

## CALENTADOR SOLAR DE AGUA CON AIRE COMO FLUIDO DE INTERCAMBIO PARA REGIONES DE BAJA TEMPERATURA #

V. Luque, A. Iriarte<sup>1</sup> y A. Hernández<sup>2</sup>

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO - CONICET  
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca  
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. [vhluque@gmail.com](mailto:vhluque@gmail.com)

**RESUMEN:** Los problemas de congelamiento del fluido caloportador en regiones frías con temperaturas bajo cero han sido resueltos mediante el uso de materiales de mayor costo y tecnologías más complejas. En este trabajo se profundiza la idea de calentar aire e intercambiar calor con el agua de manera que el sistema de intercambio no esté expuesto a congelamiento. Se detallan aspectos constructivos, resultados experimentales y comparación con otros tipos de calentadores solares de agua con funcionamiento similar. La eficiencia global promedio obtenida es del orden del 45 %, cumpliendo con las expectativas para bajas temperaturas ambientales. La complejidad constructiva es baja y su costo razonable.

**Palabras clave:** calentador solar agua, calentador solar aire - agua, calentador solar anticongelable

### INTRODUCCION

El desarrollo de la tecnología de los calentadores solares de agua con tubos sobre las placas colectoras tienen más de 40 años y la de chapas soldadas aproximadamente 20 años, ninguna de las dos ha resuelto satisfactoriamente los problemas de congelamiento en regiones de clima frío con temperaturas nocturnas menores de los 10 °C bajo cero (Davey E., 1966; Morris W., 1980; Morrison y Ranatunga, 1980; Garg *et al.*, 1992; Mohamad A., 1997)

La región noroeste de la República Argentina está caracterizada por los altos niveles de radiación solar incidente, la cual puede ser empleada para el calentamiento de agua. En zonas frías o de alta montaña las temperaturas nocturnas descienden abruptamente con el consiguiente peligro de congelamiento del agua produciendo el daño en los dispositivos.

En las regiones frías tanto el colector como el acumulador normalmente están protegidos. Habitualmente los colectores usan líquidos anticongelantes (glicoles) e intercambiador en los tanques. En realidad esta solución resuelve no solo el problema de congelamiento sino también la corrosión de los mismos, pero sus costos y manejo se tornan inviables para la Puna argentina. La solución de placas de acero inoxidable como placa colectoras, tiene el problema que, si bien demostraron que no se rompen ante el congelamiento del fluido caloportador, su entrada en funcionamiento cuando sale el sol no es inmediata, sino que gasta mucha energía en descongelar el hielo formado en su interior (Iriarte *et al.*, 1988), lo cual disminuye su eficiencia global. Tampoco resuelve el problema de los costos.

El prototipo de calentador solar híbrido de aire - agua desarrollado por Iriarte *et al.* (2008) emplea como intercambiador aire - agua dos placas planas de acero inoxidable de 2 m<sup>2</sup> de superficie de intercambio soldadas entre sí, formando un conducto por donde circula el agua. Este intercambiador plano de acero inoxidable, similar al que usan como placas en colectores planos, resuelve el problema técnico, superando en eficiencia global a los tradicionales en las regiones de baja temperatura, pero su costo reduce mucho las posibilidades de ganar mercado. Sin duda, la solución para este problema es un balance entre el costo, la eficiencia, mantenimiento y operación.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento experimental de un calentador solar de agua con un intercambiador de aire - agua. Se describen las componentes, los detalles constructivos y el análisis de las temperaturas en las diferentes secciones del mismo. Se analiza el comportamiento energético y se comparan los resultados experimentales con otros tipos de intercambiadores ensayado oportunamente por el grupo de investigación.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Al calentador solar de agua lo consideramos formado por tres subsistemas, dos de ellos, colector e intercambiador están contenidos en una caja rectangular cuyas paredes laterales e inferior están aisladas térmicamente y unidos a través de conductos de aire y el tercero es el tanque aislado. El intercambiador y el tanque de almacenamiento se unen por medio de cañerías las cuales están aisladas a efecto de disminuir las pérdidas de calor.

#### *Subsistema de colección*

---

# Parcialmente financiado por PFIP, UNCa

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Salta

El colector solar de aire es de diseño convencional, formado por una caja rectangular con doble cubierta, la interior de vidrio de 0,003 m de espesor y la exterior de policarbonato alveolar de 0,004 m, la placa colectora es una chapa de hierro ondulado pintada de negro de 2 m<sup>2</sup> de superficie. La cubierta interior con la placa colectora forman un ducto, estableciéndose otro ducto entre la placa colectora y el intercambiador aire - agua.

#### **Subsistema de intercambio**

Como sistema de intercambio, en la búsqueda de alternativas de abaratamiento de los materiales empleados pero que tengan una adecuada eficiencia, se utilizó una bolsa de goma negra que tiene un área de intercambio de 2 m<sup>2</sup>. El ingreso del agua se realiza por la parte inferior y la salida por la parte superior.

#### **Subsistema de almacenamiento**

Está formado por un tanque de 120 litros de capacidad de polietileno de alta densidad, alto peso molecular y alta resistencia, el cual se encuentra adentro de otro tanque de hierro que lo protege del ambiente y es el contenedor de la aislación térmica. Esta última está formada por poliestireno granulado y lana de vidrio.

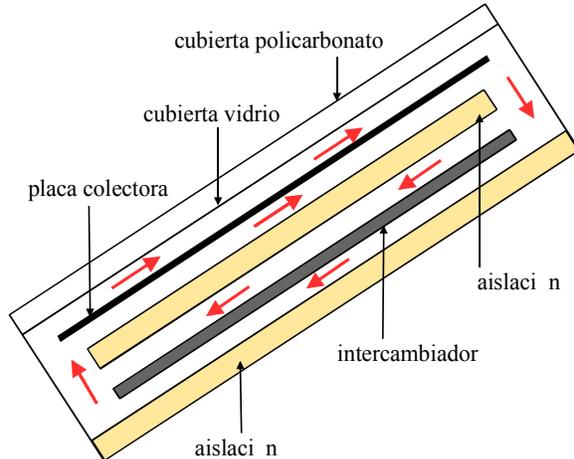


Fig. 1. Esquema del colector e intercambiador



Fig. 2. Vista del calentador solar de agua

#### **Funcionamiento del sistema**

El sistema trabaja en convección natural. El aire dentro del colector, por efecto de la radiación solar se calienta y asciende, cuando llega a la parte superior desciende por los conductos formados por las paredes de la caja y el intercambiador transfiriendo parte del calor al agua contenida en el intercambiador aire-agua. El aire que está ahora a menor temperatura, luego de haber transferido parte de su calor al agua, se convierte nuevamente en el aire de entrada del colector, cerrándose así el ciclo de térmico del aire.

El agua que se calentó circula a través de la placa intercambiadora de abajo hacia arriba, en sentido opuesto al del aire alrededor del colector. Una vez en la parte superior del intercambiador asciende al tanque de almacenamiento y es recogida en la parte media del mismo. El agua de entrada al intercambiador se obtiene de la parte inferior del depósito de almacenamiento, lugar por donde ingresa el agua de la red de distribución domiciliar cuando se produce el consumo de agua caliente. Por lo tanto existe una estratificación de temperatura en el agua del tanque, con temperatura fría en la base y más caliente en la parte superior, este proceso continua hasta que la temperatura del tanque de almacenamiento alcanza su valor mas elevado.

#### **Modalidad de consumo**

Los ensayos se realizaron bajo dos modalidades: con y sin extracción de agua. Para la modalidad de extracción de agua se utilizó el criterio de extraer durante el día un volumen de agua igual al almacenado, en este caso 120 litros distribuidos en tres extracciones a lo largo del día: 40 litros por la mañana antes de la salida del sol (8 h), 40 litros al mediodía solar (14 h) y 40 litros por la tarde, luego de la puesta del sol (18 h).

#### **Sistema de Medida**

Para la medición de las temperaturas en el colector, intercambiador y en el tanque de almacenamiento se utilizaron termopares de cobre-constantán (Tipo T) calibrados con una precisión de  $\pm 0,5$  °C, conectadas a un sistema de adquisición de datos integrado por cuatro módulos ADAM 4018M los cuales tiene una resolución de 16 bits y un conversor RS-232 a RS-420/485/ ADAM 4520, la radiación solar sobre superficie inclinada de igual ángulo al del colector se mide con un piranómetro Kipp & Zonen que esta conectado al sistema de adquisición de datos antes descrito. Estos sistemas están alimentados con una UPS para garantizar el suministro de energía durante algún corte de electricidad. Otros parámetros tales como: temperatura ambiente velocidad de viento, radiación horizontal y humedad relativa se midieron con una estación meteorológica HOBO Micro Station Data Logger.

## ANÁLISIS TEÓRICO

El calor ganado por el sistema de acumulación esta dado por:

$$Q_G = M_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i}) \quad (1)$$

Donde  $T_{w,f}$  es la temperatura final del agua del proceso de acumulación y  $T_{w,i}$  es la temperatura inicial del agua del proceso de acumulación.

El calor extraído por el consumo es:

$$Q_{Ex} = M_{w,e} C_w (T_{w,e} - T_{a,ex}) \quad (2)$$

Donde  $T_{w,e}$  es la temperatura del agua a la salida del tanque de acumulación durante la extracción y  $T_{a,ex}$  la temperatura ambiente exterior a la hora de la extracción.

La energía ganada en el día esta dada por:

$$E_D = Q_G + Q_{Ex} \quad (3)$$

El calor perdido por el sistema de acumulación durante la noche es:  $Q_P = M_w C_w (T_{w,n} - T_{w,d})$

$$(4)$$

El calor residual a las 8 h es:

$$Q_R = M_w C_w (T_{w,d} - T_{a,ex}) \quad (5)$$

La eficiencia global del sistema se determinó mediante la relación entre la energía ganada en el día y la radiación solar recibida sobre superficie inclinada.

Sin extracción:

$$\eta = \frac{Q_G}{I A} \quad (6)$$

Con extracción:

$$\eta = \frac{Q_G + Q_{Ex}}{I A} \quad (7)$$

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los ensayos se realizaron durante 6 meses, en situaciones de no extracción de agua y con extracción de agua, a los fines de la presentación de los resultados y mostrar las características térmicas del calentador de agua, se seleccionó un día con buena radiación solar. Los gráficos mostrados en este trabajo corresponden a un día de funcionamiento, con extracción de agua.

En la figura N° 3 se muestran las temperaturas del aire alrededor de la placa colectora, por arriba de ella ( $T_{a,sC}$ ), por debajo de la misma ( $T_{a,dC}$ ) y la temperatura ambiente exterior ( $T_{a,ex}$ ) en función de la hora local. Se destaca que la temperatura del aire sobre la placa colectora alcanza un máximo de 77,8 °C con una radiación al mediodía solar de 830 W/m<sup>2</sup>. En la misma figura, también se observa que la temperatura máxima del aire por arriba de la placa está a 60 °C por encima de la temperatura ambiente exterior. Por la tarde al disminuir la radiación incidente (17 h), la temperatura del aire por debajo de la placa es levemente superior que por encima de esta.

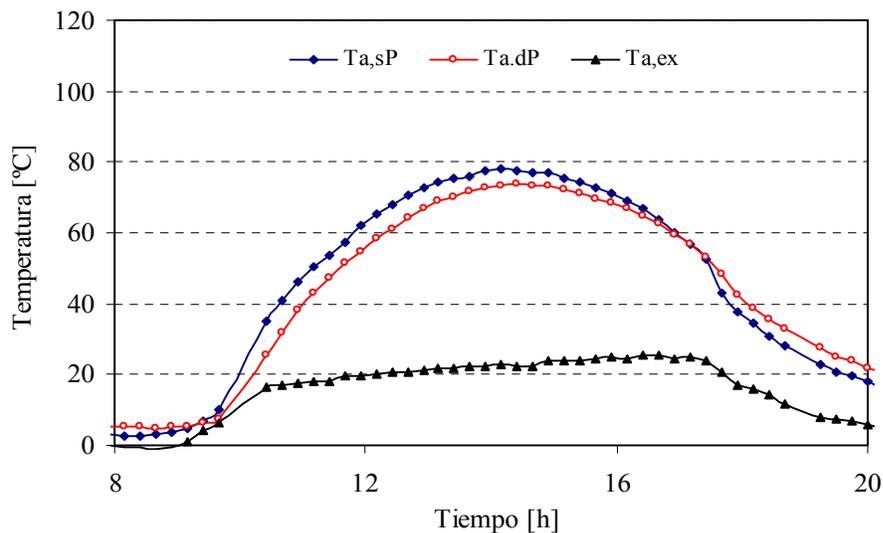


Fig. 3. Temperaturas del aire alrededor de la placa colectora

En la figura N° 4 se exponen las temperaturas del aire a la entrada del colector ( $T_{a,eC}$ ), a la salida de este ( $T_{a,sC}$ ) y la temperatura del aire sobre el intercambiador ( $T_{a,sI}$ ) todas ellas en función de la hora local. La temperatura del aire a la salida del colector es la temperatura de entrada del aire al intercambiador y la temperatura de entrada del aire del colector es la temperatura del aire de salida del intercambiador. La temperatura máxima alcanzada por el aire a la entrada del intercambiador es de  $96,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la temperatura máxima del aire sobre el intercambiador es de  $39,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

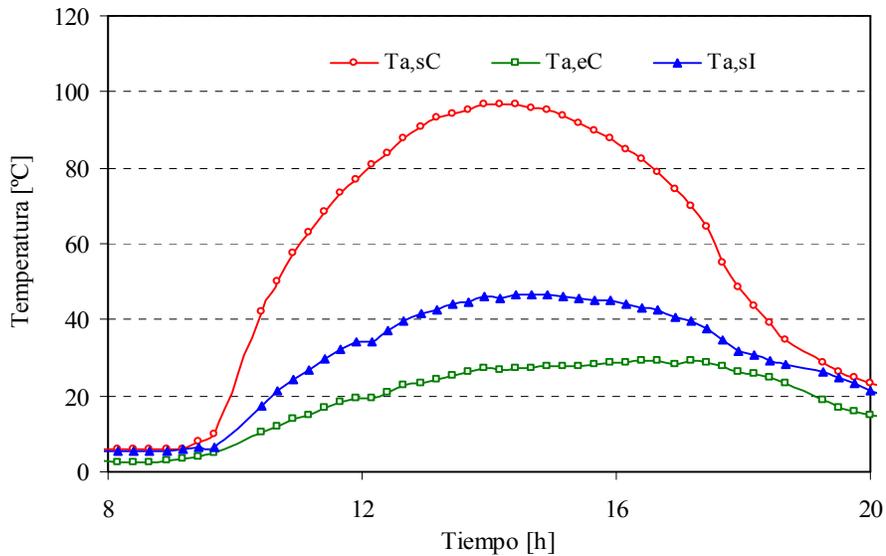


Fig. 4. Temperaturas del aire a la salida y entrada del intercambiador

En la figura N° 5 se muestra la temperatura del aire sobre el intercambiador ( $T_{a,sI}$ ), la temperatura sobre la superficie del intercambiador ( $T_{p,I}$ ) y la temperatura del aire debajo del intercambiador ( $T_{a,dI}$ ) en función de la hora local. El valor máximo de la temperatura del aire alrededor de la placa es de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , las temperaturas promedio del aire sobre el intercambiador y debajo del intercambiador son  $31,08\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $35,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente, la temperatura promedio sobre el intercambiador es de  $28,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

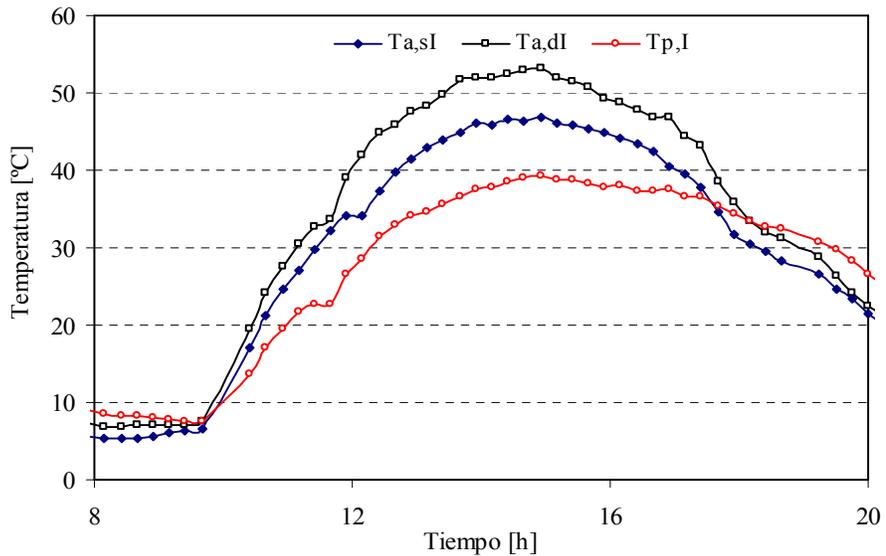


Fig. 5. Temperaturas del aire alrededor y en la superficie del intercambiador

En la figura N° 6 se muestran las temperaturas del agua a la salida del intercambiador ( $T_{w,sI}$ ), la temperatura promedio del agua en el tanque de acumulación ( $T_{w,T}$ ) y la temperatura de ambiente exterior en función de la hora local. La temperatura promedio agua del tanque es de  $30,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la temperatura máxima del agua a la salida del intercambiador es de  $41,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observa una aceptable recuperación térmica del agua acumulada

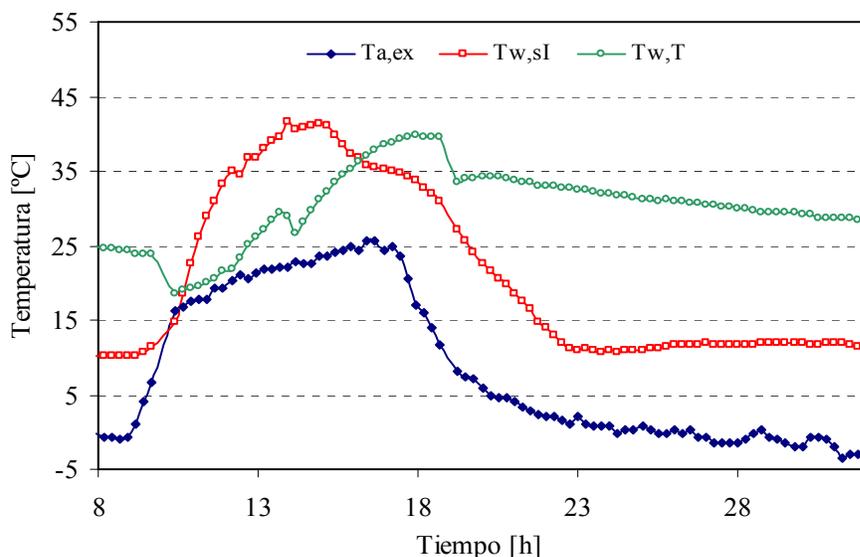


Fig. 6. Temperaturas ambiente exterior, agua a la salida del intercambiador y promedio en el tanque

En la figura N° 7 se muestran las temperaturas del aire a la entrada ( $T_{a,eC}$ ), aire a la salida ( $T_{a,sC}$ ) del colector y las temperaturas del agua a la entrada ( $T_{w,eI}$ ) y salida ( $T_{w,sI}$ ) del intercambiador. Se observa una amplitud térmica máxima de 70,13 °C entre las temperaturas del aire de salida y de entrada del colector y una diferencia máxima de 21 °C entre la temperatura del agua a la entrada y a la salida del intercambiador.

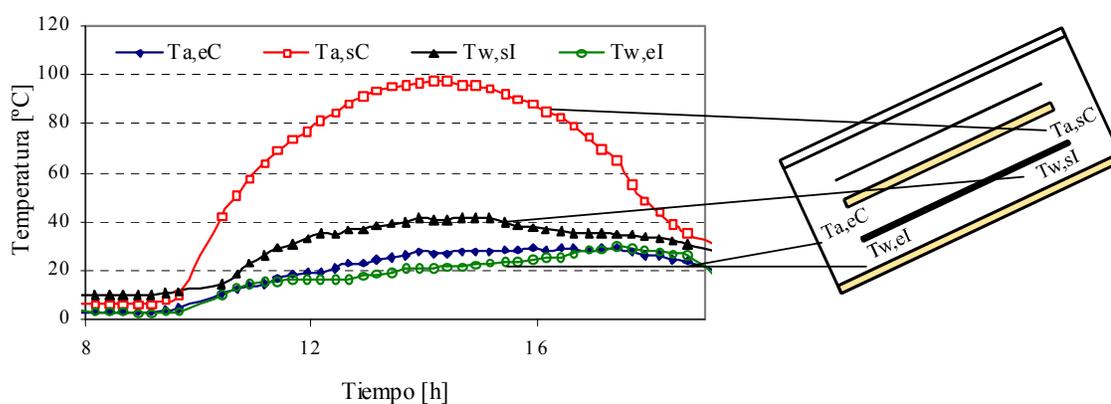


Fig. 7. Temperaturas del aire a la entrada y salida del colector y temperaturas del agua a la entrada y salida del intercambiador

En la figura N° 8 se muestran las temperaturas del agua en el tanque de almacenamiento en sus diferentes capas, en función de la hora local. La temperatura en la capa 1 es la denominada T1 y la temperatura en la capa 4 es la denominada T4. Se observa claramente la estratificación del agua. Existe una diferencia de temperaturas promedio de 5,6 °C entre las capas 2 y 1, entre las capas 3 y 4 la diferencia promedio de temperaturas es de 0,31 donde la temperatura en la capa 3 es levemente superior a la temperatura en la capa 4 porque la entrada del agua proveniente del intercambiador está ubicada entre las capas 2 y 3 y entre las capas 3 y 2 la diferencia promedio de temperaturas es de 3,67 °C.

En esta figura se observa una disminución de temperaturas a las 9,67 h, 13,92 h y 18,67 h por efecto de las extracciones que están siendo realizadas a esas horas, siendo mas pronunciada esta baja en la temperatura de la capa 1 en la extracción ejecutada las 13,92 h ya que a dicha sección esta ingresando agua desde la red domiciliar que tiene una temperatura menor que la acumulada en la capa 1. Las temperaturas promedio del agua de las capas 1, 2, 3 y 4 fueron 24,39 °C, 30,04 °C, 33,45 °C y 33,15 °C respectivamente. Las pérdidas en el tanque entre las 6 p.m. y las 8 a.m. son de 2,62 MJ.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente correspondientes al funcionamiento del calentador solar de agua con aire como fluido de intercambio durante 8 días bajo la condición sin extracción de agua y durante 4 días en la condición con

extracción de agua, se calcularon las energías definidas en el análisis teórico, como también la eficiencia global, las que se muestran en la tabla 1 en donde se exponen en comparación con los resultados obtenidos de las medidas experimentales correspondientes al calentador solar híbrido de aire – agua que usa como sistema de intercambio una placa de acero inoxidable y otros sistemas de calentamiento solar de agua de funcionamiento similar.

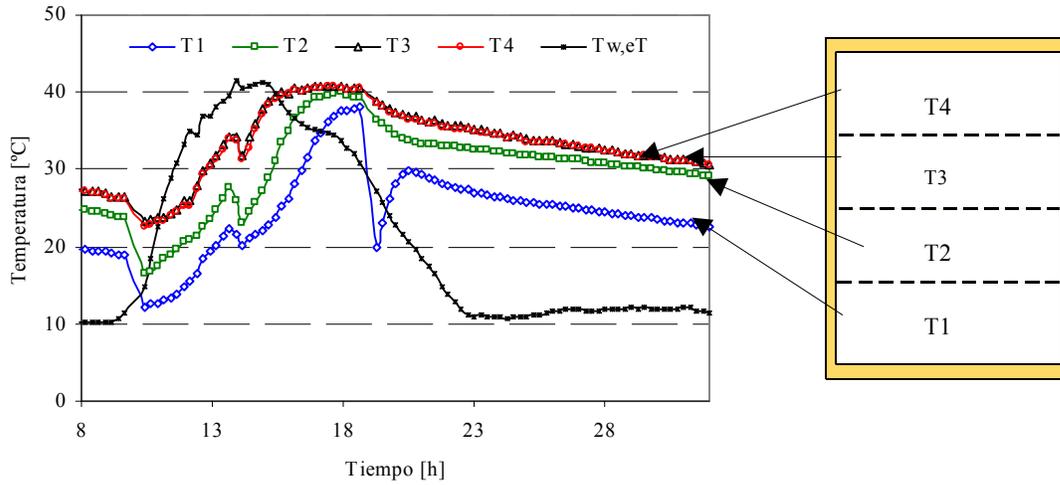


Fig. 8. Distribución de temperaturas del agua en el tanque de almacenamiento

En la tabla 1 se observa que para radiación sobre colector del mismo orden, el comportamiento tanto del intercambiador de acero inoxidable como el de bolsa, ambos sin extracción de agua presentan una eficiencia global similar del 23 %. Para el caso con extracción de agua las energías ganadas durante el día por los intercambiadores de acero inoxidable y de bolsa son similares, observándose una mayor eficiencia global en el caso del intercambiador de bolsa puesto que para igual energía ganada en el día el intercambiador de bolsa recibió menor radiación. Asimismo se observa que la energía residual a las 8 h es mayor en el caso del intercambiador de acero inoxidable comparada con la del intercambiador de bolsa, situación que se explica porque fueron realizadas las experiencias en distintas épocas del año.

Tabla 1. Comparación de los ensayos actuales con los obtenidos con equipos similares

		Tanques cilíndricos convección natural		Intercambiador compacto con tanque intermediario convección natural		Intercambiador acero inoxidable convección natural		Intercambiador bolsa goma convección natural	
		con extracción	con extracción	con extracción	sin extracción	con extracción	sin extracción	con extracción	
		15/06/83	28/08/84	29/08/84	03/08/08	12/03/09	24/07/09	15/07/09	
Radiación sobre colector	[MJ]	45,1	41.1	42.2	42.52	52.78	44.27	37.79	
Energía residual a las 8 h	[MJ]			8.5	16.54	18.56	19,83	12.56	
Energía perdida durante noche	[MJ]			4	5.63	3,43	4.34	2.62	
Energía ganada en el día	[MJ]	19	22.4	21	9.96	22.58	10.54	21.01	
Energía consumida	[MJ]	9,4	9.5	13.9	-	12.74	-	11.87	
Energía total acumulada	[MJ]	19	22.4	29,5	26.5	41.14	30.37	33.66	
Energía perdida 18 – 20 h	[MJ]	0,5	0.4	1.2	-	-	-	-	
Energía residual a 20 h	[MJ]	9,1	12.5	14.4	-	-	-	-	
Eficiencia global diaria		42,1	54.2	49.8	23.43	42.79	23.81	55.6	
Velocidad de viento promedio	[km/h]		6.8	10.9	4,36	4.37	3.60	1.86	
Área de intercambio	[m <sup>2</sup> ]	4.2	13	13	2	2	2	2	

También se observa que las eficiencias globales son similares en el caso de los calentadores solares de agua con intercambiador de acero inoxidable y con intercambiador de bolsa respecto de los sistemas de calentamiento solar de agua con tanques cilíndricos y con intercambiador compacto pero utilizando estos últimos mayor área de intercambio.

#### NOMENCLATURA

- A Área de colección del colector [m<sup>2</sup>]
- C<sub>w</sub> Calor específico agua [J kg<sup>-1</sup> °C]
- I Irradiación solar
- M<sub>w</sub> Masa de agua en el tanque de acumulación [kg]

$M_{w,e}$	Masa de agua extraída [kg]
$Q_G$	Calor ganado por el sistema de acumulación [MJ]
$Q_{Ex}$	Calor ganado por el sistema de acumulación [MJ]
$Q_p$	Calor perdido por el sistema de acumulación [MJ]
$T_1$	Temperatura promedio del agua en la capa 1 del tanque de acumulación [°C]
$T_2$	Temperatura promedio del agua en la capa 2 del tanque de acumulación [°C]
$T_3$	Temperatura promedio del agua en la capa 3 del tanque de acumulación [°C]
$T_4$	Temperatura promedio del agua en la capa 4 del tanque de acumulación [°C]
$T_{w,n}$	temperatura final del agua del proceso de acumulación [°C]
$T_{w,d}$	temperatura inicial del agua del proceso de acumulación [°C]
$T_{w,e}$	temperatura del agua a la salida del tanque de acumulación durante la extracción [°C]
$\eta$	Eficiencia global del sistema de acumulación

## CONCLUSIONES

El calentador solar de agua con aire como fluido de intercambio que utiliza una bolsa de goma como intercambiador tiene una eficiencia global promedio del 45% y cumpliendo las expectativas para bajas temperaturas ambientales. La recuperación térmica del agua acumulada es aceptable.

La durabilidad del intercambiador aumenta al no recibir radiación directa y no estar formado por partes metálicas que puedan estar sujetas a procesos corrosivos.

El tiempo de construcción ha disminuido sensiblemente respecto de los desarrollos anteriores, ya que no hay dificultades constructivas y su costo es razonable. Es una alternativa válida para su empleo en zonas de bajas temperaturas nocturnas.

## REFERENCIAS

- Davey E. T. Solar water heating, Building Materials Magazine, Vol 8, N° 1, 1966.
- Garg H. P., C. Choudhury, Ranjana Jha. Performance prediction of a hybrid air-to-water solar heater. Renewable Energy, Vol.2, N° 3, pp 211-218, 1992
- Iriarte A., C. Rodríguez, V. García, V. Luque y L. Saravia. Calentador solar híbrido de aire – agua: Ensayo experimental y simulación. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, pp. 03.103 – 03.109, 2008
- Iriarte A., J. Marchioli, J. R. Sequi, C. Rodríguez, R. Herrera y A. Amaya. Ensayo y optimización de equipos solares en Laguna Blanca – Catamarca. Actas 13va Reunión Asociación Argentina de Energía Solar, pp 163 – 167, 1988
- Mohamad A.A. Integrated solar collector-storage tank system with thermal diodeSolar Energy, Volume 61, Number 3, pp. 211-218, 1997
- Morris W. S. Development of an experimental test apparatus for natural convection solar collectors. 5th Natl. Passive Solar Conf. Amherst, Mass., 19-26 Oct. 1980.
- Morrison, G. ; Ranatunga, D. Thermosyphon circulation in solar collectors. Solar Energy, vol. 24, no. 2, p. 191-198, 1980

**ABSTRACT:** The problems caused by freezing of the heat provider fluid in cold regions with below zero temperatures have been solved increasing the equipment cost. This work goes deeper into the idea of heating air and exchange heat with water so that the exchange system is not exposed to freezing. The construction aspects are detailed as well as the experimental results and the comparison with other types of solar water heaters with similar operational systems. The average global efficiency obtained is approximately 45%, thus meeting the expectations for low environmental temperatures. The construction complexity is low and the cost is manageable.

**Key words:** solar water heater, solar air-water heater, solar antifreezing heater