

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE COCINAS SOLARES TIPO CAJA CON Y SIN MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Jorge M. Morsetto – jmorsetto@ing.unrc.edu.ar

María I. Pontin – mpontin@ing.unrc.edu.ar

Alba I. Lema – alema@ing.unrc.edu.ar

Héctor F. Romero – fromero@ing.unrc.edu.ar

Universidad Nacional de Río Cuarto – Facultad de Ingeniería
Ruta Nacional 36 Km. 601– (5800) Río Cuarto – Córdoba – Argentina
Tel. +54 (358) 4676485 – Fax +54 (358) 4676246

Resumen. Este trabajo presenta una investigación realizada con el propósito de evaluar la incidencia que tiene la utilización de un dispositivo de almacenamiento térmico con material de cambio de fase (PCM) en el comportamiento de una cocina solar tipo caja. El estudio se efectúa mediante balances energéticos, exergéticos y cálculo de eficiencias. Se realizaron consideraciones termodinámicas a los fines de desarrollar metodologías racionales y significativas para la evaluación del intercambio energético que se produce entre cada una de las cocinas y sus alrededores, como así también para la obtención de la eficiencia de las mismas. Se obtuvieron datos experimentales de temperaturas en diferentes puntos interiores y exteriores de las cocinas y valores de radiación solar para diversos días. Los resultados obtenidos se presentan en gráficos que muestran los flujos energéticos y exergéticos para ambas cocinas, y los rendimientos instantáneos. Se obtienen valores para el desempeño energético y exergético diario que dan cuenta de una incidencia positiva en relación a la utilización de material de cambio de fase en el diseño de cocinas tipo caja.

Palabras clave: Cocina Solar con material de cambio de fase, Análisis exergético, Eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho bien conocido que el uso de cocinas solares no solo evita los combustibles fósiles, sino también mantiene el ambiente libre de contaminación sin deteriorar el valor nutricional de los alimentos, pero a pesar de estas buenas características, promover su utilización requiere además, conocer sobre rendimientos y eficiencias.

En la región central de Argentina, se dispone de un potencial energético solar, relativamente bueno, (Adaro et al., 2002) sin embargo, las tecnologías de energía solar no son ampliamente utilizadas, a excepción de los colectores solares de placa plana que se utilizan para la producción de agua caliente sanitaria.

En los últimos años varios autores han investigado metodologías para la evaluación y comparación de cocinas solares (Funk, 2000), (Mullick et al., 1987). Los métodos tradicionales de caracterización del desempeño de las cocinas solares se basan en análisis de energía (Binark, 1996), (El Sebaii, 2005). Este análisis, a su vez, se basa en la primera ley de la termodinámica y proporciona información sobre la cantidad de energía puesta en juego, pero no investiga sobre la calidad y la disponibilidad de la misma.

Por otro lado, la incorporación de materiales de cambio de fase en cocinas solares, está siendo estudiada desde hace más de una década. Buddhi y Sahoo (1997), diseñaron una cocina solar tipo caja con almacenamiento de calor latente y mostraron que es posible cocinar los alimentos, incluso en las horas de la tarde, con el calor latente almacenado. Lema et al. (2013), también mostraron que la presencia de material de cambio de fase (PCM) en una cocina solar, extiende el período de calentamiento, pero es necesario tener en cuenta que el PCM compite con el alimento al inicio del calentamiento, ya que utiliza también la energía térmica disponible.

Buddhi et al. (1997), analizaron también el rendimiento térmico de una cocina solar tipo caja, sobre la base de dos conocidos parámetros que sirven para evaluar el funcionamiento de cocinas solares, establecidos en protocolos estándares de prueba a nivel internacional, como lo son: la primera y segunda figura de mérito, con y sin carga respectivamente, encontrando que la segunda figura de mérito depende de la cantidad de agua cargada en la cocina solar y por lo tanto, el método que se utilice para determinar rendimiento debe especificar la cantidad de agua que se utiliza.

En muchos casos, las medidas de rendimiento basados en exergía pueden proporcionar una evaluación más realista de los sistemas termodinámicos en general (Dincer I., 2002), (Tyagi et al., 2012). El análisis de exergía, que se basa en la segunda ley de la termodinámica, no sólo considera la irreversibilidad en un sistema sino que también se relaciona directamente con la calidad de la energía disponible. En otras palabras, la eficiencia energética sólo puede dar cuenta de la cantidad de energía transferida y, a menudo puede ser altamente engañosa, en cambio, la eficiencia exergética habla

de la calidad de la energía. El análisis exergético, proporciona un medio alternativo de evaluación y comparación de los sistemas solares.

La exergía determina de forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso, y permite analizar rigurosamente el desperdicio de los mismos, estableciendo pautas para su ahorro y uso eficiente. Una de las principales aplicaciones es el análisis exergético a nivel de proceso y componente. Éste permite identificar, localizar y cuantificar las principales causas de irreversibilidades termodinámicas de un sistema o proceso, mediante el estudio de la destrucción y eficiencia exergética. Siendo la exergía la parte disponible de la energía utilizada para producir trabajo útil, esta representa una poderosa herramienta para determinar potenciales mejoras y optimización de procesos, y por consiguiente proporcionan una medida de cómo enfocar el aumento de la eficiencia de las cocinas solares.

La evaluación comparativa de sistemas solares, requiere una medida de la eficiencia, que sea racional, significativa y práctica. La eficiencia energética de una cocina solar es la relación entre la energía útil y la energía solar entregada a la cocina, por otro lado, la eficiencia exergética asociada con transferencias de energía hacia y desde la cocina solar, así como las cantidades de energía transferidas proporcionan una medida de cuánto se acerca a la eficiencia ideal.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del material de cambio de fase y evaluar su desempeño en una cocina solar desde el punto de vista de la aplicación de análisis energéticos y exergéticos. Se llevaron a cabo experiencias en dos cocinas solares similares, que difieren en la presencia en una de ellas de un material de cambio de fase, utilizando un modelo más realista para predecir rendimientos y definir las consideraciones termodinámicas necesarias para el desarrollo de metodologías racionales y significativas para la evaluación y comparación de la eficiencia de las cocinas solares. Este estudio requirió datos experimentales, los cuales se obtuvieron de numerosos ensayos para un volumen fijo de agua. Se presentan los resultados que muestran que la presencia de material de cambio de fase tiene el efecto positivo en el desempeño exergético de una cocina solar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Las cocinas solares ensayadas

Las cocinas solares estudiadas, son tipo caja con un reflector. Ambas, poseen iguales características geométricas, dimensiones y materiales utilizados, pero uno de ellas aloja en su interior el material de cambio de fase.

La estructura exterior de las cocinas, está realizada en madera liviana (fibrofácil de 5 mm de espesor), y pintadas exteriormente, en color rojo (con PCM) y en amarillo (sin PCM). Entre la superficie metálica interior y la estructura de madera exterior, se colocó a modo de aislante fibra de vidrio de 5 cm de espesor. La superficie transparente está inclinada 15° respecto a la horizontal y consiste en una cubierta de doble vidrio. Para aumentar la cantidad de radiación captada, el horno solar dispone de un reflector ubicado en su parte posterior. En la figura 1, se muestra una fotografía de las cocinas solares ensayadas.



Figura 1 – Cocinas solares ensayadas.

Las cocinas están conformadas interiormente por un recinto de chapa galvanizada de 0.5 mm de espesor. La superficie colectora inferior, es una chapa de hierro pintada de negro, levemente separada del fondo. El acceso al interior de la cocina se realiza a través de una puerta ubicada en la parte posterior o trasera del equipo.

Las cocinas se diferencian porque una de ellas contiene en su interior un recipiente con parafina, como material de cambio de fase (PCM). Debajo de la superficie absorbidora, se encuentra un depósito rectangular de 4 cm de altura,

cuya base ocupa el 90% del fondo. La capacidad máxima de almacenamiento de este depósito es de 1kg de parafina, cantidad utilizada en este trabajo.

Por último, en cada cocina se encuentra una olla negra, con 1 litro de agua pura en su interior. En la figura 2, se muestra un semi corte de la estructura de las cocinas ensayadas.

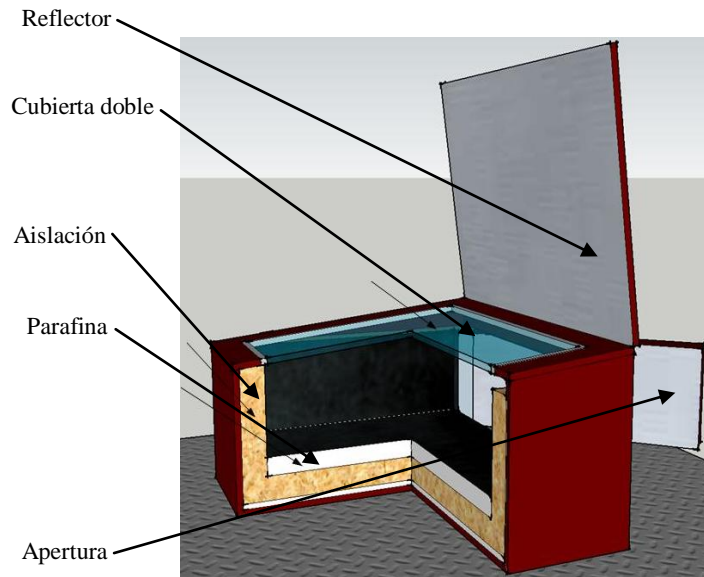


Figura 2 – Semi corte de la estructura de las cocinas solares ensayadas.

2.2 Material de cambio de fase (PCM)

La selección de un material de cambio de fase, depende principalmente de la naturaleza de la aplicación térmica, lo cual, de alguna manera, fija un rango para la temperatura de fusión del PCM, limitando de este modo los posibles materiales. Otra limitación la constituye la disponibilidad comercial del PCM.

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 60 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos (Mohammed et al., 2004).

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado y presentan la desventaja que su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es sólo la mitad del de las sales hidratadas, sin embargo las sales hidratadas de uso industrial, son difíciles de conseguir en el mercado, y tienen algunas desventajas como la corrosión en contacto con metales.

La parafina de uso comercial, forma parte de los PCM orgánicos, es esencialmente un alcano sólido refinado. La temperatura de fusión, se encuentra entre los 63°C y 68°C, mientras que la temperatura de solidificación entre los 62°C y 66°C. Yüksel et al. (2012), centran su trabajo en materiales orgánicos del tipo alcanos, ceras o parafinas y han proporcionado una amplia información sobre las propiedades termofísicas de parafinas y ceras.

Dadas las características de la parafina y los requerimientos térmicos de esta investigación, es que se utilizó la parafina de uso industrial como material de almacenamiento térmico para este trabajo. Sus propiedades termofísicas se resumen en la tabla 1.

Tabla 1 – Propiedades termofísicas de la parafina industrial.

TEMPERATURA DE FUSIÓN [°C]	CALOR DE FUSIÓN [kJ/kg]	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m.K]	DENSIDAD [kg/m ³]
63 – 68	173.6	0.167 (líquida, 63.5 °C) 0.346 (sólida, 33.6 °C)	790 (líquida, 65 °C) 916 (sólida, 24 °C)

2.3 Toma de datos y medidas experimentales

A los fines de obtener datos experimentales, se realizaron un conjunto de experiencias con las cocinas solares en el predio del Laboratorio del Grupo de Energía Solar, en el campus de la Universidad Nacional de Río Cuarto (latitud 33° 04' S).

Los datos de temperatura y radiación fueron registrados cada 10 minutos mediante un adquisidor de datos marca Agilent. Se utilizaron termocuplas tipo T (cobre constantán) para medir las temperaturas y dos solarímetros fotovoltaicos ubicados ambos en posición horizontal. Los parámetros ambientales como velocidad y dirección del viento, fueron registrados mediante una Estación Meteorológica Inalámbrica Portátil Pegasus.

Las termocuplas se ubicaron de la siguiente manera: nueve termocuplas se distribuyeron dentro del PCM, sujetándolas en la tapa del recipiente, de modo que no haya migración durante el cambio de fase, tal como se muestra en la figura 3. Las restantes termocuplas se ubicaron: dos en la parte posterior de la cocina a los fines de registrar la temperatura ambiente exterior, dos termocuplas soldadas a la chapa desde el interior del recinto contenedor del PCM, y cinco distribuidas uniformemente en el interior de la cocina, protegidas de la radiación solar.



Figura 3 – Distribución de las termocuplas en el recipiente con parafina.

2.4 Eficiencia energética de las cocinas solares

El comportamiento energético de una cocina solar, puede ser estudiado mediante un balance de energía global, esto es, a partir de los flujos de energías que ingresan y abandonan el equipo. Luego, si se considera estado estacionario durante un breve intervalo de tiempo y se realiza la hipótesis que la energía cinética y potencial son despreciables, el balance de energía puede escribirse como:

$$\text{Flujo de energía perdida} = \text{Flujo de Energía entrante} (\dot{E}_i) - \text{Flujo de Energía saliente} (\dot{E}_o) \quad (1)$$

La energía por unidad de tiempo que ingresa a la cocina \dot{E}_i [W], es la radiación solar global que incide sobre el plano de la superficie absorbadora, la que puede escribirse como:

$$\dot{E}_i = GA_{sc} \quad (2)$$

Donde, G , es la radiación solar global sobre superficie horizontal [W/m^2], y A_{sc} el área de la superficie absorbadora de la cocina [m^2].

La energía ganada por el agua, por unidad de tiempo, es considerada el flujo de energía saliente \dot{E}_o [W].

El cálculo de la ganancia de calor sensible está basado en el aumento de temperatura de la masa de agua contenida en el recipiente m_w [kg] y su capacidad calorífica C_{pw} [J/K kg]. Luego, dividiendo por el intervalo de tiempo considerado Δt [s], obtenemos la expresión para el flujo de energía saliente en watts:

$$\dot{E}_o = \frac{m_w C_{pw} (T_{wf} - T_{wi})}{\Delta t} \quad (3)$$

Con T_{wi} y T_{wf} , las temperaturas del agua de la olla al comienzo y al final del intervalo de tiempo considerado, respectivamente [$^{\circ}\text{K}$].

La eficiencia energética instantánea de la cocina solar η_{en} [adimensional], se define como el cociente entre los flujos de las energías entrante y saliente:

$$\eta_{en} = \frac{\text{Energía saliente}}{\text{Energía entrante}} = \frac{\dot{E}_o}{\dot{E}_i} \quad (4)$$

Entonces, la eficiencia energética instantánea en la cocina solar se calcula como:

$$\eta_{en} = \frac{m_w C_{pw} (T_{w_f} - T_{w_i}) / \Delta t}{GA_{sc}} \quad (5)$$

2.5 Eficiencia exergética de las cocinas solares

En un balance global de exergía en la cocina solar durante un breve intervalo de tiempo, podemos mantener la suposición de estado estable, por lo que la transferencia de calor es constante y el cambio de exergía de la cocina es cero, obteniendo:

$$\dot{X}_{entrante} = \dot{X}_{saliente} + \dot{X}_{destruida} \quad (6)$$

El flujo de exergía que ingresa a la cocina solar, \dot{X}_i [W], puede calcularse utilizando la expresión dada por Petela (2003), la cual es ampliamente utilizada. Esta es la que sigue:

$$\dot{X}_i = G \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right] A_{sc} \quad (7)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente [°K], y T_s es la temperatura superficial del sol [°K], para la que se considera el valor de 5.800 K.

La exergía X_w [J], contenida en el agua a una temperatura T_w [°K], puede calcularse con la ecuación:

$$X_w(T_w) = m_w C_{pw} \left[(T_w - T_a) - T_a \ln \frac{T_w}{T_a} \right] \quad (8)$$

Si la temperatura del agua varía de un valor inicial a un valor final, la variación de exergía del agua ΔX_w [J] es:

$$\Delta X_w = X_w(T_{w_f}) - X_w(T_{w_i}) \quad (9)$$

La variación de exergía que experimenta el agua en el recipiente dentro de la cocina debido a la variación de temperatura, puede ser considerada como la exergía de salida X_o del sistema. De este modo, la exergía por unidad de tiempo que abandona la cocina solar \dot{X}_o [W], puede ser calculada utilizando la expresión que sigue:

$$\dot{X}_o = m_w C_{pw} \left[(T_{w_f} - T_{w_i}) - T_a \ln \frac{T_{w_f}}{T_{w_i}} \right] / \Delta t \quad (10)$$

La ecuación anterior puede expresarse en términos del flujo de energía saliente, así:

$$\dot{X}_o = \dot{E}_o - m_w C_{pw} T_a \ln \frac{T_{w_f}}{T_{w_i}} / \Delta t \quad (11)$$

El segundo término del lado derecho de esta expresión es el flujo de exergía destruida o perdida, mostrando el verdadero potencial que tiene el sistema para convertir la energía que ingresa al mismo.

La eficiencia exergética instantánea η_{ex} [adimensional], es definida como el cociente entre la exergía útil que entrega la cocina solar, y la exergía que recibe de la radiación solar. Luego, puede ser obtenida por el cociente entre los flujos exergéticos saliente y entrante a la cocina solar.

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergía saliente}}{\text{Exergía entrante}} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \quad (12)$$

De este modo, obtenemos la expresión para el cálculo de la eficiencia exergética de la cocina solar.

$$\eta_{ex} = \frac{m_w C_{pw} \left[(T_{wf} - T_{wi}) - T_a \ln \frac{T_{wf}}{T_{wi}} \right] / \Delta t}{G \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right] A_{sc}} \quad (13)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un estudio comparativo basado en un análisis energético y exergético de las dos cocinas solares, una sin material de cambio de fase y otra con PCM, en días de invierno, con temperatura ambiente máximas entre 15°C y 20°C.

La figura 4 muestra las variables climáticas para uno de los días ensayados. Estos valores se toman como referencia para los resultados que siguen.

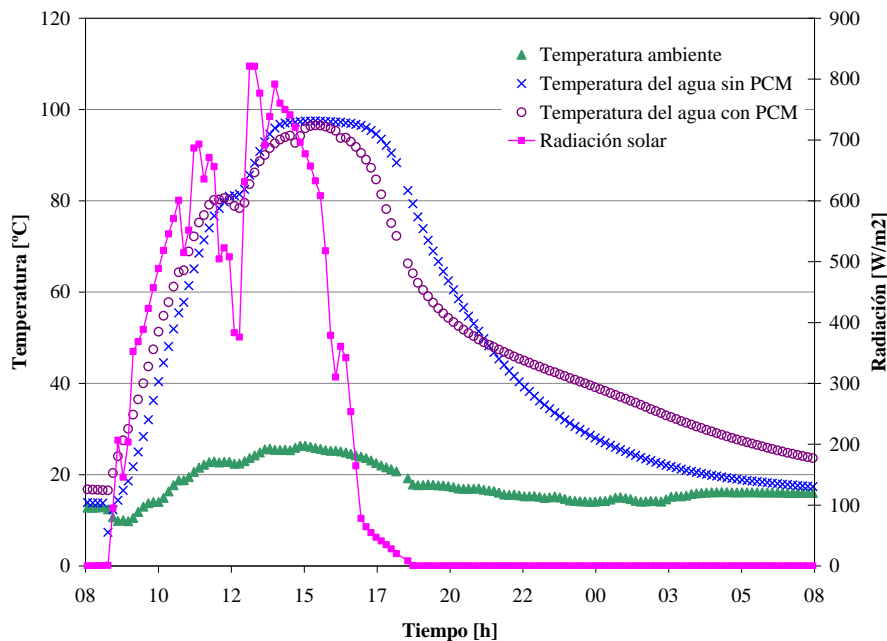


Figura 4 – Evolución de la temperatura y la radiación a lo largo del día.

Si se analizan las curvas de la temperatura del agua dentro de las ollas, vemos que muestran la forma usual para un dispositivo con y sin almacenamiento de material de cambio de fase. En las primeras horas la curva del agua para la cocina con PCM se encuentra por encima de la otra, debido al calor remanente del día anterior que aún posee el PCM. La parafina en todo momento compite con el agua por el calor que ingresa a la cocina, retardando la elevación de la temperatura de la misma. Este comportamiento se hace evidente en la menor pendiente que posee la curva del agua con PCM y que provoca finalmente, el cruzamiento de las curvas y que el agua en la cocina sin PCM logre una temperatura mayor más rápidamente que la otra.

La energía que ingresa a las cocinas es suficiente para que ambas ollas alcancen temperaturas máximas muy cercanas al punto de ebullición, lo que se advierte en los máximos de ambas curvas. Sin embargo, ya que el calor que ingresa a la cocina con PCM es en parte utilizado para fundir la parafina, esto hace que la curva alcance su temperatura máxima más lentamente y que estas temperaturas no se mantengan en el tiempo, como lo muestran las curvas, y la meseta más extendida para el caso de la cocina sin PCM. La capacidad de la parafina de entregar su calor sensible y latente de fusión se hace evidente en la última parte de la curva retardando la disminución de la temperatura dentro de la olla.

La figura 5 ilustra para las cocinas ensayadas, la variación de la eficiencia energética y exergética instantánea, y la radiación solar con respecto al tiempo, para la primera mitad del día. Las curvas muestran un comportamiento similar para ambas eficiencias y en relación a la radiación solar que llega a las cocinas.

Vemos que inicialmente las eficiencias son altas y luego disminuyen a medida que avanza el tiempo y el sistema alcanza el nivel de estancamiento, cuando la temperatura del agua se acerca al punto de ebullición. Esto también puede observarse de las ecuaciones (5) y (13). Estas ecuaciones muestran que tanto la energía como la exergía de salida son

directamente proporcionales a la diferencia de temperatura, y son elevadas debido al hecho de que al comienzo el cambio en la temperatura del agua dentro de las ollas es rápido. Por otro lado, la energía y la exergía entrantes debidas a la radiación solar son en un inicio bajas, lo que se debe al hecho de que varían proporcionalmente a la radiación incidente. Así, los rendimientos energéticos y exergéticos son en un comienzo altos, pues el cociente entre las energías y exergías salientes a entrantes es elevado.

Cerca del mediodía solar la intensidad de radiación es elevada, a su vez, la temperatura del agua de las ollas está cercana a la de ebullición, por lo que los cambios en sus temperaturas son pequeños. Esto hace que las eficiencias energéticas y exergéticas comiencen a disminuir hasta valores muy bajos.

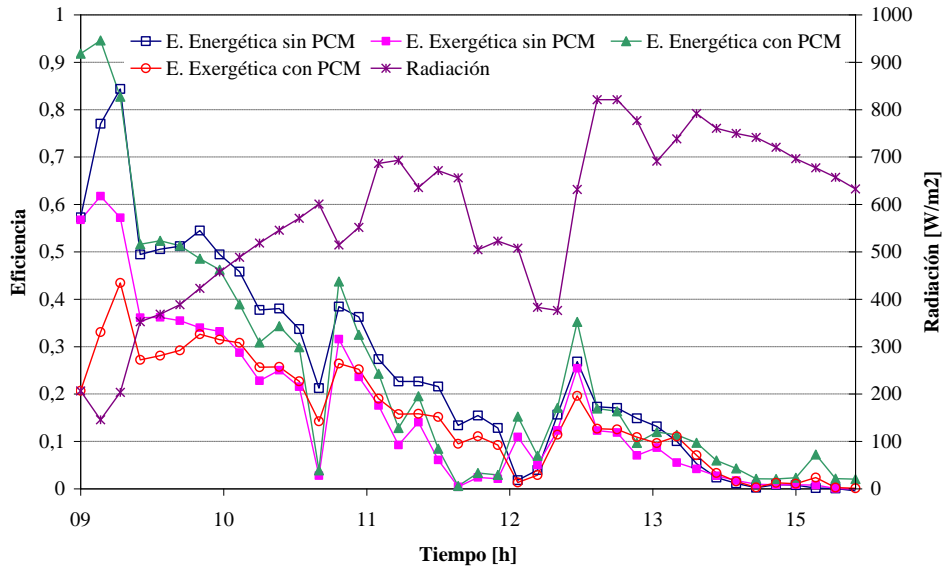


Figura 5 – Eficiencia energética y exergética instantánea y radiación en función del tiempo.

Las curvas de rendimiento energético, como es de esperarse, son en todo momento superiores a las de rendimiento exergético para ambos tipos de cocinas. Si se comparan ahora las curvas de eficiencia exergética para una y otra cocina, vemos que si bien las curvas de eficiencia con y sin PCM son muy cercanas, muestran una tendencia diferente. La cocina sin PCM tiene un rendimiento superior durante las horas de mayor radiación, sin embargo cuando esta comienza a decrecer las curvas de eficiencia energética y exergética de la cocina con PCM muestra un decaimiento menor.

Luego del medio día solar la intensidad de la radiación comienza a decrecer y la temperatura dentro de las ollas a disminuir. Esto produce una diferencia de temperatura negativa, dando valores negativos de eficiencia; y hace que no sea posible continuar utilizando la eficiencia instantánea para analizar el desempeño de las cocinas durante el resto del día.

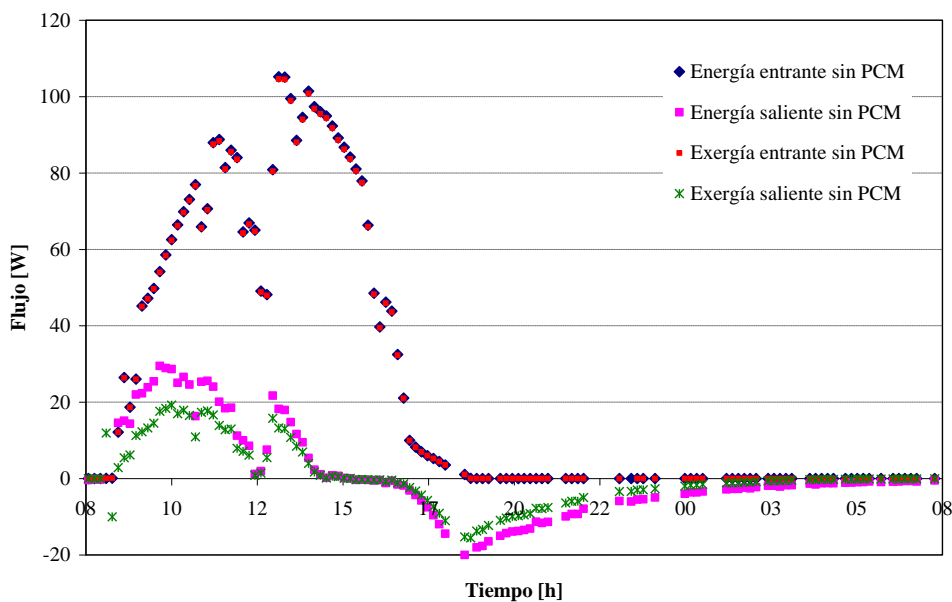


Figura 6 – Flujos energético y exergético para la cocina sin PCM en función del tiempo.

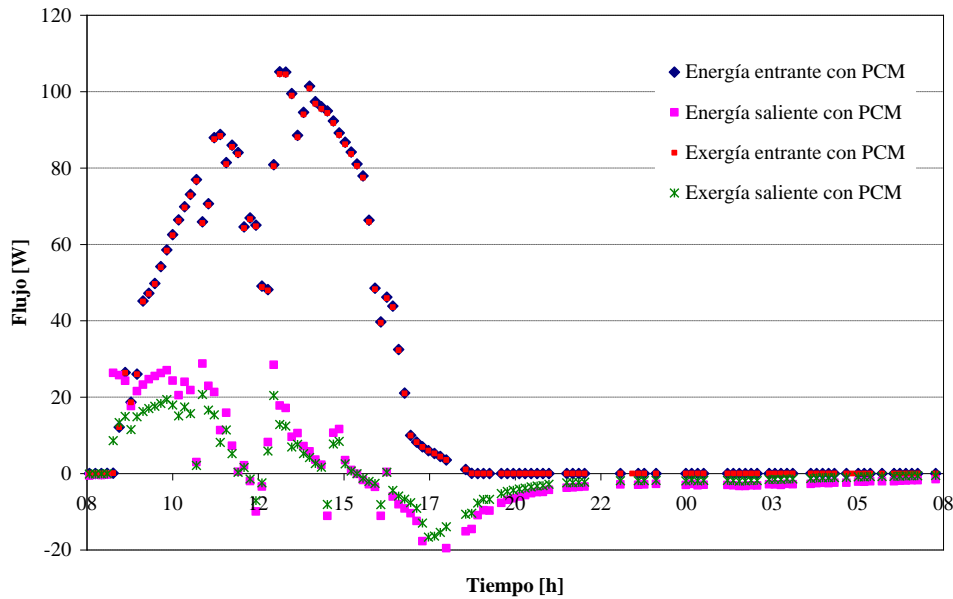


Figura 7 – Flujos energético y exergético para la cocina con PCM en función del tiempo.

Las figuras en 6 y 7 muestran la variación de los flujos de energía y exergía entrantes y salientes, para la cocina sin PCM en la figura 6 y para la cocina con PCM, Fig. 7, durante el día completo. En ellas se observa que las curvas de los flujos de energía y exergía entrantes, calculados con las ecuaciones (2) y (7) respectivamente son idénticas para ambas cocinas, debido al hecho de que se ensayaron cocinas geoméricamente iguales. También observamos en ambas figuras, la proximidad entre las curvas de energía y exergía saliente, lo que se corresponde con la utilización de las ecuaciones (3) y (10) para el cálculo de los flujos. La similitud entre las curvas de energía saliente para las cocinas con y sin PCM se entiende, ya que las pérdidas energéticas para ambas cocinas son similares resultado de la igual geometría entre ellas y condiciones de ensayo.

Tanto en la figura 6 como en la figura 7, se observa que en las horas de mayor radiación solar los valores de las energías y exergías salientes son positivos y luego comienzan a disminuir conforme la radiación solar declina.

Cuando la radiación no es suficiente para proporcionar un aporte significativo de energía y exergía a los valores de entrada, estas comienzan a tomar valores negativos. Así, si comparamos las curvas de energía y exergía salientes para la cocina sin PCM (Fig. 6) y la cocina con PCM (Fig. 7) en las últimas horas del día, vemos que el material de cambio de fase tiene un efecto atenuador sobre las curvas de energía y exergía de salida, debido a su capacidad de entregar lentamente en calor almacenado.

Como se mencionara anteriormente, no es posible hacer un análisis del desempeño de las cocinas solares durante todo el día a partir de la eficiencia instantánea. La capacidad del material de cambio de fase para aprovechar la energía que ingresa a la cocina solar se puede investigar a partir de la integración durante el día completo de los flujos de energías y exergías entrantes y salientes. Esto se hace para las curvas de las figuras 6 y 7 anteriores.

Se obtienen así, valores de energías y exergías salientes y entrantes diarios, y luego efectuando el cociente entre ellos, el desempeño energético y exergético diario. Los resultados se muestran en la tabla 2 que sigue:

Tabla 2 – Performance diaria.

PERFORMANCE	COCINA SIN PARAFINA	COCINA CON PARAFINA
ENERGÉTICA DIARIA [%]	5,630474	5,094418
EXERGÉTICA DIARIA [%]	3,676284	3,693562

Las tablas 3 y 4 que siguen muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza, ANOVA de un factor para un nivel de significancia del 5%, realizado para validar los resultados obtenidos del rendimiento energético y exergético diario de las cocinas con PCM y sin material de cambio de fase contenidos en la tabla 2.

Tabla 3 – Análisis de varianza para performance energética diaria, para $\alpha = 0,05$.

ORIGEN DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS	F	PROBABILIDAD	PROBABILIDAD CRÍTICA PARA F
ENTRE GRUPOS	0,0080832	1	0,0080832	6,77335305	0,00986494	3,88293406

DENTRO DE LOS GRUPOS	0,26970448	226	0,00119338			
TOTAL	0,27778768	227				

Tabla 4 – Análisis de varianza para performance exergética diaria, para $\alpha = 0,05$.

ORIGEN DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS	F	PROBABILIDAD	PROBABILIDAD CRÍTICA PARA F
ENTRE GRUPOS	0,00013948	1	0,00013948	3,91564513	0,04905283	3,88293406
DENTRO DE LOS GRUPOS	0,00805012	226	0,00003562			
TOTAL	0,00818959	227				

4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados muestran que el incorporar un material de cambio de fase a una cocina solar tiene un efecto positivo en su comportamiento. Si bien su rendimiento tanto energético como exergético es algo inferior durante las horas de mayor insolación, la menor pérdida de exergía durante el resto del día compensa esto, haciendo que su desempeño exergético diario sea mejor y sea comparable al de otros equipos con dispositivos de almacenamiento. Si bien los valores no son muy elevados, la diferencia a favor, hace que pueda pensarse en métodos que aumenten su capacidad de aprovechar la energía de calidad.

5. REFERENCIAS

- Adaro, J, Fasulo, A, Lema, A, Marchesi, J., 2002. Monthly maps of mean daily insolation for the Western Central Region of Argentina. World Renewable Energy Congress VII Proceeding. Cologne. Germany. Ed.: Elsevier.
- Binark, AK, Turkmen, N., 1996. Modelling of a hot box solar cooker. Energy Conv Mgmt. pp. 37:303–10.
- Buddhi, D., Sahoo, L.K., 1997. Solar cooker with latent heat storage: design and experimental testing. Energy Conversion and Management. 38(5), pp. 493–8.
- Dincer, I., 2002. Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. Int J Energy Res. 26, pp. 568–588.
- El Sebaï, A. A. y Ibrahim, A., 2005. Experimental testing of a box type solar cooker using the standard procedure of cooking power, Renewable Energy 30, pp. 1861–1871.
- Funk, P.A., 2000. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. Sol Energy. 68(1), pp. 1–7.
- Lema, A., Morsetto, J., Pontin, M., Romero, H., 2013. Evaluación numérica del comportamiento de un horno solar con material de cambio de fase” Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. 1, pp. 03.125-03.133.
- Mohammed, M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj., 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management, (45), pp. 1597–1615.
- Mullick SC, Kandpal TC, Saxena AK., 1987. Thermal test procedure for box-type solar cookers. Sol Energy, 39(4):353.
- Petela R. (2003). Exergy of andiluted thermal radiation. Solar Energy, 74, pp. 469-488.
- Tyagi V.V., Pandey, A.K., Giridhar, G., Bandyopadhyay. B., Park, S.R., Tyagi, S.K., 2012. Comparative study based on exergy analysis of solar air heater collector using thermal energy storage. International Journal of Energy Research. 36, 6, pp. 724–736.
- Yüksel Numan, Arabacıgil Bihter, and Avcı Atakan., 2012. The thermal analysis of paraffin wax in a box type solar cooker. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 4, 06, 3126.

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF THERMAL BEHAVIOR OF SOLAR BOX COOKERS WITH AND WITHOUT PHASE CHANGE MATERIAL

Abstract. This paper presents an investigation carried out in order to evaluate how the phase change material (PCM) modifies the evolution of temperatures inside a solar box cooker. The study presents an energy and exergy analysis model. Thermodynamic considerations were made, looking for the development of rational and significant methodologies for the evaluation and comparison of the solar cookers efficiencies. Experimental temperature data were obtained for different points during many days, and the global solar radiation was also measured for the same days. The results are presented in plots of energy and exergy fluxes for both cookers, and also the instantaneous efficiencies were determined. Values for the energetic and exergetic daily performances showed a good behaviour for the PCM solar cooker.

Key words: Solar box cooker with phase change material, Exergy analysis, Energy efficiency.