

## EVALUACIÓN TÉRMICA DE BOLSAS PLÁSTICAS ECONÓMICAS PARA LA CALEFACCIÓN SOLAR DE AGUA

**V. Passamai<sup>1</sup>, M. Checura<sup>2</sup> y T. Passamai<sup>3</sup>**

INENCO-DF-UNSa<sup>1</sup> – Universidad de la Serena, Chile<sup>2</sup> – Departamento de Matemáticas-UNSa<sup>3</sup>  
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
 Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – Consejo de Investigaciones de la  
 Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) C.P. 4400 – Salta  
 Tel. 0387-4255389 e-mail: passamai@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** Se evalúan térmicamente bolsas transparentes usadas para la calefacción solar de agua. Su construcción se realiza con polietileno de 70 micrones de espesor, de pared doble y cierre hermético. El objetivo del estudio fue la obtención de 10 litros de agua a más de 40 - 60 °C, de manera práctica y sencilla para uso sanitario de diferentes usuarios (mochileros, viajeros, viviendas económicas, etc.). Las bolsas fueron colocadas sobre superficie horizontal y expuestas a la radiación solar desde la mañana hasta la tarde, en la ciudad de Salta. Se evaluaron diferentes comportamientos térmicos por la exposición solar: sobre piso, mesa y superficie negra, con y sin aislación térmica. En todos los casos la temperatura del agua aumenta y el pico máximo ocurre posteriormente al de la radiación solar, por inercia térmica. Mediante Simusol se realiza la modelización teórica de uno de los casos experimentados.

**Palabras clave:** energía solar, bolsa transparente, calefacción de agua, bolsa plana de agua.

### INTRODUCCIÓN

El uso de bolsas plásticas negras para la calefacción de agua se ha reportado recientemente (Gea et al., 2005) y en trabajos anteriores (Luque et al., 2002) publicados en AVERMA. Por otro lado, la búsqueda bibliográfica en Solar Energy permitió detectar que fueron japoneses quienes usaron bolsas de plástico transparente para la calefacción de agua en cantidades de 100 litros, ubicándolas en forma horizontal sobre el piso (Soda et al., 1984). En este trabajo, se presentan resultados de mediciones del comportamiento térmico de bolsas plásticas (Figura 1 y 2) frente a las comerciales. Se compararon con particular énfasis, el incremento de la temperatura con respecto al ambiente, y el tiempo que demandó para una cantidad fija de agua (10 litros) sometida a la radiación solar incidente. El costo estimado por bolsa, fabricada en INENCO, es de \$ 5, lo cual puede reducirse si su producción se generaliza.

A nivel comercial, Solar Cookers International vende, desde el 2004, un pasteurizador de agua: el “AquaPak”, producido por la firma “Solar Solutions” de San Diego, en California, Estados Unidos. Esta bolsa de agua, con capacidad de entre 4 y 5 litros, tiene una base realizada en polietileno negro con una cubierta de burbujas de aire, su precio es de U\$S 20 en el lugar de origen. La publicación de Solar Cookers International (2004) no detalla de las pruebas realizadas con su dispositivo, pero asegura la obtención de 67 °C en dos horas, que puede observarse en el “Indicador de Pasteurización de Agua” (WAPI, “Water Pasteurization Indicator”) que viene incorporado en la misma. La Figura 3 muestra esa versión comercial.



*Figura 1: Bolsa de polietileno vacía*



*Figura 2: Bolsa con 10 l agua*



*Figura 3: Bolsa comercial*

La bolsa de la Figura 1, fue cedida por el Ing. Tom Lawand, ex director del Instituto Brace de la Universidad McGill de Montreal, Canadá. Esta fue realizada en una fábrica del parque industrial de Baie d’Urfe, de esa ciudad, en 1999.

1. Investigador del CONICET y el CIUNSa.

## MATERIALES Y MÉTODO EMPLEADO

Las bolsas plásticas se probaron de cinco maneras diferentes. Una ubicada encima de una lámina de aluminio pintada de negro, debajo de la cual hay una base de 10 cm de poliuretano, que se denomina “C/aislac”; otra colocada sobre una mesa de “chapadur” (marca registrada), que se llamó “S/aislac”; una tercera bolsa, colocada directamente sobre piso de ladrillo, denominada “S/piso”; la cuarta experiencia similar a la tercera, pero con una base de plástico negro, que se denominó “S/piso/neg”; y finalmente, la quinta experiencia donde la bolsa se colocó sobre plástico negro, éste sobre una lámina de poliestireno expandido de 2 cm de espesor y todo sobre el piso (“S/pisoC/aislac”). En todas las experiencias, las bolsas fueron ubicadas en posición horizontal con la superficie de agua expuesta al sol, la que resulta de 56 cm × 52 cm (un poco más de un tercio de m<sup>2</sup>) y con un espesor de 3,5 cm, dando un volumen de 10 litro de agua. Además, en dos de los casos, se comparó la evolución de la temperatura de 10 litros de agua que fueron colocados dentro una caja traslúcida de plástico con tapa, de 30 cm × 50 cm de área y 15 cm de altura.

Para medir la temperatura del agua con el transcurso del tiempo, se usaron termocuplas de cobre y constantán. Se las ubicó en contacto con la parte inferior de cada bolsa, en el centro, sobre cuadrados de poliestireno expandido de 4 cm de lado y 1 cm de espesor, logrando una aislación del lugar de apoyo. Se las cubrió con una lámina espejada de papel, evitando así el calentamiento directo por acción de los rayos solares. El sistema de termocuplas se conectó a un data logger cuyos datos fueron registrados y almacenados por una computadora. La radiación solar se midió con un solarímetro Kipp & Zonen CM5, cuyo error de medición se estima en un valor máximo de 10 % en relación a piranómetros de precisión. Los datos fueron captados cada cinco minutos, comenzando las experiencias en la mañana hasta al atardecer. El lugar donde se realizaron las experiencias, en la ciudad de Salta (24°44'10,10"S; 65°24'28,85"W y 1224 m snm), mira hacia el Norte y está desprovisto de sombras de árboles o paredes, la mayor parte del tiempo, salvo al momento de la finalización de las mismas, alrededor de las 18 horas. La época en que se hicieron las experiencias corresponden a los meses de julio y agosto, considerados como piso o más desfavorables del año. La figura 4 muestra algunas vistas del campo experimental. En la figura 5, se visualizan detalles de la aislación con poliuretano.



Figura 4: Dispositivos experimentales. Caja testigo.



Figura 5: Aislación de poliuretano y marco de madera.

Se midió la radiación horizontal transmitida a través de la capa de agua y plástico de una bolsa, dando por resultado el valor de 42 % respecto de la radiación total incidente. La bolsa vacía, permitía pasar hasta un 77 % de la radiación total incidente. Estas mediciones corresponden al mediodía solar y despreciando la radiación reflejada.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se aclara que, en los gráficos que siguen, el eje de las abscisas indica hora del día en el formato *hh.f* (hora y fracción decimal), mientras que en el texto se indican como *hh:mm* (horas y minutos, separadas por dos puntos, como en los relojes digitales).

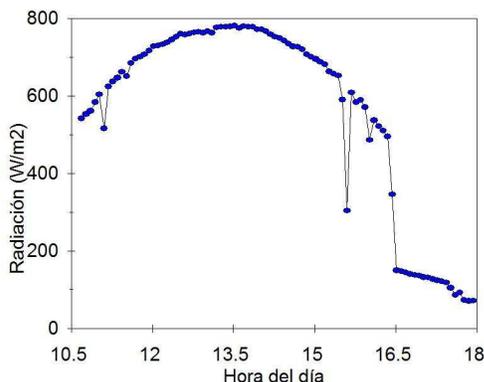


Figura 6: Radiación solar sobre superficie horizontal. Primera experiencia

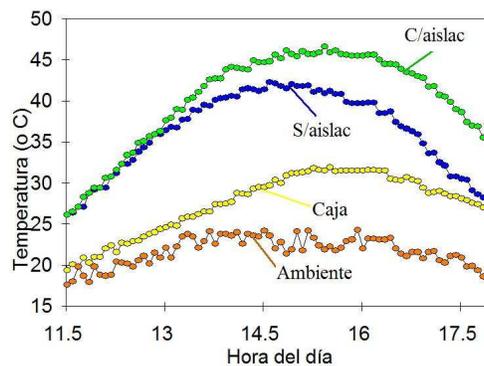


Figura 7: Evolución de temperaturas en la primera experiencia.

La Figura 6, muestra la evolución temporal de la radiación. En la 7, se observan las temperaturas correspondientes al día 16 de julio de 2009, que estuvo despejado en la ciudad de Salta. Las temperaturas indicadas corresponden a los casos de bolsa de agua sobre placa negra con aislación de poliuretano (“C/aislac”), y sobre la mesa (“S/aislac”). Además, se muestran las temperaturas del agua dentro de la caja testigo (“Caja”) y la temperatura del ambiente (“Ambiente”), la que se mantuvo por debajo de los 25 °C. En la caja de plástico traslúcido, el agua no superó los 33 °C. La bolsa con agua sin aislación, registró temperaturas por encima de los 40 °C, mientras que el agua con aislación, sobrepasó los 45 °C.

Se calculó la diferencia de temperaturas entre el agua y el ambiente. Para el caso “C/aislac”, se modelizó con la curva obtenida por un polinomio de segundo grado (Figura 8), determinándose un R<sup>2</sup> de 0,96. Luego, a través de su derivada primera igualada a cero, se obtuvo el tiempo máximo, resultando las 15:30 horas. El desfase entre el máximo de la radiación solar y el de la temperatura del agua fue de dos horas.

*Eficiencia del sistema. Evaluación de las distintas versiones*

La eficiencia (E), definida como el cociente entre la energía total neta ganada y la energía recibida, se calcula para cada instante de tiempo como:

$$E = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_a - T_m)}{A \int I(t) dt}$$

Donde: m es la masa de agua, Cp el calor específico, Ta la temperatura alcanzada por el agua, Tm la temperatura del aire ambiente, A el área de captación de la radiación e I(t) el valor de radiación incidente al tiempo t.

Tomando los datos: m = 10 kg, Cp = 4180 J/(kgK), A = 0,29 m<sup>2</sup>, la radiación I(t) y las temperaturas Ta(t) y Tm(t) a partir de los correspondientes a las figuras 6 y 7 (datos experimentales), se obtienen los valores graficados en la figura 9, para la evolución de la eficiencia porcentual en función del tiempo, realizando la integración numéricamente. Se representan sólo para la masa de agua en la bolsa ubicada sobre la chapa pintada de negro con aislación “C/aislac”, y la ubicada sobre la mesa, “S/aislac”. Los valores promedios calculados fueron de 0,31 y 0,26, respectivamente.

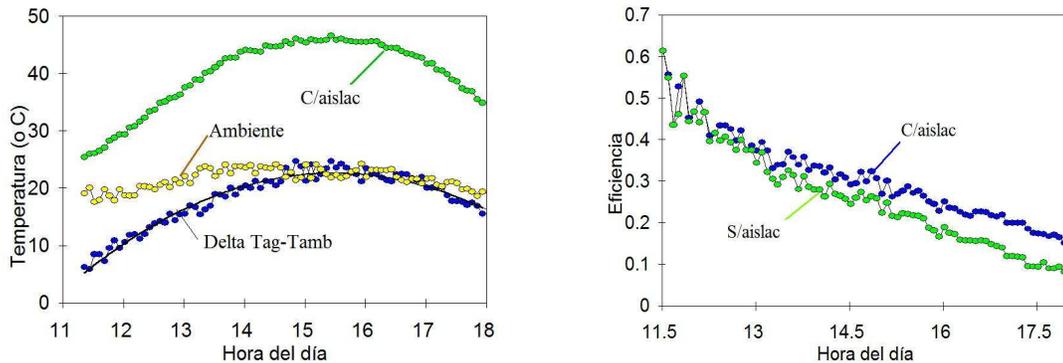


Figura 8: Diferencia entre las temperaturas de agua y ambiente    Figura 9: Eficiencia de dos sistemas en función del tiempo

Por medio de la integración numérica en el tiempo, realizada a partir de la curva de irradiancia solar en la superficie de la bolsa de agua en función del tiempo, se calculó la irradiación horaria total recibida en Julios. Por otra parte, la ganancia neta de energía del agua, respecto a la temperatura ambiente, se calculó también en forma horaria para el caso más eficiente, y se presenta en función del tiempo. Ambas curvas se muestran en la figura 10. Esta, comparada con la figura 9, da cuenta de las respectivas eficiencias.

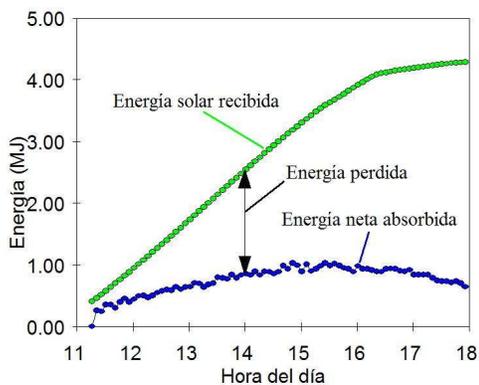


Figura 10: Energía solar recibida y absorbida por la masa de agua. La diferencia es la pérdida al ambiente

*Segunda experiencia*

El día 17 de julio se realizó la experiencia y estaba parcialmente nublado, como puede observarse de la gráfica de radiación solar, junto a la evolución de las temperaturas en las figuras 11 y 12 respectivamente.

Las temperaturas al inicio de la jornada fueron similares, tanto para el caso del agua contenida en bolsa con aislación en la base como sin ella (sobre la mesa). A partir de la obtención del máximo valor, alrededor de las 15:00 horas, la diferencia se manifestó a favor del caso aislado, que mostró una inercia mayor al enfriarse. La máxima temperatura alcanzada fue de 43 °C a las 15:15 horas.

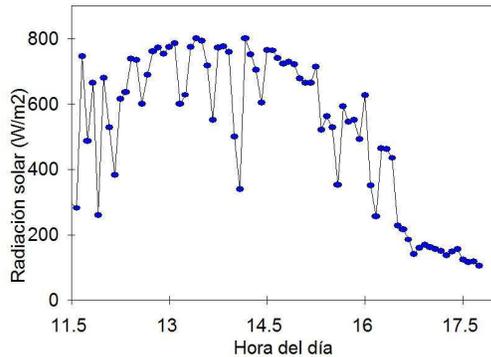


Figura 11: Radiación solar

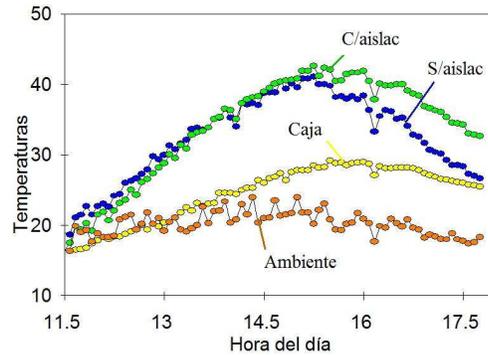


Figura 12: Temperaturas de agua en la segunda experiencia

### Eficiencia

Las eficiencias en la captación de la radiación solar, tanto para el agua en bolsa aislada como sin aislación, fueron de 0,22 en promedio. La figura 13, muestra dichas eficiencias en función del tiempo. Los valores fueron menores a los obtenidos en el caso de la primera experiencia.

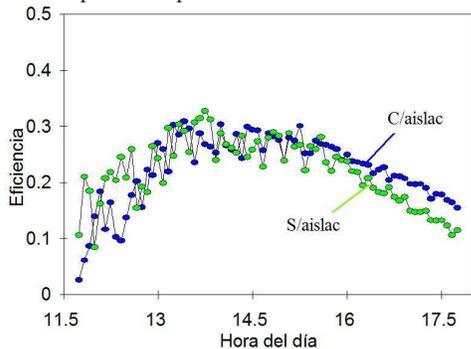


Figura 13: Evolución temporal de las eficiencias en dos casos de la segunda experiencia

### Tercera experiencia

Realizada el 18 de julio, en este caso se colocó una de las bolsas de agua sobre piso de ladrillo. La figura 14 muestra la radiación solar y la figura 15 las temperaturas. Ambas en función de las horas del día para esta experiencia. El tiempo estuvo inestable, con nubosidad variable y vientos leves. Estos se manifestaron en las temperaturas como respuesta de los distintos cambios, reflejados por la influencia climática. La máxima temperatura alcanzada por el agua, en la situación más favorable ("C/aislac"), fue de 40 °C. El agua contenida en la bolsa colocada directamente sobre el piso ("S/piso"), mostró un aumento de temperatura apenas visible respecto de la contenida en la caja testigo. En cambio, la que fue colocada sobre la mesa ("S/aislac") obtuvo una temperatura sustancialmente mayor a la intermedia entre las otras dos.

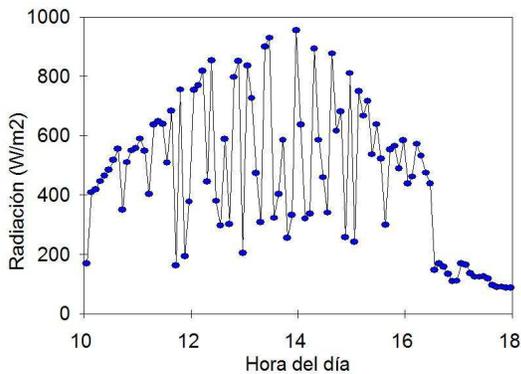


Figura 14: Radiación en función de la hora del día

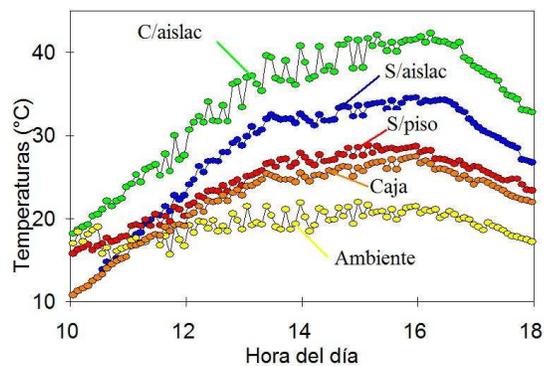


Figura 15: Temperaturas a lo largo del día.

### Eficiencia

Para los tres casos; "C/aislac", "S/aislac" y "S/piso", los valores de las eficiencias medias fueron iguales a: 0,28; 0,15 y 0,09;

respectivamente. La evolución en el tiempo de las mismas se presenta en la figura 16.

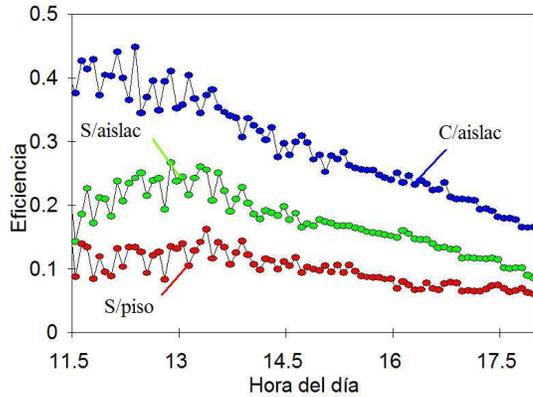


Figura 16: Eficiencias comparativas en la tercera experiencia.

**Cuarta experiencia**

Se realizó el 10 de agosto con cielo despejado. En este caso, se compararon las temperaturas del agua contenida en bolsas: sobre placa negra y aislada con poliuretano, otra sobre la misma mesa, y la tercera sobre piso con plástico negro en la base sin aislación. La figura 17, muestra la evolución temporal de la radiación solar. La figura 18, las temperaturas obtenidas en las bolsas con agua anteriormente descriptas y se aprecia en la temperatura ambiente, los aumentos a lo largo del día.

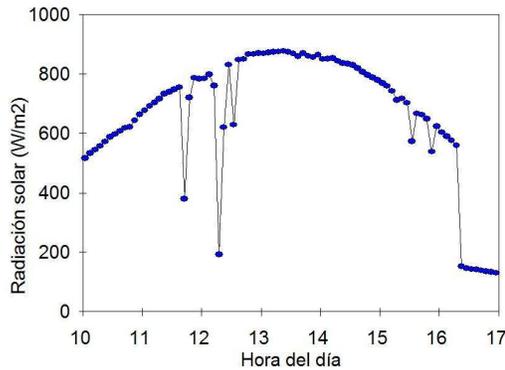


Figura 17: Evolución de la radiación con el tiempo

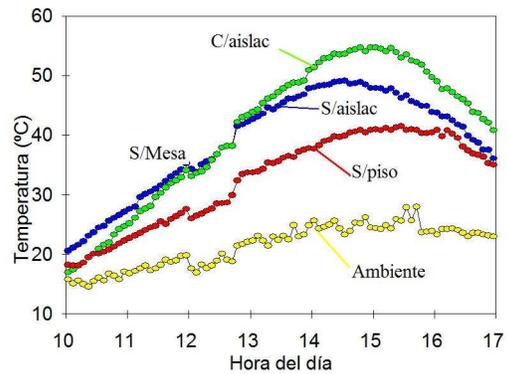


Figura 18: Temperaturas obtenidas

**Eficiencias**

No se muestran las curvas de estos casos. El cálculo permitió determinar una paridad en las eficiencias medias para los casos "C/aislac" y "S/aislac", iguales a 0,33. Mientras que, para el agua de la bolsa colocada sobre piso, la eficiencia fue de 0,2.

**Quinta experiencia**

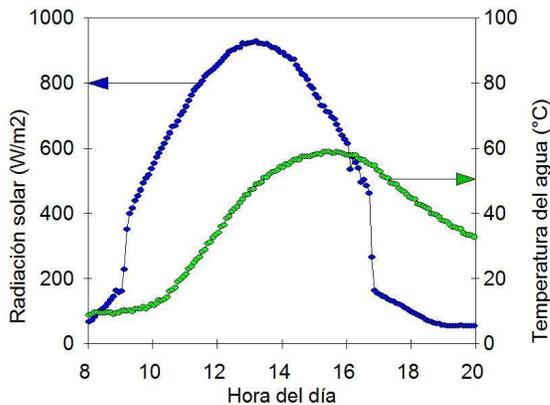


Figura 19: Radiación y temperatura del caso más favorable

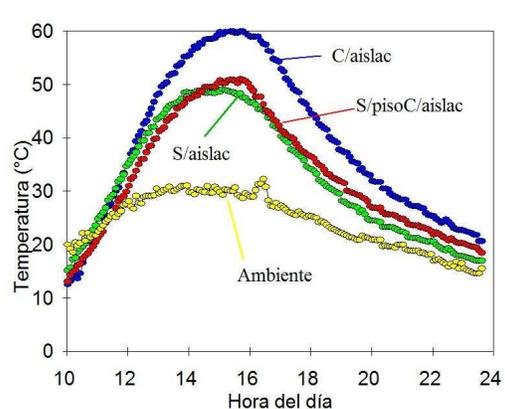


Figura 20: Temperaturas obtenidas.

La experiencia se realizó el 13 de agosto, con cielo despejado (figura 19). En la figura 20, se observa un marcado aumento de la temperatura del ambiente hasta las 14:00 horas, debido a la presencia de un viento Zonda, lo cual favoreció al efecto calefactor en las masas de agua. Aquí, se agregó una variante para el caso de bolsa de agua sobre piso, colocándose sobre plástico negro y una placa de poliestireno expandido de 2 cm de espesor (como se dijo, se denominó “S/pisoC/aislac”).

**Eficiencias**

Los valores medios obtenidos fueron: 0,35 para el caso más eficiente (“C/aislac”), es decir bolsa de agua sobre chapa negra y poliuretano en la base; 0,25 para el agua sobre la mesa; y 0,21 para el agua sobre el piso, con plástico negro y aislación de poliestireno expandido en la base.

**SIMULACIÓN TEÓRICA CON SIMUSOL**

**Quinta experiencia**

Se eligió el caso “C/aislac”. Para su simulación, se elaboró un circuito térmico sencillo, para realizar el modelo del sistema. Se consideró temperatura uniforme del agua en la bolsa.

El esquema de la figura 21 ilustra los flujos de calor involucrados. A partir de éstos se realizaron las consideraciones pertinentes que permiten el uso del programa SIMUSOL para la simulación térmica (Alia y Saravia, 2004).

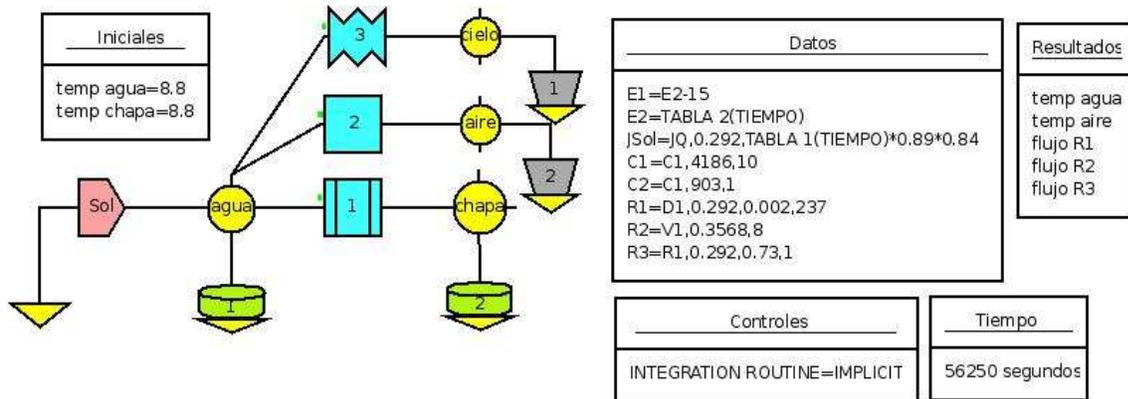


Figura 21: Circuito térmico del sistema modelado según el programa SIMUSOL.

La radiación solar, JSol, afectada por el producto de la transmitancia y la absorbancia, es la que llega a la masa de agua. Sus valores se extraen de la TABLA 1(TIEMPO) que da los valores experimentales. C1 es la masa de agua. Las pérdidas son: conductivas hacia el piso pasando por la chapa (elemento 1); convectivas al aire (elemento 2) y radiativas al cielo (elemento 3). C2 es la masa de suelo. E1 es la temperatura de cielo, supuesta 15 °C menor que la del ambiente, dada por E2 (datos experimentales). Los parámetros usados están en el cuadro “Datos” que se introdujo en el programa.

R1, R2 y R3 son las resistencias: conductiva al piso, convectiva al aire y radiativa al cielo, respectivamente.

Se obtuvieron los resultados para un tiempo de 16 horas, en correspondencia con los datos experimentales. En la figura 22, se presentan las temperaturas obtenidas, su comparación con los datos experimentales y una simulación convencional. Esta última fue obtenida de la resolución de la ecuación diferencial del balance de energía para la bolsa de agua, mediante el programa Matlab, al que se incorporaron los parámetros que permitieron el ajuste por SIMUSOL. Las coincidencias son notables, obteniéndose un error relativo porcentual del 0,34 % con el SIMUSOL y 0,12 % mediante Matlab.

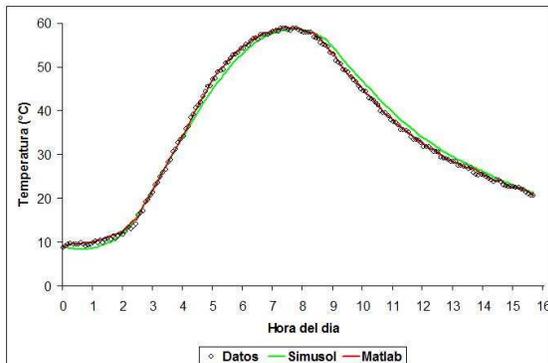


Figura 22: Evolución de las temperaturas medidas y simuladas a través del SIMUSOL y el Matlab.

## CONCLUSIONES

El sistema descrito en este trabajo, sencillo y de bajo costo, tiene eficiencias aceptables.

Los resultados presentan mejoras en su eficiencia, si el agua alojada dentro de la bolsa está aislada térmicamente y tiene una base de color negro.

Las variadas experiencias realizadas, en los meses más desfavorables de invierno en la ciudad de Salta, permiten asegurar que, en la medida en que haya radiación solar, aun en días con baja radiación directa, o inestables como en los casos de la segunda y tercer experiencia, son comparables con la primera, realizada en día claro. Asimismo, si las condiciones de irradiación y temperatura mejoran, como en los casos cuarto y quinto, las temperaturas serán sustancialmente mayores.

Como trabajo futuro, se plantea la necesidad de realizar mediciones que correspondan a otras estaciones del año, bajo condiciones que impliquen ciclos de máximos y mínimos solares, con el propósito de obtener el comportamiento en las diferentes condiciones climáticas y de radiación solar.

Dado que la metodología de estudio por simulación ya está creada, es posible con sólo introducir los distintos valores de radiación y temperatura ambiente, comparar con otros resultados.

También queda la posibilidad de investigar la introducción de modificaciones con respecto a las bolsas sencillas presentadas, relacionadas con otros componentes que posean mayor aislación térmica, favorezcan la incidencia de la radiación solar, así como también la posibilidad de inclinar el plano de captación solar. Ello podrá traer aparejada la consecuente necesidad de adaptar accesorios para lograrlo, con nuevas dificultades técnicas que se plantearían y, sobre todo, un mayor insumo de tiempo para su uso, entre otras cosas.

Por la conformación del grupo de trabajo, con la integración de un miembro de Chile, se planteó la posibilidad de experimentar en distintos lugares geográficos, con los consecuentes cambios climáticos, incidencia de los rayos solares, influencias de la temperatura ambiente, vientos, etc.

Otra posibilidad de estudio es el uso combinado de las bolsas transparentes con cocinas solares del tipo reportado recientemente (Passamai et al., 2007).

El modelo experimental desarrollado y la simulación, mostraron estar acordes con los datos obtenidos, lo que valida la posibilidad de estudio bajo distintas condiciones de trabajo.

## REFERENCIAS

- Alia D., Saravia L. y Saravia D. (2004). Programa SIMUSOL. Simulación de Sistemas Solares. [www.simusol.org.ar](http://www.simusol.org.ar).
- Gea M., Figueroa G., Caso R. y Saravia L. (2005). Colector acumulador solar de bolsas de PVC con agua. AVERMA 9, 03.01-03.05.
- Luque V., Iriarte A. y Lesino G. (2002). Bolsas plásticas colectoras para cámara de inyección: ensayos preliminares. AVERMA 6, 1, 02.31-02.36.
- Passamai V., Passamai, T., Pareja, S. y Pizarro, L. (2007). Física térmica de una cocina solar de pequeñas dimensiones. AVERMA 11, 08.37-08.42.
- Sodha M. S., Basal N. K., Hrishikeshan D. S. y Bansal P. K. (1984). A study of plastic shallow solar pond water heater for domestic applications. Solar Energy 34, 6, 505-512.
- Solar Cookers International. (2004). Solar Cooker Review 10, 2, p. 6. ([http://www.solarcooking.org/newsletters/scr\\_pdfs/scr\\_nov04.pdf](http://www.solarcooking.org/newsletters/scr_pdfs/scr_nov04.pdf))

## ABSTRACT

Thin transparent bags are thermally evaluated for water solar heating. They are made of 70 microns thickness polyethylene, double wall and a hermetic plug. The objective of the study was to obtain 10 liters of water at a temperature greater than 40 - 60°C in a practical and simple way, for sanitary use by different persons (backpackers, travelers, in economical houses, etc.) The bags were placed horizontally and exposed under solar radiation, in the morning and the afternoon, in the city of Salta. Different thermal behaviors were evaluated: on the floor, on a table and on a black surface with or without thermal insulation. In all the cases, water increased its temperature with a maximum that followed that of the solar radiation, due to thermal inertia. A theoretical simulation was made with Simusol for one of the experiments.

**Keywords:** solar energy, transparent bag, water heating, thin water bag.