

COMPORTAMIENTO TÉRMICO EXPERIMENTAL DE UN HORNO SOLAR HÍBRIDO

A. Buigues Nollens^{1,2}, E. Rojos², M. Fariello³

Instituto de Mecánica Aplicada - Área de Energías Alternativas
Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador Gral. San Martín 1109 – O – C.P. 5400 – San Juan
Tel. 0264-4288797 – Fax 0264-4287370 e-mail: abuigues@unsj.edu.ar

RESUMEN: El objetivo del trabajo es la presentación de una posible solución a la limitación que presenta el horno solar tipo caja para días nublados o de noche, mediante el funcionamiento solar e híbrido del mismo.

Bajo estas condiciones, el sistema propuesto amplía las posibilidades de uso en las primeras horas de la mañana, para días nublados o cuando la radiación solar disminuye o se anula.

Para evaluar su comportamiento, se han realizado ensayos térmicos para determinar las figuras de mérito F1, F2 y Potencia de Cocción, según las normas de la Red Iberoamericana de Cocinas Solares (RICSA) y su análisis de comportamiento híbrido. Los resultados experimentales mostraron que este funcionamiento es conveniente.

Palabras Claves: horno solar híbrido, horno solar-eléctrico.

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos pobladores en zonas alejadas, tanto niños, jóvenes en etapa de desarrollo físico e intelectual como ancianos mal alimentados. Para tratar de resolver esta problemática, en viviendas suburbanas y alejadas de San Juan, utilizan en la preparación de sus alimentos e iluminación, gas envasado en garrafas y electricidad, provenientes del servicio eléctrico interconectado nacional. Pero existen largos períodos, que el gas escasea y falta, o resulta muy onerosa su obtención, y por lo tanto para la preparación de sus alimentos, utilizan como alternativa de combustible, la leña del lugar, llegando en numerosos casos, hasta depredar en forma creciente, el recurso natural de árboles y arbustos del entorno.

Dada la existencia de un alto nivel de radiación solar aprovechable todo el año, se propone: Contribuir a desarrollar la instalación y promoción de Sistemas Térmicos de Cocción y Preparación de Alimentos utilizando la Energía Solar, en forma complementaria con Programas de Gobierno, sobre Energías No Convencionales PROENCO I, Electrificación Rural PERMER, y Nuevo Plan para fabricación de paneles fotovoltaicos en San Juan, que considera la instalación de un parque de generación conectado a la red, e incluirá como productores, a los usuarios de las nuevas viviendas del Plan Federal II e IPV. Además, se busca limitar el creciente aumento de la desertificación en una zona árida como la sanjuanina, controlando el uso irracional de la energía convencional y preservar el ambiente.

En este trabajo se ha diseñado un sistema térmico solar-eléctrico, debido a que no siempre es posible combinar el uso en hornos tipo caja, con la cocción convencional a gas propano, leña o electricidad. En este sentido el horno solar híbrido (HSH) que se propone, contribuye a realizar un aporte a las evidentes necesidades ambientales actuales y urgencias funcionales o energéticas para pobladores carenciados de zonas áridas, al brindar respuestas a las limitaciones que presentan estos sistemas, (Shyam S. Nandwani S. S. Ph.D., 1993), (Buigues Nollens A. y Rojos E. 1994).

Para evaluar el comportamiento térmico, a través de su funcionamiento energético solar, se han desarrollado ensayos experimentales de un horno tipo caja con cubierta inclinada, determinando las figuras de mérito F1, F2 y Potencia de Cocción según RICSA, (Castell M. E de y Otros, 1999). Además se ha previsto, el aporte con funcionamiento energético híbrido, considerando la posibilidad de actuación simultánea junto con la solar, de una resistencia calefactora, utilizando un controlador térmico automático, solicitado como parte de un Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Electrónica - UNSJ.

Comportamiento térmico del HSH con energía solar

En la construcción del horno solar tipo de caja con cubierta inclinada, se han proyectado componentes fijos y móviles, fig.1. Entre los componentes fijos, se encuentra la superficie colectora transparente de 0.38 m^2 , la cual tiene una proyección horizontal de 0.337 m^2 , presenta una superficie de placa absorbidora 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, (Aalfs M. 1994 y Passamai V. y Otros. 1995), 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

¹ Investigador Adjunto CONICET.

² Docente Investigador Depto. Electromecánica IMA – FI – UNSJ.

³ Ex Alumno de Ingeniería Electrónica y Auxiliar Docente con dedicación en investigación IMA – FI – UNSJ.

mantenimiento, introducción y extracción de utensilios y alimentos. Por otro lado, el diseño pivotante en bandas, del área reflectora, de 0.538 m², permite el control en forma visual desde atrás del HSH, evitando dar sombras sobre la superficie de captación solar, así como reflexiones y deslumbramientos lumínicos innecesarios al operario. También 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, fig.2.



Figura 1: Vista de componentes fijos y móviles



Figura 2: Vista de conjunto con detalles físico – técnicos

El aprovechamiento de la energía solar, se realiza para la preparación de alimentos y se recurre a la energía eléctrica para calentar los alimentos una vez que se ha enfriado, en la noche o en las primeras horas del otro día.

También el aprovechamiento de la energía solar, se realiza para la preparación de alimentos, y en caso de no ser suficiente la energía que ésta le entrega, se recurre al funcionamiento híbrido para continuar con la cocción de los alimentos. El sistema de control, debe ser capaz de mantener la temperatura interna del horno a la deseada por el operario, pudiendo regular las dos fuentes de energía. Tradicional convencional

Obviamente, el mismo HSH luego de un funcionamiento solar, híbrido o eléctrico, puede también:

- Mantenerse, con la tapa bajada, y la comida seguirá cocinándose sin gastar energía.
- Conservar la temperatura de los alimentos (leche, etc.) recientemente hervidos vía solar.

En el presente trabajo, se pueden distinguir distintos modos de funcionamiento aplicados al HSH: con funcionamiento solar, y con funcionamiento híbrido con control automático de temperatura, ambos con seguimiento manual horario cuando está presente el sol. Aunque están íntimamente relacionadas en su funcionamiento, se han separado los ensayos para realizar los correspondientes análisis y de esa forma disminuir su complejidad.

Primera Figura Mérito - F1 y Segunda Figura Mérito - F2

El comportamiento térmico del HSH, 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 HSH y brindar una mayor utilidad.

La primera figura de mérito, F1 (Mullick, 1987), 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 [1], son los que se observan en la fig. 3, obtenidos del interior del HSH, 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.

$$\eta_0 A_v I_v = A_p UL (T_p - T_a)$$

$$F1 = \eta_0 / UL = A_p (T_p - T_a) / A_v I_v \quad [1]$$

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

Donde la nomenclatura utilizada es:

- η_0 = eficiencia óptica
- UL = 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

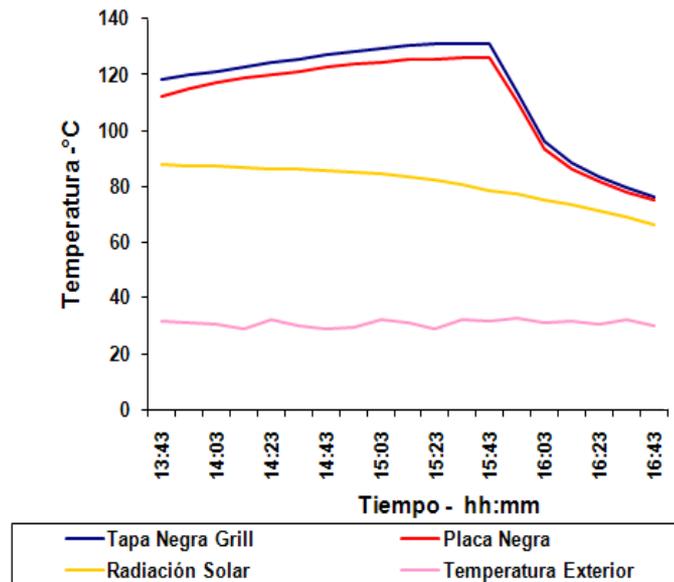


Figura 3: Mediciones obtenidas para obtener F1

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 (Mullick, 1991). En este ensayo se determina también el tiempo que puede mantenerse la temperatura por encima de los 80°C, sin la intervención del usuario, fig. 4.

- 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, fig. 1, 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, fig. 1, y se continuaron los registros determinando:
 - El tiempo para alcanzar la temp. de ebullición 96 °C es 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 1h. 20 min.
 - El tiempo sin intervención del usuario 2 h 40 min y el tiempo que tardo en alcanzar la T ambiente fue de 4h.

Considerando los valores relevados, fig.4, (Castell M. E de y Otros,1999), obtenemos F2 mediante [2]:

$$F2 = F' \eta_0 C_r = [F_1 (M_c)_w / A_v \zeta] \ln \{ I_v - [(A_p / A_v F_1)(T_{w1} - T_a)] / [I_v - (A_p / A_v F_1)(T_{w2} - T_a)] \} \quad [2]$$

Así el valor de $F2 = 0.246$

Donde la nomenclatura utilizada es:

- F' = Factor de eficiencia de intercambio de calor
- η_0 = Eficiencia óptica
- F₁ = Primer factor de mérito
- (M_c)_w = Capacidad calorífica del sistema (agua, olla e interior)
- ζ = Intervalo de Tiempo entre Tw₁ y Tw₂
- I_v = Radiación solar sobre la superficie transparente
- A_v = Area de la superficie transparente
- A_p = Area de la placa absorbente
- T_{w1} = Temperatura inicial del agua
- T_{w2} = Temperatura final del agua
- T_a = Temperatura ambiente

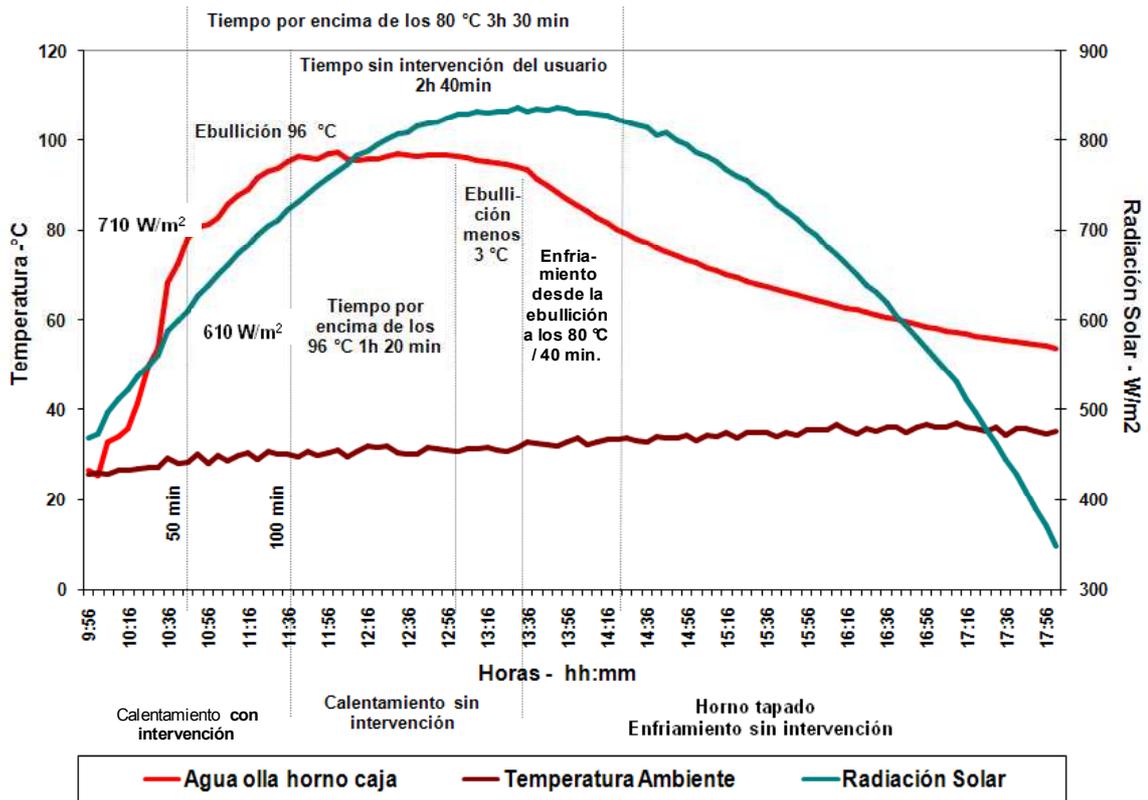


Figura 4: Valores registrados para obtener F2 en la olla

Cálculo de la Potencia de Cocción

La figura de mérito más representativa del rendimiento térmico, es la Potencia de Cocción Efectiva y para determinar. El valor de esta, siguiendo el Protocolo de Ensayos determinado por la RICSA, se ha desarrollado, (Esteves A, 2001):

- Cálculo de la potencia de cocción: Esta es considerada como la diferencia en la temperatura del agua cada intervalo de 5 minutos, multiplicada por la masa y el calor específico del agua contenida en la olla, en el intervalo de 40 °C a la temperatura de ebullición menos 5 °C, (91°C). Luego se dividió el producto por los 300 segundos contenidos en los 5 minutos, dando la potencia de cocción en W.

- Graficación y regresión: Se realizaron dos gráficos, la temperatura del agua en función del tiempo, fig. 4, y la potencia estándar de cocción, en función de la diferencia de temperatura, para cada intervalo de tiempo, fig.5.

- Estandarización de la potencia de cocción: La potencia de cocción para cada intervalo se corrigió, para una radiación solar estándar de 700 W/m², multiplicando la potencia observada por 700 w/m² y dividiendo por la radiación promedio registrada durante el correspondiente intervalo.

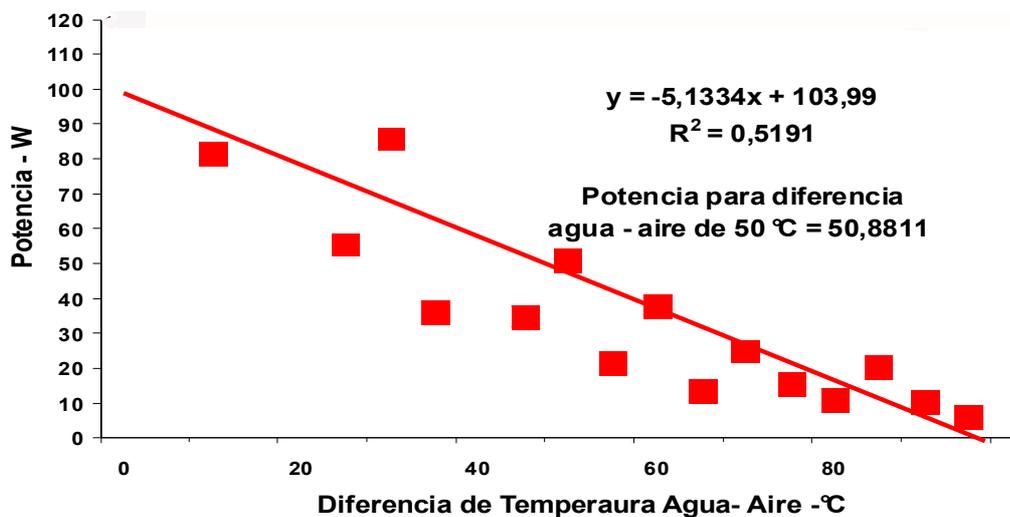


Fig. 5: Potencia efectiva de cocción solar

- Diferencia de temperatura: Se calculó la diferencia de temperatura entre la olla y el ambiente para cada intervalo
 Simple medida de rendimiento: Como una simple medida de rendimiento fue tomado el valor para la cocción estándar correspondiente a una diferencia de temperatura agua – aire de 50 °C.
 Luego del procedimiento descripto, resultó una Potencia de Cocción Efectiva de 50,88 W.

Comportamiento térmico del HSH en forma híbrida con control térmico

Los requerimientos de temperatura se fijaron en +/- 5° C, rango que un controlador con las características utilizadas, puede satisfacer fácilmente. En esta situación, el sistema fue diseñado para aprovechar la energía solar y la eléctrica a 12 volt. Para el control de temperatura aplicado a la cocción de alimentos, se escoge un control si/no, (Jacquot, R. 1994).

Para poder verificar el correcto desempeño del controlador de temperatura se utilizó un sistema de adquisición de datos marca Fluke 2000, (Pallas-Areny R. 1994).

La estrategia de control fue censar la temperatura en el interior del horno por intermedio de una termocupla, (Szklyny, S. y Behrends C. 1995), (Channiwala S. A. y Doshi N. 1993), (Passamai V. 1998), luego un microcontrolador es el encargado de procesarla, y de acuerdo al resultado, se acciona o no, una resistencia calefactora. Teniendo en cuenta que la tensión aplicada es de 220 V rms, y que la resistencia comercial adquirida (45 cm de longitud y 27cm de ancho), posee una resistencia de 22 Ω, resulta un valor de potencia constante de 2200 W.

Puesta a punto del control térmico, fig. 6: Para comprobar la efectividad del sistema, se realizaron pruebas por periodos prolongados de tiempo, para así evaluar el diseño de su comportamiento, obteniendo los siguientes resultados:

1ª Etapa: Conexión de la resistencia calefactora a lazo abierto, sin la intervención del sistema de control, alcanzando 260 °C en solo 7,5 minutos de funcionamiento.

2ª Etapa o de Transición para cambio de sistema: Puesta en funcionamiento el controlador automático de temperatura.

3ª Etapa: El controlador se encuentra funcionando, en un rango de trabajo desde 115 °C a 125 °C, con el sensor de temperatura en el piso del horno, alcanza la temperatura de control requerida en 120 °C al cabo de 6 minutos.

Funcionamiento híbrido, fig. 7: Ensayo en etapas, a lo largo de 2 horas y 40 minutos con el HSH en exposición solar.

1ª Etapa: Se pone en funcionamiento el sistema de control a distancia. Como podemos observar el aporte energético de la resistencia ubicado por debajo de la placa negra, es realizado solo en el comienzo por 4 min., ya que en este momento la temperatura se encuentra por debajo de la temperatura de control, colocada en 125 °C (rango de operación 120 °C–135 °C). Luego, debido al aporte energético obtenido a través de la radiación solar, la temperatura se mantiene por sobre la temperatura de control, alcanzando 140 °C, sin la intervención de la resistencia calefactora. Esto es así, debido a la aislación térmica del HSH. El sensor de temperatura por el cual se rige el controlador, esta ubicado en el piso del horno, es por eso que la temperatura que controla o mide, es justamente esa. El piso del horno, se encuentra a una mayor temperatura que el aire circulante.

2ª Etapa o de transición: Luego se abrió el horno y se introdujo una olla, con 4kg de agua en su interior, colocando el sensor de temperatura del aire interior del HSH, dentro de la olla y en contacto con el agua. Este cambio, provocó una pérdida de calor inmediata, aún al hacerlo con rapidez.

3ª Etapa: Con el HSH cerrado, se reanuda el control automático de temperatura. El sistema ya no utiliza exclusivamente la energía solar, la cual disminuye conforme pasan las horas, esto lleva a poner en funcionamiento la resistencia calefactora con mayor frecuencia. La frecuencia de operación, alcanza un promedio aprox. de 1,5 min. de funcionamiento cada 20 min.

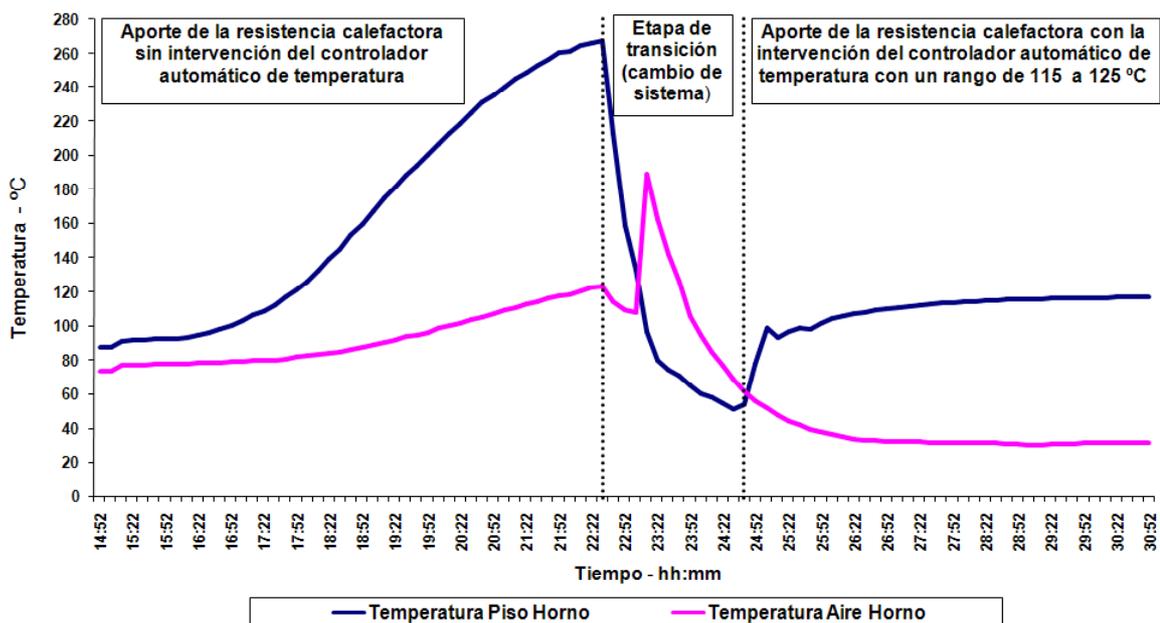


Figura 6: Ensayo de puesta a punto del controlador

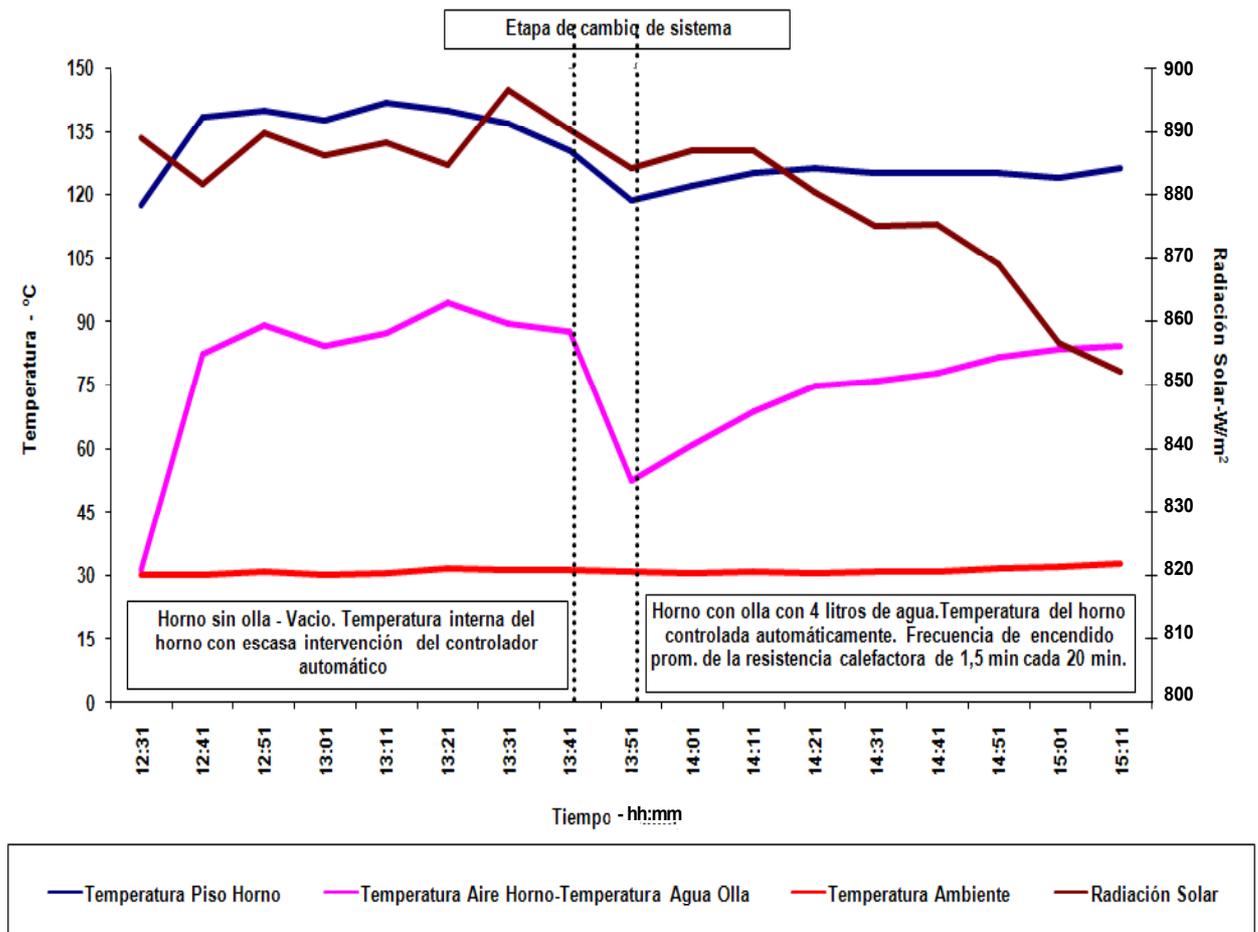


Figura 7: Ensayo con funcionamiento híbrido y control térmico

CONCLUSIONES

El horno inclinado según la latitud del lugar, con aprovechamiento de la radiación solar, presenta adecuadas figuras de mérito y potencia de cocción, comparándolas con ensayos similares a nivel regional según la época del año.

El horno solar con funcionamiento híbrido y control térmico, tuvo un correcto funcionamiento en estado estacionario, manteniendo la temperatura estable y a un valor constante, todo el tiempo que le fue requerido.

Las experiencias realizadas con el HSH, además de utilizar la base de ensayos prototipos considerados por la RICSA, aporta a su posible ampliación, considerando el tratamiento de variables que no son posibles de controlar y que pueden ser tenidas en cuenta.

Se ha demostrado que la efectividad del sistema de control, depende fuertemente de la capacidad que el sistema posee, por lo tanto con el aporte energético que es capaz de realizar la resistencia, genera un acortamiento del tiempo en que se encuentra funcionando, y de esa forma contribuye a un ahorro en el consumo eléctrico. De esta forma, el HSH, estará en todo momento, adquiriendo la mayor cantidad de energía solar disponible en la placa plana y produciendo a la vez, un Uso Racional de la Energía que emplea.

Así, con el funcionamiento energético del HSH y en general con las innovaciones introducidas, respecto del diseño original del horno solar tipo caja, se facilita el cumplimiento del requerimiento necesario, en el momento que se lo desee, sin tener que recurrir a otros sistemas de cocción. En realidad, a lo que se contribuye con esta propuesta, es a ampliar la utilidad del mismo horno, permitiendo eficazmente al cocinero, dejar en el control del propio sistema, el seguimiento de su comportamiento, y poder ocupar su tiempo en otra actividad.

También de esta manera, se considera el resguardo del usuario, porque incluye la posibilidad de operarlo a distancia, sin tener que salir y exponerse al clima exterior, especialmente cuando se alcanzan situaciones de desconfort térmico o producen bruscos cambios ambientales, originando condiciones poco favorables para su utilización.

Finalmente el HSH al presentar como característica principal un funcionamiento más versátil, considera la resolución de distintas limitaciones que las características del horno solar generalmente produce, especialmente durante la preparación de alimentos o comidas en las primeras horas de la mañana, en días seminublados y en horas cuando la radiación solar disminuye hasta anularse. Este asegura, la entrega del desayuno y preparación de alimentos o meriendas, con la calidad térmica necesaria, sin demoras y en forma permanente. Se contribuye así, a incrementar la confiabilidad, seguridad en la cocción y a una mayor utilidad final, destinada a la adopción del sistema, por parte de pobladores de zonas áridas alejadas.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a possible solution to the limitation of the box-type solar oven on cloudy days or by night by means of a solar hybrid operation.

Under these conditions, the system proposed enlarges the possibilities of use in the first hours of the morning on cloudy days or when the solar radiation decreases or is null.

To evaluate its behavior, thermal tests have been carried out to determine the merit figures F1, F2 and the Cooking Power, according to the regulations of the Red Iberoamericana de Cocinas Solares (RICSA) (Iberoamerican Network of Solar Cookers) and the hybrid behavior analysis. The experimental results showed this operation is convenient.

REFERENCIAS

- Aalfs M. (1994). Principles of Solar Box Cooker Design – Solar Box Cooker Northwest -Seattle- USA.
- Buigues Nollens A. y Rojos E. (1994). 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.
- Castell M. E de y Otros, (1999). Propuestas de Procedimiento para la Evaluación del comportamiento para la Evaluación del Comportamiento Térmico de Cocinas Solares - Instituto Nacional de Tecnología y Normalización hornos solares, 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
- Channiwala S. A. y Doshi N. (1993). 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,1993. Lodève. Francia
- Esteves A, (2001). 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– Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES) – Vol.5 N°2.
- Jacquot, R. (1994). Modern Digital Control Systems 2ª edición. Eitorial Marcel Dekker.
- Mullick, S. C. y Otros (1987) Thermal Test Procedure for Box -Type Solar Cookers – Solar Energy – Vol. 39, N° 4 pp353-360 – Pergamon Press, Printed in the USA.
- Nandwani S. (1993-2005). La Cocina/Horno Solar – Laboratorio de Energía Solar – Depto. de Física - Universidad Nacional Heredia, Costa Rica.
- Pallas-Areny, R. (1994). Sensores y acondicionadores de señal. Editorial Marcombo.
- Passamai V. y Otros. (1995). Cocinas Solares de Tipo Caja - Inenco, Facultad de Ciencias Exactas, U.N. de Salta Calle B. Aires 177 – 4400 - Salta, Argentina.
- Passamai V. (1998). 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.
- Szklanny, S. y Behrends, C. (1995). Sistemas digitales de control de procesos. 2ª edición. Editorial Control.