
Aluminio	Papel compactado	simple	0,98	0,675
Hierro	Papel compactado	doble	0,58	0,73
Aluminio	Lana de vidrio	simple	1,12	1,03

Tabla 2. Resultados más representativos de las pruebas con agua

Placa	Aislante	Cubierta	Valor de la potencia standard cuando $\Delta T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ (W)	Tiempo en el que se mantiene los $80\text{ }^\circ\text{C}$ en el líquido de prueba (min.)
Hierro	Lana de vidrio	simple	6,85	96
Aluminio	Papel compactado	doble	19,96	132
Hierro	Papel compactado	simple	7,46	76
Aluminio	Lana de vidrio	doble	19,43	156
Hierro	Lana de vidrio	doble	13,00	110
Aluminio	Papel compactado	simple	18,57	186
Hierro	Papel compactado	doble	9,40	128
Aluminio	Lana de vidrio	simple	16,05	144

CONCLUSIONES

Después de analizar la información disponible se puede concluir lo siguiente:

De los resultados de calentamiento simple, es decir la cocina sin olla, se concluye, analizando los valores del coeficiente de pérdida tanto el medido como el simulado, que ambos no difieren demasiado, es decir se encuentran dentro del mismo orden.

En la tabla 1 es evidente que la cocina de chapa de hierro con cubierta doble presentará menos pérdidas que el resto, esta es la cocina con la cual se deben de comparar el resto.

El resto de las cocinas, presenta pérdidas más pequeñas comparadas con la ganancia. En especial las cocinas de chapa de hierro con cubierta simple que presentan un coeficiente de valor comparable con las cocinas de chapa de aluminio con cubierta doble, y que comparativamente los precios de las chapas de metal presentan en el mercado el mismo valor, el rendimiento de las cocinas con chapa de hierro y una sola cubierta presenta un rendimiento térmico parecido.

Si analizamos los resultados de carga, se observa que: si analizamos el valor de la potencia estándar para un valor de diferencia de temperatura igual a $50\text{ }^\circ\text{C}$, se observa que las de mayor valor son las cocinas de aluminio con cubierta doble, seguidas por las de aluminio con cubierta simple. Un poco más abajo siguen las de hierro con cubierta doble y muy por abajo están las de hierro con cubierta simple.

Si analizamos el tiempo en que las cocinas con carga mantienen la temperatura por encima de la temperatura de cocción, encontramos que las cocinas de aluminio con cubierta simple mantienen la temperatura de cocción por el lapso de entre 150 a 180 minutos. En segundo lugar, las cocinas de aluminio con cubierta doble mantienen la temperatura de cocción entre 120 y 150 minutos. Las cocinas de hierro con doble cubierta mantiene alrededor de dos horas la temperatura de cocción por encima del límite. Al final las cocinas de hierro con cubierta simple solo mantienen la temperatura por encima del límite por un lapso entre una hora y una hora y media.

Se observa que en el calentamiento en vacío el ajuste es muy bueno, pudiendo predecir los coeficientes de pérdida para

eficiencias ópticas fijas, esta es una variable que se debería tener en cuenta cuando la temperatura de cubierta se mida. En general los resultados en calentamiento al vacío son satisfactorios, como los resultados cuando se simula el comportamiento con carga de agua. Se espera en un futuro realizar nuevas medidas y realizar balances parecidos a los realizados por Habeebullah, Khalifa & Olwi, 1995; El-Sebani & Aboulenein, 1997 y Mullick, Kandpal & Kumar, 1997, para tener una acabada aproximación de los resultados de las pruebas de campo y la simulación computacional del sistema.

▣ NOMENCLATURA

F' = factor de eficiencia de intercambio de calor.

η_0 = eficiencia óptica.

$[Mc]_w$ = capacidad calorífica de todo el sistema (agua, ollas e interior de la cocina).

U_L = coeficiente global de pérdidas.

A_p = área de la placa absorbente.

A_v = área de la superficie transparente.

I_v = r radiación solar sobre la superficie transparente.

T_p = temperatura de la placa.

T_a = temperatura ambiente.

▣ REFERENCIAS

Alía, D. y Saravia, L. (2003) Simulación de distintos sistemas físicos con SIMUSOL. *Averma*, 7(2) 14-52.

De Castell, M. E.; Finck Pastrana, A.; Collares Pereira, M.; Vázquez, L. y Esteves, A. (1999). Propuesta de procedimiento para la evaluación del comportamiento térmico de

cocinas y hornos solares. *Revista Averma* 3(2), 133-135.

El-Sebah, A. A. & Aboul-Enein, S. (1997). A box-type solar cooker with one-step outer reflector. *Energy*, 22, (5), 515-524.

Funk, P. A. (2000). Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Solar Energy*, 68 (1), 1-7.

Funk, P. A. y Larson, D. L. (1998). Parametric model of a cooker performance. *Solar Energy*, 62 (1), 63-68.

Habeebullah, M. B.; Khalifa, A. M. y Olwi, I. (1995). The oven receiver: an approach toward the revival of concentrating solar cooker. *Solar Energy*, 54 (4), 227-237.

Mealla Sánchez, L.; Tilca, F. y Passamai, V. (1999). Evaluación de dos cocinas tipo caja con la propuesta estándar de la Red Iberoamericana de cocción solar de Alimentos (RICSA). *Revista Averma* 3(2), 57-60.

Mullick, S. C.; Kandpla, T. C. y Subodh, K. (1997). Top heat-loss factor of double-glazed box-type solar cooker from Indoor experiments. *Energy*, 22, (6), 559-565.

Nandwani, Shyam S. (2006). Experiencia personal de 25 años con la transferencia tecnológica de cocinas y secadores solares en Costa Rica. *Revista Averma* 10, (2,) 25-30.

Placco, C.; Saravia, L. y Cadena, C. (s.f.). Colectores solares para agua caliente. Recuperado de: http://www.inti.gov.ar/e-renova/pdf/colectores_solares_aguacaliente.pdf