

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN COLECTOR CON ACUMULACIÓN INTEGRADA DE DOS TANQUES CON SUPERFICIES REFLECTANTES Y CUBIERTA DE POLICARBONATO**

**Javier H. Garnica, Jorge R. Barral, Alberto S. González y Juan M. Lucchini**  
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería - Departamento de Mecánica  
Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto  
Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: jbarral@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** El objetivo de este trabajo es analizar experimentalmente el comportamiento de un colector con acumulación integrada de dos tanques horizontales, superficies reflectantes y cubierta de policarbonato, a fin de determinar la capacidad del mismo para proveer agua caliente. A un prototipo construido en la Universidad Nacional de Río Cuarto se le midieron temperaturas a la entrada, a la salida y en lugares intermedios, a la vez que se analizaron la radiación solar incidente y la temperatura ambiente durante varios días. Los resultados se presentan en diagramas que muestran la evolución de las temperaturas en función del tiempo y se realiza un cálculo estimativo de la cantidad de agua caliente que podría proveer el sistema. Se llega a la conclusión de que el sistema posee una buena capacidad de captación y almacenamiento de energía y que sería capaz de proveer una fracción solar aceptable en un servicio de tipo residencial.

**Palabras clave:** Colector con acumulación integrada, superficies reflectantes, agua caliente, uso residencial.

### **INTRODUCCIÓN**

Las dificultades para la penetración en el mercado del calentamiento solar de agua se magnifican en Argentina debido básicamente a la baja conciencia conservacionista de la población, a la inexistencia de políticas gubernamentales que promuevan el uso de energías renovables, y al bajo precio del gas natural. Mientras se trabaja en los ámbitos que corresponda para mejorar los dos primeros aspectos enunciados precedentemente, la única alternativa para la adopción de esta opción energética por algunos sectores de la población es la imposición natural de estos sistemas por su conveniencia económica (Morrison y Word, 1999).

Los sistemas termosifónicos y de circulación forzada a partir de colectores planos, son de un precio relativamente alto y no resultan atractivos para su utilización en las ciudades con redes de gas natural bien expandidas. Por otro lado, en las poblaciones más pequeñas y aisladas o periferia de las grandes ciudades donde no llega el gas natural, generalmente la situación económica de sus habitantes es relativamente comprometida como para realizar inversiones iniciales elevadas.

Los sistemas basados en colectores con acumulación integrada (CAI) tienen la ventaja de un costo más bajo y una simplicidad mayor de montaje (Wong et al., 1996), pero no se encuentran tan desarrollados como los otros mencionados anteriormente en otros países con más cultura solar que la Argentina, en donde prácticamente no se usan. Se pretende entonces trabajar aquí en diseños que se adapten a las posibilidades del mercado local, a la vez que reúnan características técnicas competitivas y aún mejores a lo que se ofrece hoy a nivel internacional.

Se han experimentado muchos modelos de CAIs (Smyth et al., 2006), con distintos tipos de materiales y geometrías. Varios de estos modelos se comercializan hoy, especialmente unos basados en tubos de cobre conectados en serie y otros con tubos evacuados, pero ambas variantes resultan aún muy caras para las posibilidades de los potenciales usuarios argentinos.

El Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto (GES) ha trabajado experimentalmente y analíticamente con CAIs tubulares, consistentes en tubos gruesos conectados en serie (Barral et al, 2002), y con CAIs monotanques con varias cubiertas de policarbonato (Fasulo et al., 2001). Si bien estos dispositivos han demostrado ser eficientes energéticamente y con una recuperación de inversión razonable en el mediano plazo, requieren de un manejo relativamente complejo de tecnología y mano de obra. Es así que basándose en el modelo de un solo tanque propuesto por Smyth et al. (2004) y en la utilización de superficies reflectantes propuestas por Tripanagnostopoulos y Souliotis (2004) se desarrolló un prototipo basado en dos tanque horizontales, cuyo comportamiento se analiza en el presente trabajo.

Una de las premisas fundamentales de este trabajo fue también lograr un dispositivo que sea de construcción relativamente sencilla y con materiales de obtención normal en el mercado local. Para ello se previó en una primera etapa la utilización de tanques de chapa galvanizada pintados de negro mate, superficies reflectantes con láminas alumnizadas, y cubiertas de policarbonato alveolar. Aunque se cuenta con estudios experimentales y analíticos como para realizar un análisis de la transmitancia del policarbonato alveolar utilizado en este prototipo (Barral et al., 2001), no se conocen a ciencia cierta las características termofísicas de muchas de las otras materias primas utilizadas para el desarrollo del prototipo, por lo cual en una primera etapa se realizó este estudio experimental basado en el estudio de la capacidad de producción de agua caliente del dispositivo.

Se realizaron experimentos con los tanques de agua llenos, sin activar la demanda, y durante varios días durante el mes de julio, tomándose datos de temperaturas en el CAI, temperatura ambiente y radiación solar. Los resultados se presentan en los gráficos de evolución de la temperatura en función del tiempo y se realiza un cálculo estimativo de la capacidad media de producción de agua caliente, los cuales muestran la factibilidad de aplicación de estos sistemas para uso residencial.

### DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Se comenzó con un estudio analítico aproximado de las posibilidades de obtención de energía de un sistema como el descrito, en función de estudiar la cantidad de radiación que podía llegar en un año a una determinada superficie plana en la ciudad de Río Cuarto con una inclinación igual a la latitud del lugar más 10 grados. De esta manera, se realizó lo siguiente:

a) Supuesta una demanda de una familia tipo de cuatro integrantes, se determinó que el colector contaría con dos tanques conectados en serie, de aproximadamente  $0,075 \text{ m}^3$  cada uno. Dichos tanques tienen una diámetro aproximado de  $0,30 \text{ m}$ , y una longitud de  $1,00 \text{ m}$ . En la fijación de estas medidas se tuvo en cuenta la disponibilidad de chapa galvanizada del mercado para minimizar la mano de obra.

b) Con estas dimensiones y usando los datos climáticos característicos de Río Cuarto se confeccionó un programa para calcular la energía colectada para distintas áreas del colector para cualquier día del año, y en función de los resultados y de la masa de agua se decidió que el área del colector debía ser de  $2 \text{ m}^2$  aproximadamente.

c) Para el diseño de la superficie reflectante, una vez establecidas las dimensiones del colector, y a partir de la información obtenida de algunas publicaciones (Souliotis M. y Tripanagnostopoulos, 2004) se utilizó un perfil formado por el empalme de una curva evolvente y una curva parabólica, para lo cual se diseñó un programa para el cálculo de estas curvas. Se observa la determinación de la forma de la superficie reflectante en la Figura 1 que es un corte transversal de la misma, que se extiende todo a lo largo de un tanque y a ambos lados del mismo.

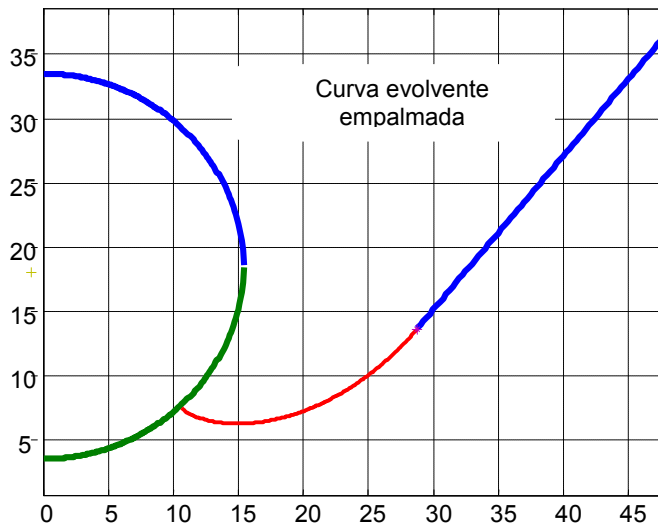


Figura 1. Determinación de la forma de la superficie reflectante.

A partir de esta geometría básica, se dispusieron los tanques y las superficies reflectantes como se muestra en la Figura 2, con incidencia de la radiación directa a  $0^\circ$  respecto a la perpendicular a la cubierta transparente del colector, y en la Figura 3, con incidencia de los rayos solares con ángulos de  $30^\circ$  y  $15^\circ$  respecto a la perpendicular a la cubierta transparente. Se muestra allí cual sería el sentido de las reflexiones de los rayos directos del sol.

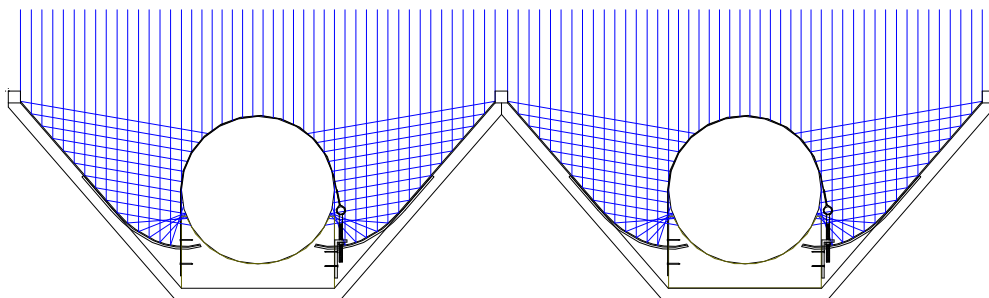


Figura 2. Corte transversal de los tanques del CAI e incidencia de radiación directa a  $0^\circ$ .

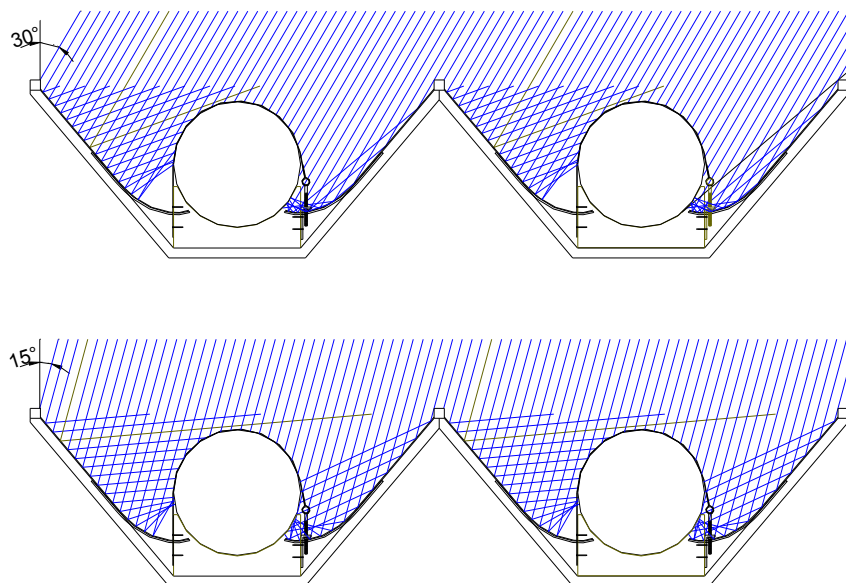


Figura 3. Corte transversal de los tanques del CAI e incidencia de radiación directa a 30° y 15°.

d) Se montó el colector íntegramente en el laboratorio del GES. Sólo se hicieron construir en empresas locales los tanques de chapa galvanizada y se hicieron plegar algunas chapas para la cubierta exterior del CAI. Se realizaron pruebas hidráulicas a la presión real de trabajo de los tanques, verificándose la resistencia de los mismos. En su operación normal, el CAI funciona con una presión de unos 5 metros proveniente de un tanque similar al de una instalación residencial. Se estudiaron distintos materiales para la realización de las superficies reflectantes, adoptándose material de alto impacto como elemento estructural para la superficie y una lámina aluminizada brillante (cobertura de golosinas) como elemento reflector. Luego de algunos ensayos, se adoptó un pegamento de la firma 3M para adherir la lámina al material de alto impacto, la cual presentó muy buena adherencia y resistencia a la temperatura. Como aislante se utilizó lana de vidrio de 50 mm y una cubierta sintética de 5 mm con una cara aluminizada. Para la cubierta se utilizó policarbonato alveolar de 4 mm, construyéndose un marco de chapa galvanizada con burletes de goma comerciales de 5 mm por 15 mm para lograr un cierre impermeabilizado.

En la Figura 4 (a) se muestra la estructura soporte, el material de alto impacto aún sin cobertura reflectante, y un conjunto tanque-superficie reflectante ya montado. En la Figura 4 (b) se observan los dos tanques montados, parte del aislamiento de lana de vidrio y el recubrimiento exterior del colector de chapa galvanizada. Los tanques se mantienen en la estructura mediante flejes de chapa galvanizada como se observa allí, los que todavía no han sido pintados de negro mate. El costo total de los materiales utilizados, incluida la fabricación de los tanques, fue de aproximadamente \$ 635 (US\$ 205).



(a)



(b)

Figura 4. (a) estructura portante con superficies reflectantes y tanque; (b) tanques ya montados con parte del aislante y cobertura exterior de chapa galvanizada.

En la Figura 5 (a) se muestra la parte posterior del CAI, aún sin el aislante y la tapa exterior, y en la Figura 5 (b) está el CAI ya cerrado con la cubierta de policarbonato, observándose a la izquierda la entrada de agua fría, por la parte baja y la salida de agua caliente en la parte superior. A los efectos de aprovechar los beneficios de la estratificación (Alizadeh, 1999) las entradas a los tanques son por la parte inferior y las salidas por la parte superior; así, en la conexión en serie que se realiza entre ellos, una cañería sale de la parte superior del tanque inferior y entra en la parte inferior del tanque superior, no visible porque queda dentro del CAI en la cara opuesta a las de las entrada y salida. Estas conexiones, como así también las entradas y salidas del CAI son hechas con caños de calefacción de automóviles que se encastran abridadas a boquillas de bronce que poseen los tanques.



(a)



(b)

Figura 5. (a) vista posterior del CAI aún sin aislante; (b) CAI ya cerrado, se observan a la izquierda la entrada y la salida del agua.

## ENSAYOS REALIZADOS

Dada la alta inercia térmica de estos sistemas, y para contabilizar el efecto de las pérdidas nocturnas que habitualmente son altas (Tripanagnostopoulos et al., 2002), el CAI fue ensayado en secuencias de varios días y en forma continua durante día y noche. A tal fin se dispusieron termocuplas en el interior de los tanques en cada una de las conexiones de entrada y salida de los mismos. En la Figura 6 se esquematiza la disposición de las termocuplas y los termómetros digitales a los cuales estuvieron conectadas. Las termocuplas son tipo K y los termómetros, de la marca TES, son digitales con capacidad de grabación de datos, los que luego se pueden descargar en la computadora. Para la colocación de las termocuplas se perforaron unas partes de cañería de cobre colocadas ex-profeso entre las mangueras de conexión.

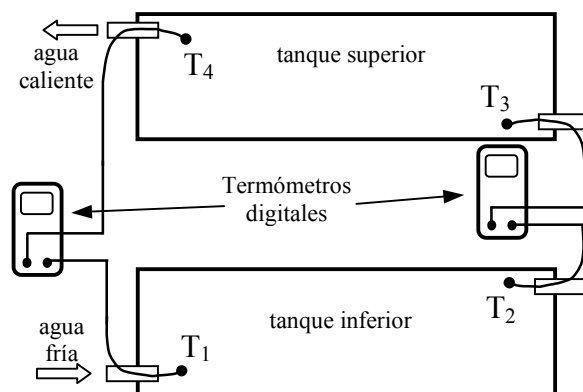


Figura 6. Posicionamiento de las termocuplas en el interior de los tanques del CAI

De esta manera, la termocupla  $T_1$  está sensando la temperatura del agua proveniente de la red o del tanque de almacenamiento no aislado de la vivienda, y la termocupla  $T_4$  indicaría la temperatura del agua a la salida.  $T_2$  mide la temperatura a la salida del tanque inferior y  $T_3$  la de la entrada al tanque superior. La radiación solar global horizontal también fue medida durante los días de ensayo mediante el piranómetro de precisión marca EKO, modelo SBP 801, que el Grupo de Energía Solar tiene dispuesto para registrar datos en forma permanente.

## RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 7 se observan los resultados obtenidos para 5 días del mes de julio que fueron mayormente soleados, con un día nublado, y temperaturas nocturnas bastante bajas (línea roja) que llega incluso una noche a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para evitar dificultades en la lectura del gráfico, no se han representado los valores leídos por  $T_2$  y  $T_3$ , que se presentan en otro gráfico con su propia interpretación física. Así, en orden descendente y sin producirse ningún cruzamiento entre las lecturas, salvo unas dos horas al inicio, tenemos la temperatura de la salida del CAI ( $T_4$ , línea azul), la temperatura de la entrada del CAI ( $T_1$ , línea verde), y temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ , línea roja). En el eje de la derecha se leen los valores de radiación solar global horizontal, que están representados por la línea negra. Se debe aclarar que el conteo de las horas comienza a las 9 horas del primer día (hora solar). Se nota allí que durante un pequeño intervalo de tiempo la temperatura ambiente supera a la del agua de entrada.

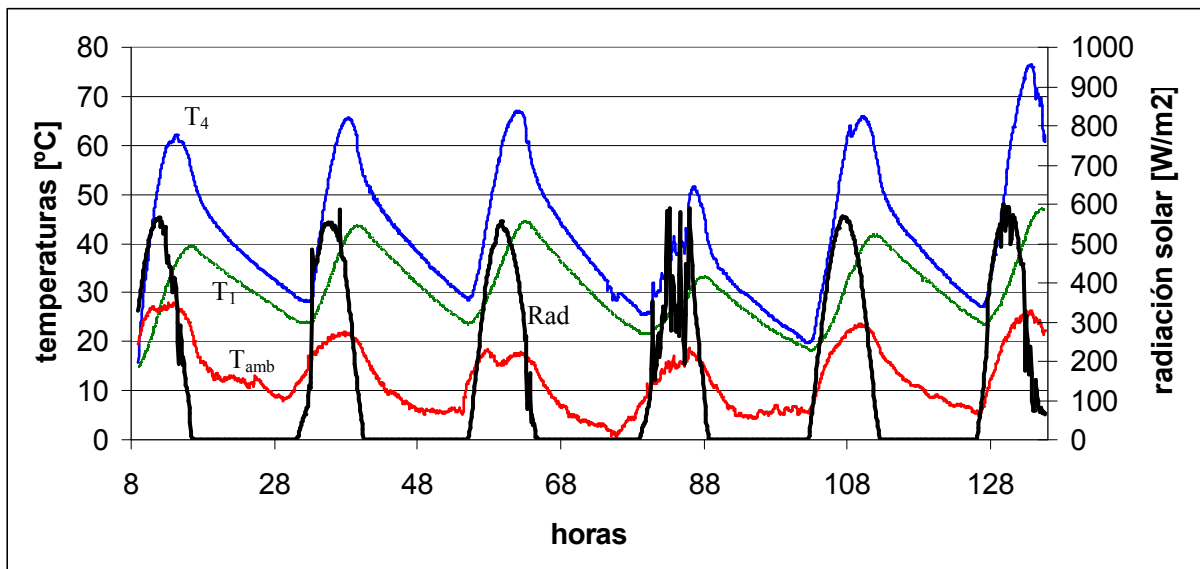


Figura 7. Temperaturas desde el 20 al 25 de julio de 2006 para la entrada y la salida del CAI, temperatura ambiente y radiación solar global horizontal.

En la Figura 7 se observa que en los tres días iniciales soleados, los picos de temperatura máxima alcanzada en la parte más alta del tanque superior van creciendo día a día hasta alcanzar unos  $67\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el tercer día, lo cual da cuenta de la gran inercia térmica de este sistema. Asimismo, durante esos tres días sucesivos los valores de temperatura ambiente van descendiendo, lo cual muestra que el sistema no presenta grandes pérdidas de calor y su funcionamiento está fuertemente ligado a los valores de la radiación solar. Ese efecto se ve claramente en el cuarto día, que aparece relativamente nublado, no pudiendo entonces el CAI alcanzar los valores de temperatura de los días anteriores. Como es de esperar, las temperaturas máximas del CAI se dan pasado el mediodía solar, aproximadamente dos horas después, habida cuenta de que si no hay extracción, a pesar de que la radiación solar disminuye pasado el mediodía solar, los tanques aún continúan calentándose.

Aunque se debería realizar un análisis anual para estimar el ahorro energético, se puede predecir con estos resultados, en forma aproximada, la prestación de agua caliente para el mes de julio del sistema si uno considera que el agua va a ser utilizada para que se bañen las personas en la zona de mejor prestación del CAI (unas dos horas después del mediodía solar que tiene lugar aproximadamente a las 13:15 hora local). Estimando una temperatura de baño de  $T_B = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual implica que debe mezclarse con agua fría, que con 50 litros de agua se baña una persona, y con los siguientes datos e incógnita:

Masa total de agua en los tanques,	$m_A = 140$ kilos
Calor específico del agua,	$c$ (no es necesario su valor numérico para este cálculo)
Temperatura a la salida del tanque superior,	$T_S = 62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pico de la curva medida por $T_4$ )
Temperatura a la entrada del tanque inferior,	$T_E = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (en el momento del pico de temperaturas)
Temperatura del agua fría de red,	$T_F = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (medida)
Masa total de agua estimada para el baño de una persona,	$m_T = 50$ kg
Masa de agua fría a mezclar,	$m_F = m_T - 140$

Se puede realizar el siguiente cálculo calorimétrico:

$$\text{Temperatura media del agua } T_M = (T_S + T_E) / 2 = (62 + 40)\text{ }^{\circ}\text{C} / 2 = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$m_T c T_B = (m_T - 140) c T_F + 140 c T_M \quad (\text{ecuación de equilibrio calorimétrico})$$

despejando y resolviendo obtenemos:  $m_T = 185 \text{ kg}$

y de la cantidad de agua estimada para el baño de una persona

número de baños =  $185 \text{ kg} / 50 \text{ kg} = 3,7$  o sea aproximadamente 4 baños a buena temperatura

Evidentemente, para un cálculo preciso, se debería tener un conocimiento de toda la distribución de temperatura en los tanques, ya que los mismos no son rectos y tampoco están expuestos uniformemente a la radiación solar, pero como primera aproximación el resultado obtenido es un buen orientador. Se debe tener en cuenta además, que se está considerando la época con menos cantidad de horas de sol y más fría del año, por lo cual es de esperar que para otros meses, el aprovechamiento sea aún mejor.

En la Figura 8 se grafican además de las temperaturas de entrada y salida del CAI (con los mismos colores que antes), las temperaturas a la salida del tanque inferior ( $T_2$ , línea roja) y a la entrada del tanque superior ( $T_3$ , línea negra). Se pueden observar así las siguientes particularidades:

a) Durante las horas de sol los tanques se estratifican fuertemente y prácticamente por separado. El efecto de la convección natural se manifiesta en una diferencia entre las temperaturas de entrada de los tanques, pero en cada uno de ellos hay una marcada estratificación, para lo cual se deben comparar la línea azul con la negra para el tanque superior, la cual llega a una diferencia máxima de estratificación de aproximadamente  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , y la línea roja con la verde para el tanque inferior, la cual llega a diferencias máximas de estratificación aún algo mayores. La convección en el tanque inferior es más veloz que el pasaje de agua del tanque inferior al superior, lo cual podría deberse a la pérdida de carga que ocasiona la angosta cañería de unión entre ellos.

b) Durante la noche (enfriamiento del sistema) la estratificación disminuye, se acercan todas las curvas, e incluso se produce un cruzamiento entre las temperaturas medidas por  $T_2$  y  $T_3$ , lo cual significa que el agua caliente de la parte superior del tanque inferior está fluyendo por convección natural al tanque superior.

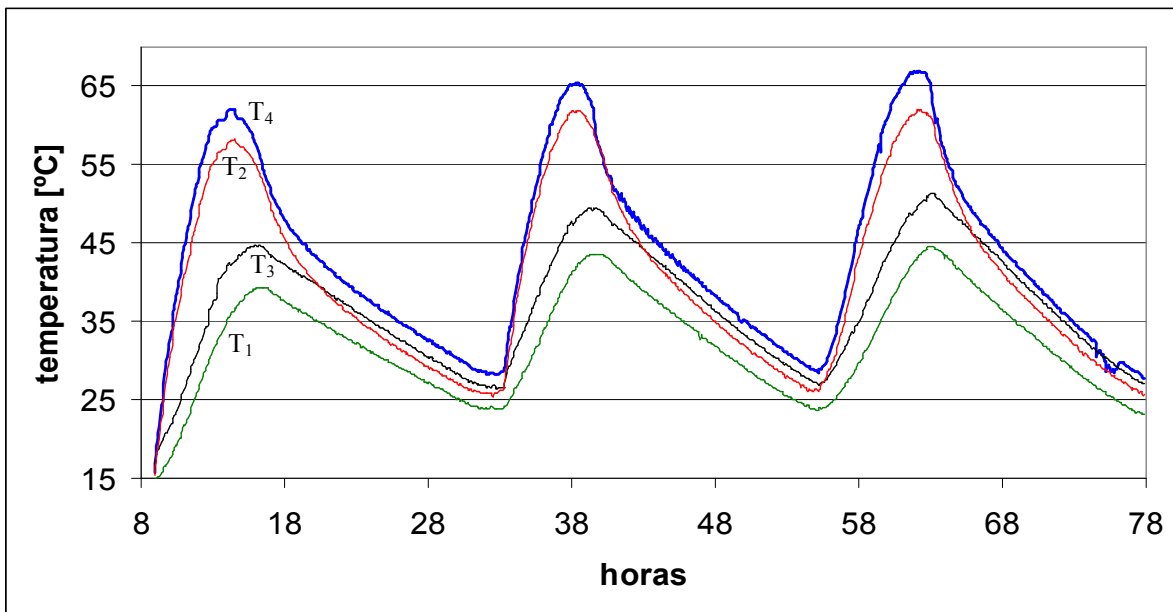


Figura 8. Temperaturas de entrada, salida e intermedias del CAI desde el 20 al 22 de julio de 2006

## CONCLUSIONES

Se ha adquirido experiencia en el conocimiento de la forma de funcionamiento que tiene este sistema de dos tanques horizontales, lo cual permitirá avanzar sobre una modelización del mismo y propuestas de mejoras para aumentar la performance y capacidad de provisión de agua caliente.

Las temperaturas alcanzadas por el sistema son aceptables, máxime teniendo en cuenta que se han realizado las mediciones en la época invernal. Asimismo, la provisión energética para días soleados es muy buena, respondiendo a las previsiones originales de poder entregar una fracción solar importante a una familia tipo de cuatro integrantes. El diseño no presenta grandes pérdidas nocturnas, permitiendo iniciar el día siguiente del ciclo con una cierta temperatura. Se podría analizar cual sería el comportamiento si en vez de policarbonato se utilizara vidrio como cubierta transparente.

Dada la magnificación de los efectos de la convección natural que estratifica fuertemente a cada tanque por separado, para este sistema de dos tanques, el modelo de los “nodos isotérmicos” (Zollner et al., 1985) utilizado en la formulación analítica de los CAIs tubulares no es aplicable para modelizar el comportamiento de este equipo.

Si bien no fue computado un costo para la mano de obra porque se trataba de un prototipo experimental, tomando como referencia el costo de materiales, considerando que la construcción no demanda procesos tecnológicos sofisticados y diagramando métodos de fabricación en serie, este sistema sería muy conveniente para proveer un importante ahorro energético en prestaciones residenciales. Sería mucho más económico que los actuales sistemas termosifónicos, aunque con posibilidades de uso limitadas en las primeras horas del día debido al enfriamiento nocturno.

Como un trabajo a futuro se deberían realizar experiencias con extracciones de agua, para lo cual sería necesario estimar un patrón de demanda temporal, con una elaboración más fina que la del cálculo previo aquí propuesto. Además, luego de realizadas varias experiencias se deberá trabajar en un modelo matemático del sistema para poder realizar simulaciones a largo plazo, reemplazando así la experimentación. Para asegurar la factibilidad de aplicación de estos equipos es necesario además que transcurra un tiempo bastante largo que permita evaluar la resistencia de los materiales utilizados, en particular la chapa galvanizada que podría ser susceptible a la corrosión, para lo cual se está también analizando con una empresa local la posibilidad de utilizar tanques hechos de algún tipo de polímero.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto y está subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC y la Facultad de Ingeniería de la UNRC.

## REFERENCIAS

- Alizadeh S. (1999) An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank. *Solar Energy* Vol. 66, No. 6, pp. 409–421.
- Barral J., G. Morichetti, P. Galimberti, A. Fasulo (2001) Evaluación de la energía solar absorbida por un colector acumulador integrado monotanque con cubiertas de policarbonato alveolar, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 5, pág. 03.31 – 03.36.
- Barral J., Galimberti P., Lema A. , Adaro J. y Fasulo A. (2002) Design, construction and simulation Analysis of a low cost Tubular Integral – Collector - Storage System. *Euro Sun 2002 - The 4th ISES - Europe Solar Congress*. Bologna – Italia.
- Fasulo A., Follari J. y Barral J. (2001) Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. *Solar Energy*, Vol. 71/6, pp. 389-401.
- Morrison G. L. y Wood B. D. (1999) Packaged solar water heating technology, twenty years of progress. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*. Jerusalén, Israel
- Smyth M., Eames P.C., Norton B. (2006) Integrated collector storage solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 503–538.
- Smyth M., Eames P.C., Norton B. (2004) Techno-economic appraisal of an integrated collector/storage solar water heater. *Renewable Energy*, Vol. 29 pp. 1503–1514.
- Souliotis M. y Tripanagnostopoulos Y. (2004) Experimental study of CPC type ICS solar systems. *Solar Energy*, Vol. 76, N° 4, pp. 389-408.
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Nousia T. (2002) CPC type integrated collector storage systems. *Solar Energy*, Vol. 72, No. 4, pp. 327–350.
- Tripanagnostopoulos Y. y Souliotis M. (2004) ICS solar systems with horizontal cylindrical storage tank and reflector of CPC or involute geometry. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 13-38.
- Wong T., Leber J. y Sugar J. (1996) Analysis of various water heating systems. *Reporte de la California Energy Commission, Energy Efficiency Division, Efficiency Technology Office*.
- Zollner, A., Klein, S. A. y Beckman, W. A. (1985) A performance prediction methodology for integral collection-storage solar domestic hot water systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 107, pp. 265-273.

**ABSTRACT:** The goal of this work is to analyse by means of experiments the behaviour of an integral collector storage system composed by two horizontal tanks, reflective surfaces and a polycarbonate cover, in order to determine the ability of this system to provide hot water. Inlet, outlet, and intermediate temperatures were measured to a prototype built in the National University of Río Cuarto, and in the same time the ambient temperature and global horizontal solar radiation were recorded, during a series of days. The results are presented in diagrams, which show the evolution of the temperatures and radiation as a function of time and an estimative calculation is performed in order to check the quantity of hot water the system can provide. The conclusion is that the system has a good absorption and storage energy capacity and it would be able to provide an acceptable solar fraction in a residential service.

**Keywords:** Integral collector storage system, reflective surface, hot water, residential use.