



FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Sistemas solares para la preparación de alimentos en Zonas Áridas: Estudio experimental de comportamientos térmicos

Buigues Nollens A. F.^{1,2}, Rojos E. O.², Fariello M.³

*Instituto de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador Gral. San Martín 1109 oeste San Juan – Argentina
Tel/Fax: +54-2644210277 - E-mail: abuigues@unsj.edu.ar*

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo, el aprovechamiento en la arquitectura regional, del concentrador solar parabólico lineal y el horno solar inclinado tipo caja, para su uso en la preparación y cocción de alimentos. La metodología de investigación considera, procesos de transferencia de calor y estudios de comportamiento térmico solar a nivel experimental. Los resultados obtenidos demuestran adecuadas figuras de mérito y convenientes tiempos de cocción, facilitando su utilización según necesidades, en viviendas y escuelas rurales. Las conclusiones alcanzadas sobre los aspectos socioeconómicos, técnicos y ambientales vinculados a los sistemas solares analizados y de acuerdo a los resultados experimentales comparados, permiten afirmar que sus usos en forma independiente o combinada contribuyen a incrementar prestaciones domésticas, de acuerdo a las costumbres tradicionales de pobladores de zonas alejadas y aisladas, evitan a diario utilizar leña para la preparación de sus alimentos, preservando trabas de parrales, árboles y arbustos necesarios para el ambiente árido.

Palabras Claves: alimentos, cpl, horno caja, cocción solar, aridez.

¹ Investigador Adjunto del CONICET.

² Investigador del Instituto de Mecánica Aplicada (IMA) – FI – UNSJ.

³ Ingeniero Electrónico y Ex Auxiliar Docente dedicación en investigación en el IMA – FI – UNSJ.

1. INTRODUCCIÓN

En zonas alejadas y aisladas del Árido San Juan el gas escasea y falta, o resulta muy onerosa su obtención, y por lo tanto familias con prole en hogares conformados por cónyuges hasta nietos, para la preparación y cocción de sus alimentos, utilizan como alternativa de combustible, la leña del lugar, llegando en numerosos casos a depredar a este recurso, eliminando de especies forestales del lugar, incluyendo la extracción de trabas de parrales. Así las emanaciones de humo y gases que producen cocinas fogones u hogares en interiores o en hornos de barro en exteriores, provoca severos problemas de salud que impactan directamente en la vida de las familias. Con estas necesidades, la calidad de vida y la salud de los pobladores de estas regiones se ve afectada, al tener que convivir permanentemente con la contaminación ambiental de las viviendas o refugios.

El uso de la energía solar, constituye una excelente alternativa de solución para evitar los problemas mencionados y su utilización, se encuentra vinculada al desarrollo de la preparación y cocción de alimentos, para tal fin se estudia el comportamiento térmico de un Concentrador Parabólico Lineal (CPL) y un Horno Solar tipo caja (HS), [1] Figura1.



Figura 1 Características físicas generales del conjunto en estudio

2. CONCENTRADOR PARABÓLICO LINEAL CPL

2.1 Proceso de Transferencia de calor

La energía del sol llega a la superficie de la tierra en forma radiante. Al ponerse en contacto con una superficie puede ser absorbida, reflejada ó transmitida. El objetivo principal es capturar la mayor cantidad de energía radiante con buena eficiencia.

Se ha elegido como proceso de captación de la energía solar la concentración de la misma a través de un concentrador parabólico lineal (CPL). Se elige este sistema teniendo en cuenta la velocidad de transferencia de calor y que el proceso puede ser utilizado para calentar flujos de fluidos a través del absorbedor, para que no sea reflejada esta energía la superficie del absorbedor, está pintada de color negro mate, Figura 1. El material del mismo es de cobre, el cual tiene una gran capacidad de

transferencia de calor por conducción. El fluido dentro del absorbedor se mueve con una velocidad baja, incluso en algunos casos el movimiento del mismo se produce por termosifón, por lo tanto el proceso de transferencia de calor por convección es bajo. Teniendo en cuenta lo mencionado en el último párrafo se puede decir que la transferencia de calor desde el absorbedor al fluido, es por conducción y convección.

La energía solar concentrada llega al absorbedor, donde se alcanza una temperatura de algunos centenares de grados, lo cual permite obtener un importante gradiente de temperatura, ya que la temperatura del fluido debe alcanzar solamente temperaturas inferiores a la de ebullición del agua. Este gradiente importante de temperaturas es uno de los factores más importantes que permite acelerar el proceso de transferencia de calor.

Teniendo en cuenta las cantidades de fluido y las temperaturas que deben alcanzar, además de las pérdidas que puede tener el sistema se ha determinado el área de energía radiante que será capturada.

También se tuvo en cuenta la cantidad mínima (por los costos) de superficie espejada del colector lineal por lo cual el colector deberá ser de poca curvatura y una distancia focal grande.

2.2 Desarrollo Teórico

La transferencia de calor, cualquiera de sus formas, depende entre otras variables de la diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y la fría.

Teniendo en cuenta lo mencionado se puede decir que en la medida que aumenta la temperatura aumenta la transferencia de calor. Los colectores concentradores de la radiación solar tienen la particularidad que en el punto de concentración alcanzan temperaturas elevadas, por lo cual pueden transmitir el calor con cierta rapidez.

El concentrador lineal alcanza una temperatura en el absorbedor de aproximadamente 200 °C y teniendo en cuenta que la máxima temperatura que se necesita para la cocción de alimentos es de 100 °C [2], el gradiente de temperaturas que produce la transferencia de calor es de 100 °C.

Para calcular la transferencia de calor que se produce en el absorbedor, Figura 2, se debe hacer el siguiente balance de energía:

Calor cedido por conducción = Calor cedido por convección = Calor que gana el agua.

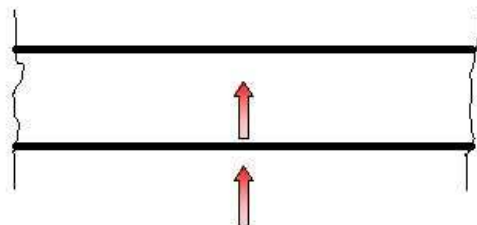


Figura 2 Esquema de la transferencia de calor a través del absorbedor

Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera Ecuación (1), en un diferencial de superficie:

$$mc_p \frac{dT_a}{dt} = kdA \frac{(T_e - T_i)}{e} = hdA (T_i - T_a) \quad (1)$$

Donde:

m = masa de agua.

cp = calor específico del agua

Ta = temperatura del agua

t = tiempo

k = coeficiente de conducción del material de la pared del absorbedor

Te = temperatura exterior de la pared del absorbedor

Ti = temperatura interior de la pared del absorbedor

e = espesor de la pared del caño

h = coeficiente de convección

De este balance térmico así expresado, se puede determinar el coeficiente de transferencia de calor global. Este coeficiente de transferencia de calor permite “ver” la rapidez con que se produce esta, cuando en el interior del absorbedor se realiza un proceso de convección natural [3], Ecuación (2).

$$\ln \frac{(t_e - t_2)}{(t_e - t_1)} = \frac{UA}{mc_p} \ln(t_2 - t_1) \quad (2)$$



Figura 3 Vista del CPL y el absorbedor con aislación térmica durante el ensayo experimental

3. HORNO SOLAR TIPO CAJA

3.1 Comportamiento Térmico

3.1.1. Estudio de las variables que intervienen en los procesos de transferencia de calor

La ecuación que gobierna la transferencia de calor en el HS [4], Ecuación (3), es:

$$S - (U_t \cdot A_t + U_b \cdot A_b) \cdot (T_p - T_a) = [\rho_l \cdot V_l \cdot C_{p_l} + m_r \cdot C_{p_r}] \frac{dT}{d\tau} \quad (3)$$

Donde:

S = Radiación incidente absorbida por el recipiente [W]

U_t = Coeficiente de transferencia de calor desde la superficie del recipiente al exterior por la cubierta vidriada [W/m²°C]

U_b = Coeficiente de transferencia de calor desde la superficie del recipiente por la pared opaca [W/m²°C]

A_t = superficies de cubierta vidriada [m²]

A_b = superficies de pared opaca [m²]

T_p = temperatura de la superficie del recipiente que contiene el líquido que consideramos que es la misma del líquido [°C]

T_a = temperatura del aire [°C]

ρ_l = densidad del líquido utilizado [Kg/m³]

V_l = volumen del líquido [m³]

C_{p_l} = calor específico del líquido [J/Kg°C]

m_r = masa del recipiente utilizado [Kg/m³]

C_{p_r} = calor específico del material del recipiente [J/Kg°C]

dT/dτ = variación incremental de la temperatura del conjunto líquido + recipiente respecto del tiempo [C/s]

3.1.2. Análisis del sistema de colección y placa absorbidora. Descripción analítica del comportamiento térmico.

Despreciando la inclinación de la cubierta transparente respecto de la horizontal, un horno solar (HS) de tipo caja puede considerarse como un colector solar plano que opera en condiciones no estacionarias [5]. Su comportamiento térmico detallado se puede resumir así:

- La densidad de la radiación solar incidente en la cubierta transparente, por unidad de superficie. Si esta es un doble vidrio hermético (DVH), no es completamente transparente por lo tanto la radiación que lo atraviesa e incide en el absorbedor es una fracción. Por ejemplo el cristal refleja el 7,5% de la radiación incidente.

- La temperatura inicial de todo el sistema (igual a la del ambiente) y, a medida que recibe radiación, la placa pintada de negro (simil "cuerpo negro") absorberá la fracción de la radiación solar aumentando con el transcurso del tiempo su temperatura hasta los 120 °C. Esto lo hará por convección libre de la placa al aire del HS y por convección del calor desde el aire a la cara interna de la cubierta transparente.

- También radiará, en un rango de longitudes de onda distinto al correspondiente al sol. Si el sol radia entre 0,25 y 2,5 micras, la superficie absorbente emitirá entre 4 y 70 micras, es decir en el infrarrojo. La

radiación emitida por el absorbedor intenta salir del colector y para ello incide sobre el lado interno de la cubierta de DVH. Mientras que el DVH es transparente para la radiación solar (longitudes de ondas cortas), es opaco para la radiación infrarroja.

- Por su parte, la cubierta transparente de DVH, adquiere en la cara interna una temperatura $T(i)$, mayor que la temperatura de la cara externa $T(e)$ debido a que al absorber esta radiación, existe un flujo de calor por conducción a través de la cubierta [6], produciendo una pérdida global de calor desde la cubierta hacia el aire ambiente. Su temperatura dependerá de la temperatura de la placa absorbente. Se comporta como un cuerpo negro ocurriendo para el infrarrojo y toda su superficie radiará por sus dos caras.

- El HS, presenta una doble envolvente con aislación térmica entre medio, el cual permite mantener el calor acumulado e impide perder el calor hacia el espacio de cocina en horas en que no se encuentra presente el sol.

En la construcción del horno solar tipo de caja con cubierta inclinada, se han proyectado componentes fijos y móviles. Entre los componentes fijos, se encuentra la superficie colectora transparente de 0.38 m^2 , la cual tiene una proyección horizontal de $0,337 \text{ m}^2$, presenta una superficie de placa absorbente de 0.334 m^2 y una caja constituida por paredes de chapa galvanizada, con 3" de lana de vidrio entremedio, como aislante térmico.

La propuesta de diseño creada, también considera componentes móviles innovadores, tal como la tapa posterior vertical, unida a la placa negra horizontal a modo de bandeja. Esta unidad, que funciona como una caja corrediza, removible en un 100% mediante correderas telescópicas a rulemanes laterales, contribuye a un fácil mantenimiento, introducción y extracción de utensilios y alimentos. Por otro lado, el diseño pivotante en bandas, del área reflectora, de 0.538 m^2 , permite el control en forma visual desde atrás del HS, evitando dar sombras sobre la superficie de captación solar, así como también reflexiones y deslumbramientos lumínicos innecesarios al operario. Toda esta superficie espejada se gira en su conjunto, como una hoja única, cubriendo el vidrio y se transforma en una tapa aislante del ambiente. Así, el conjunto de componentes descriptos, fue proyectado bajo un punto de vista ergonómico y duradero, para realizar el seguimiento solar, sobre una mesa de reorientación [7 y 8], Figura 6.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Primera Figura Mérito - F1 y Segunda Figura Mérito - F2

El comportamiento térmico del HS, puede ser representado por dos figuras de mérito, los resultados de estas, permiten la ejecución de comparaciones entre diferentes tipos de hornos. Así, las mencionadas figuras de mérito, que son obtenidas a través de la realización de ensayos experimentales, permitirán mejorar el diseño del HS y brindar una mayor utilidad.

La primera figura de mérito, F1 [9], tiene en cuenta la relación de eficiencia óptica del

horno y las pérdidas de calor al exterior desde la placa absorbidora de energía solar. Para un horno de cubierta inclinada y con los componentes propuestos, los valores registrados para obtener F1 Ecuación (4), son los que se observan en la Figura 5, obtenidos del interior del HS, y la temperatura ambiente, con una radiación global sobre plano horizontal del orden de los 800 W/m². Valores típicos de radiación solar incidente en la provincia de San Juan, van desde los 980 W/m² en verano, a unos 600 W/m² en invierno, ambos a medio día y con cielo totalmente despejado. Lógicamente se presentan situaciones intermedias para la misma hora en diferentes épocas del año y también para distintas horas del día, tal como la obtenida en este ensayo.

$$\eta_o A_v I_v = A_p U_L (T_p - T_a)$$

$$F1 = \eta_o / U_L = A_p (T_p - T_a) / A_v I_v \quad (4)$$

Así el valor de $F1 = 0.12^\circ\text{C m}^2 / \text{W}$

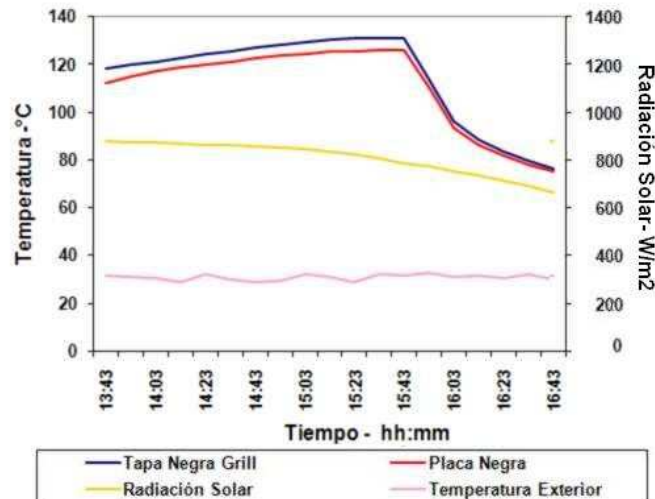


Figura 5 Mediciones obtenidas para obtener F1

Donde la nomenclatura utilizada es:

η_o = eficiencia óptica

U_L = coeficiente de pérdidas

A_p = área de placa absorbente

A_v = área de superficie transparente

I_v = radiación solar sobre superficie transparente

T_p = Temperatura de la placa

T_a = Temperatura ambiente

El segundo factor de mérito F2, tiene en cuenta la eficiencia de la transferencia de calor hacia el recipiente. El ensayo consiste en el calentamiento del agua de la olla, tomando nota del tiempo que demora en calentar hasta 80°, y luego el tiempo que demora en alcanzar la ebullición, [9 y 10]. En este ensayo se determina también el tiempo que puede mantenerse la temperatura por encima de los 80°C, sin la intervención del usuario.

- 1- El ensayo comenzó a las 10 hs.
- 2- Se carga en la olla, el agua requerida, la que es de 7 kg/m², resultando de acuerdo a la superficie proyectada horizontal 2,338 kg. El horno se orienta hacia el sol, colocando el reflector en la posición óptima para el mediodía solar, en coincidencia con la superficie proyectada horizontal.
- 3- Se reorienta el horno sobre la mesa de seguimiento solar, cada 15 minutos anotando la hora en que se realiza.
- 4- Alcanzada la temperatura de ebullición se giró el horno hacia una posición óptima y se deja sin intervenir en lo sucesivo. Se determina el tiempo máximo que mantiene el tiempo de ebullición.
- 5- Cuando la temperatura alcanza la ebullición, menos 3°C, se tapó el horno, mediante sus componentes móviles, Figura 6.



Figura 6 Situación experimental del HS luego de alcanzar el agua la temperatura de ebullición

Luego se continuaron los registros determinando:

- El tiempo para alcanzar la temp. de ebullición 96 °C, el que fue de 100 min.
- El tiempo en que se mantuvo la temperatura por encima de los 80 °C, fue de 3 h. 30 min.
- El tiempo en que se mantuvo la temperatura por encima de 96°, resulto ser de 1h. 20 min.
- El tiempo sin intervención del usuario fue 2h 40min y el tiempo que tardo en alcanzar la T amb. fue de 4h.

Considerando los valores relevados, Figura 7 [10], obtenemos F2 mediante Ecuación (5):

$$F2 = F' \eta_0 C_r = [F_1 (M_c)_w / A_v \zeta] \ln \{ [I_v - (A_p / A_v F_1) (T_{w1} - T_a)] / [I_v - (A_p / A_v F_1) (T_{w2} - T_a)] \} \quad (5)$$

Así el valor de F2= 0.246

Donde la nomenclatura utilizada es:

F' = Factor de eficiencia de intercambio de calor

η_0 = Eficiencia óptica

F_1 = Primer factor de mérito

$(M_c)_{w=}$ Capacidad calorífica del sistema (agua, olla e interior)

ζ = Intervalo de Tiempo entre T_{w1} y T_{w2}

I_v = Radiación solar sobre la superficie transparente

A_v = Área de la superficie transparente

A_p = Área de la placa absorbente

T_{w1} = Temperatura inicial del agua

T_{w2} = Temperatura final del agua

T_a = Temperatura ambiente

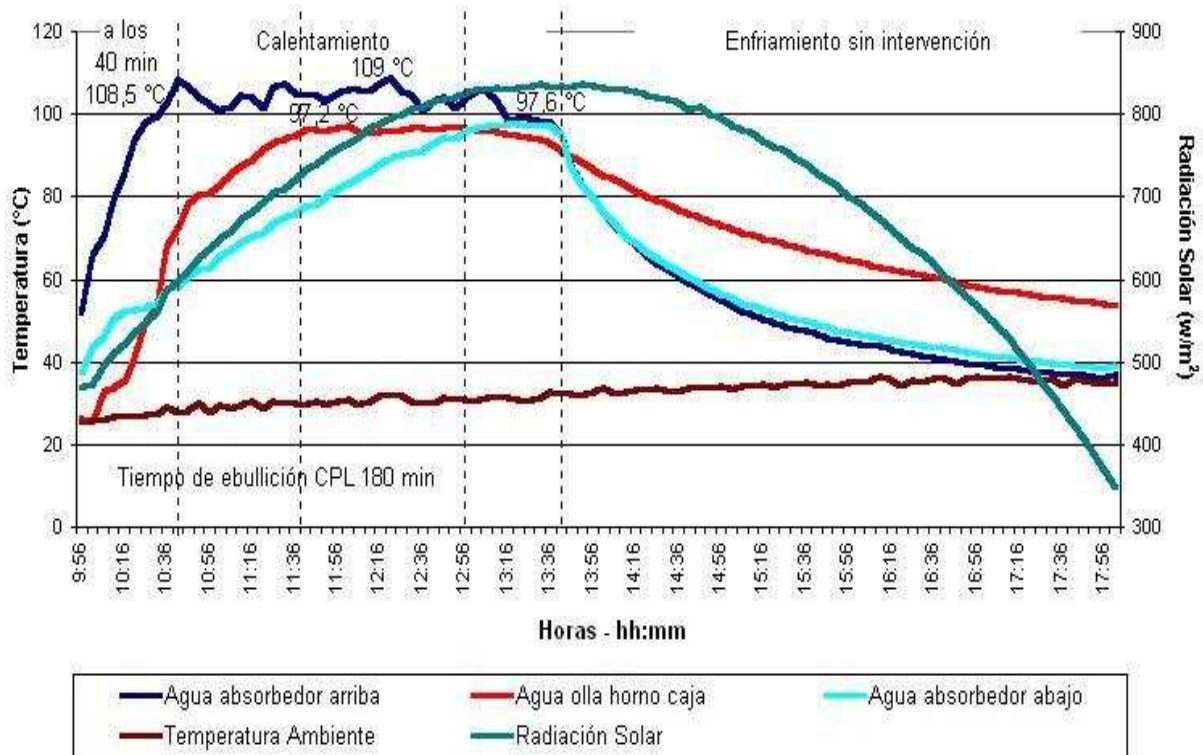


Figura 7 Mediciones obtenidas para obtener F2 del HS y del CPL en conjunto

5. DISCUSIÓN

5.1 Resultado experimental conjunto

Esta experiencia fué realizada a mediados del mes de marzo, la presencia del viento comenzó a las 10.30 hs. con ligeras brisas de aire y luego se fue incrementado hasta las 13.30 hs. hasta alcanzar mayor

permanencia, con ráfagas de viento moderadas mezcladas con brisas permanentes. El conjunto CPL con el absorbedor protegido por arriba, para evitar pérdidas de calor en forma convectiva, llegó a la temperatura de ebullición a los 30 min. y el HS (obteniendo adecuados resultados térmicos según figuras de mérito comparadas con ensayos similares a nivel regional según la época del año) [11], lo hizo a los 100 min. Luego realizando con el CPL un seguimiento solar permanente [12], se facilitó que el agua se mantuviera por encima de ese estado, todo el tiempo necesario [13, 14 y 15]. Alcanzó a los 40 min. 108,5 °C, y conservó durante 180 min. una temperatura por encima de 100°C y hasta que finalizara la etapa de calentamiento del HS. Posteriormente y debido a las condiciones impuestas en el ensayo experimental, comenzó la etapa de enfriamiento sin intervención, utilizando ambos sistemas tiempos similares.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo al comportamiento térmico experimental demostrado, estos dos sistemas, tanto el CPL como el HS inclinado según la latitud del lugar, presentan adecuadas figuras de mérito, comparándolas con ensayos similares a nivel regional según la época del año.

Es posible utilizarlos para fines domésticos en forma conjunta o complementaria, en viviendas y escuelas de zonas templada fría o templada cálida. Dado que la rapidez que brinda el CPL, puede ser aprovechada posteriormente tanto para disponer de agua caliente o hervida al servicio de la preparación y cocción de alimentos en el HS, lo cual permite ganar tiempo en esta última necesidad. Y también el CPL puede disponer con mayor rapidez que el HS, solo de agua caliente para meriendas o calentar alimentos ya hervidos.

Por otro lado el mismo HS, además de utilizarse para la preparación de alimentos que requieren de una cocción lenta (dulces, entre otras), luego de un funcionamiento solar, puede también mantenerse, con la tapa bajada, y la comida o alimentos en general se seguirán cocinando sin gastar energía o conservar la temperatura de los alimentos recientemente hervidos por vía solar.

Cabe destacar que a diferencia del horno de barro que al perder temperatura, requiere repetir la operación de calentamiento utilizando más leña; el HS al conservar la energía, puede seguir cocinando. Así el HS puede ser utilizado diariamente, sin necesitar ser grande como el tradicional horno de barro, en el cual se hornea para toda la semana y tampoco es necesario calentar su masa dado que toda la energía se encuentra dirigida a realizar directamente la cocción de los alimentos. Por lo tanto la cantidad de alimentos a hornear puede ser notablemente menor. Lo cual, también impide perder alimentos por descomposición, especialmente en verano, por la humedad que mantienen en su interior. Es decir se puede preparar solo la cantidad necesaria para consumo diario. Esta es otra manera de ahorrar energía.

En este sentido, el uso combinado o individual del CPL y el HS, se adapta a las costumbres tradicionales de pobladores de zonas alejadas y aisladas que a diario utilizan para la preparación de sus alimentos, preservando trabas de parrales, árboles y arbustos, tan necesarios en el ambiente árido.

7. REFERENCIAS

[1] Buigues Nollens A. y Rojos E. - Desarrollo y Construcción de Sistemas Alternativos de Cocción - Proceedings of the Second - World Conference on Solar Cookers – Use and Technology – Universidad

Nacional, Heredia, Costa Rica, 1994.

[2] Devadas R. - Nutritive Value of Foods Cooked in Solar Box Cooker – Department of Food Science and Nutrition, Avivashilingam, Deemed University, Coimbatore -641 043 – INDIA,1994.

[3] Mullick S.C. y Otros - Thermal test Procedure for a Paraboloid Concentrador Solar Cooker. Solar Energy Vol. 46, N°3,1991.

[4] Channiwala S. A. y Doshi N. - Heat Loss Coefficients for Box Type Solar Cookers. Solar Energy. Vol. 42, N°6 pp.195 - 201. Solar Cooker Test Procedure - Versión 2. European Committee for Solar Cooking Research ECSR, Lodève. Francia,1993.

[5] Incropera F. P. y De Witt D. P. - Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3ª Edición, pp.22-29 John Wiley & Sons New York, 1990.

[6] Passamai V. - Simulación del Comportamiento Térmico de una Cocina Solar - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES) – Vol.2 N°1,1998.

[7] Aalfs M. Principles of Solar Box Cooker Design – Solar Box Cooker Northwest -Seattle- USA.

[8] Passamai V. y Otros. - Cocinas Solares de Tipo Caja - INENCO, Facultad de Ciencias Exactas, U.N. de Salta Calle B. Aires 177 – 4400 - Salta, Argentina,1994.

[9] Mullick, S. C. y Otros -Thermal Test Procedure for Box Type Solar Cookers – Solar Energy – Vol. 39, N° 4 pp.353-360 – Pergamon Press, Printed in the USA,1987.

[10] Castell M. E de y Otros. - Propuestas de Procedimiento para la Evaluación del Comportamiento Térmico de Cocinas Solares y Hornos Solares - Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, Asunción, Paraguay, Departamento de Ingenierías - Universidad Iberoamericana, Lomas de Santa Fe, Méjico, Departamento de Energías Renováveis INETI, Lisboa, Portugal 4 Centro de Investigaciones de Energía Solar, Santiago de Cuba, Cuba. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV) – CRICYT. Energías Renovables y Medio Ambiente – ASADES, Tucumán - Argentina,1999.

[11] Esteves A. - Ensayo de Potencia para Medir el Comportamiento Térmico de Hornos Solares, su Validez en Función de la Época del Año - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.5 N°2. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES) – 2001.

[12] Buigues Nollens A., Rojos E., Fariello M. - Comportamiento Térmico Experimental de un Horno Solar Híbrido. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Pág.: 08.85 a 08.91. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente – ASADES, Mendoza - 2008.

[13] Jacquot, R. - Modern Digital Control Systems, 2ª edición. Editorial Marcel Dekker,1994.

[14] Pallas Areny, R. - Sensores y acondicionadores de señal. Editorial Marcombo,1994.

[15] Szklanny, S. y Behrends, C. - Sistemas digitales de control de procesos. 2ª edición. Editorial Control,1995.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo, desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de San Juan, por el apoyo económico recibido a través del proyecto de investigación trianual: Horno Solar Mixto para Escuelas Alejadas de Zonas Áridas - Resolución N° 034/08 – C.S. - Director D r. Arq. Arturo F. Buigues Nollens.