

MERCOFRIO 98 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

ANÁLISIS TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DE UN COLECTOR ACUMULADOR INTEGRADO TUBULAR

Alba Lema - e-mail: alema@ing.unrc.edu.ar

Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería

Ruta Nac. 36 Km. 601 - 5800 Río Cuarto - Argentina

Pablo Galimberti - e-mail: pgalimberti@ing.unrc.edu.ar

Jorge Barral, e-mail: jbarral@ing.unrc.edu.ar

Amílcar Fasulo - e-mail: afasulo@unsl.edu.ar

Universidad de San Luis - Departamento de Física

Chacabuco y Pedernera - 5700 San Luis - Argentina

***Resumen.** Los Colectores Acumuladores Integrados Tubulares, habitualmente presentan el problema de enfriamiento nocturno debido a las grandes pérdidas de energía radiante por la cubierta, lo cual obliga que el ciclo del día siguiente se inicie con agua a temperaturas muy bajas. La posibilidad de conectar la alimentación del colector a la salida de un surgente in situ, que provee agua a 28 °C, resuelve este inconveniente brindando una ventaja significativa respecto al funcionamiento de otros colectores de este tipo.*

En este trabajo, se desarrolla un modelo computacional dinámico simplificado que permite evaluar el comportamiento térmico de un colector acumulador integrado tubular, alimentado con agua a 28°C. Se estudia una unidad genérica y bajo la hipótesis de nodo isotérmico se formula el modelo físico - matemático contemplando el intercambio energético que se produce entre el agua contenida en los tubos, la cubierta y sus alrededores.

El modelo se codifica en FORTRAN y se llevan a cabo simulaciones utilizando datos locales climáticos y una demanda de agua caliente típica. El modelo es validado comparando resultados arrojados por la simulación con datos experimentales obtenidos de un prototipo construido en una granja educativa de la parte central de Argentina.

***Palabras claves:** Colector acumulador integrado, Energía solar, Calentamiento agua*

1. INTRODUCCIÓN

Un Colector Acumulador Integrado Tubular (CAI-T) es un componente de un sistema doméstico de calentamiento de agua, que combina las funciones de colección y acumulación de la energía solar.

La unidad está compuesta básicamente por un grupo de tubos conectados en serie y llenos con agua. Los tubos, pintados de negros o cubiertos por una superficie selectiva para mejorar la absorción de la radiación, están ubicados dentro de un recinto aislado y cubiertos por una superficie transparente.

Los tubos expuestos a la radiación solar absorben esta energía y la transfieren al agua, la cual aumenta su temperatura. Durante el período de demanda, el flujo de agua caliente que abandona el colector es reemplazado por agua fría proveniente de la red domiciliaria o bien proveniente de alguna napa de agua subterránea. Al igual que otros sistemas de calentamiento

basados en el aprovechamiento de la energía solar, este tipo de colectores debe estar provisto de un calentador auxiliar convencional que provea la energía necesaria cuando el recurso solar es bajo o la demanda demasiado alta.

Este tipo de colectores (CAI-T) tiene ciertas ventajas comparadas con otros sistemas, las cuales han hecho aumentar su uso en los últimos años y motivar el estudio presente. Las ventajas principales son: (a) se conectan directamente a la línea de provisión de agua y actúan como precalentadores del sistema de conexión de agua caliente, respondiendo directamente a la demanda de los consumidores, sin necesidad de un tanque aislado de almacenamiento, ni bombas impulsoras, ni controladores; reduciendo enormemente los costos de operación y mantenimiento, (b) los costos de la instalación son bajos porque el propietario sólo necesita agregar una unidad de estos colectores a su sistema de calentamiento de agua convencional ya instalado, (c) no requieren alta tecnología industrial, y (d) tienen alta resistencia a la helada debido a su gran masa térmica (Barral, 1997).

El problema principal de los CAI-T es el enfriamiento nocturno debido a las grandes pérdidas de energía radiante a través de la cubierta no aislada, lo cual obliga que el ciclo de calentamiento del día siguiente se inicie con agua a temperaturas muy bajas (Tripanagostopoulos y Yianoulis, 1992). Para evitar este efecto perjudicial, se diseñó y ensayó un sistema (Barral et al., 1999) en el que el CAI-T se llena con agua templada por la mañana, al inicio del ciclo calórico. El agua templada proviene de una fuente geotérmica de baja entalpía (Dickson y Fanelli, 1995), brindando una ventaja significativa respecto al funcionamiento de otros colectores de este tipo.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo computacional que permita el análisis teórico del comportamiento de esta unidad. Debido a la alta inercia térmica del elemento acumulador y a la variabilidad del recurso energético, las simulaciones son estrictamente necesarias para tener en cuenta los procesos transitorios. En otras palabras, no es posible considerar aproximaciones a partir de variables promedio para estudiar este tipo de sistemas.

El modelo analítico computacional desarrollado y las simulaciones realizadas durante diferentes días de invierno permitió analizar el comportamiento de un CAI-T. El estudio se realizó sobre un CAI-T de gran tamaño, construido con materiales no convencionales de bajo costo y con la finalidad de proveer agua caliente para duchas en una granja educativa, donde el recurso geotérmico mencionado está disponible.

El modelo teórico se basa en una hipótesis de nodo isotérmico (Zollner et al., 1985). Se usaron ecuaciones de balance de energía considerando relaciones de transferencia de calor convencionales (Incropera y De Witt, 1990) y tratamientos típicos vinculados a la energía solar (Duffie y Beckman, 1991). El modelo se codificó en lenguaje FORTRAN. Se registraron datos climáticos de días del invierno y temperaturas en diversos puntos del CAI-T. A los fines de validar el modelo, se compararon los datos experimentales con los resultados arrojados por las simulaciones realizadas con los mismos datos climáticos. Las temperaturas medidas en el prototipo y las predichas por el modelo mostraron una notable aproximación.

En la bibliografía disponible no hay información precisa sobre el comportamiento de un colector de este tipo, no solo por su gran tamaño sino por estar construido con materiales no convencionales. Por lo tanto este modelo computacional simplificado es un primer paso para avanzar en un desarrollo más elaborado del modelo que contemple diferentes demandas de agua caliente y otras posibles condiciones climáticas no contempladas en el actual.

El desarrollo de un modelo computacional evita el gasto de tiempo y dinero que exigen las pruebas experimentales. Por otro lado, en un programa computacional las variables intervinientes se muestran explícitamente lo cual permite realizar un análisis de sensibilidad de las variables en forma significativa.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El CAI tubular está básicamente compuesto por un grupo de tubos conectados en serie (Figura 1), ubicados en una caja aislada y cubiertos por un material transparente. La superficie exterior de los tubos constituye la superficie absorbedora y el agua dentro de ellos es el medio acumulador. El agua templada proveniente de la fuente geotérmica entra en la unidad a través del tubo inferior (primer el tubo) y circula por el colector hasta llenar el tubo superior (último tubo). Este arreglo no permite que se mezcle agua caliente del último tubo que abandona la unidad a la temperatura más alta posible, con agua templada que ingresa. En otras palabras, cuando se requiere agua caliente, el agua que sale es reemplazada por la misma cantidad de agua templada en el primer tubo.

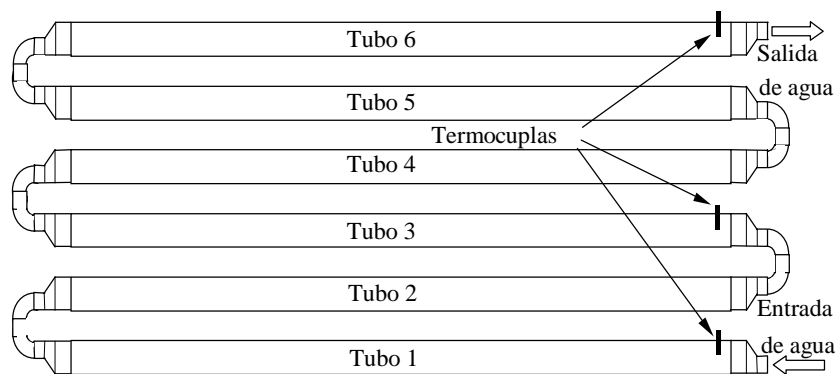


Figura 1. - Vista superior de uno de los circuitos de la superficie absorbedora.

La selección de los materiales para la construcción del prototipo se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad en el mercado, el costo de la materia prima, la posibilidad de uso en aplicaciones solares (Lenel y Mudd, 1984). El diseño se pensó de modo de no usar en su construcción herramientas sofisticadas ni mano de obra especializada (Barral et al. 1999).

La parte exterior de la caja y los soportes para los tubos se realizaron con una madera resistente a la intemperie. La aislación está formada por una combinación de lana de vidrio (al lado de los tubos) y poliestireno expandido de alta densidad. Para la cubierta transparente, se usó policarbonato alveolar, ya que este material es de fácil manejo para superficies grandes, es relativamente económico, tiene propiedades ópticas aceptables y es altamente resistente al impacto. Entre la lana de vidrio y los tubos se colocó una superficie reflectante de aluminio confeccionada con papel de aluminio común que se comercializa para cocción de alimentos.

La superficie absorbedora está formada por tubos de polipropileno pintados de negro de 110 mm diámetro, 3.2 mm de espesor, 4 m de largo, que logran contener más de 450 litros dentro de la unidad.

Dos circuitos independientes, similares al mostrado en la Figura 1, trabajan en paralelo de modo de ocupar completamente la parte interna de la caja. La alimentación surge de la bifurcación de una única línea proveniente del surgente justo antes de entrar al colector y se une nuevamente a la salida del colector para constituir una sola línea de descarga de agua. Este arreglo fue seleccionado a los fines de simplificar la construcción del colector, permitiendo el uso de los materiales disponibles en el comercio sin necesidad de modificarlos (no era necesario preparar codos especiales o conexiones).

El colector se montó sobre una estructura que le permite variar el ángulo de inclinación respecto a la horizontal, entre 35 y 45 grados, para las distintas épocas del año (Figura 2).

Finalmente, los tubos se ubicaron horizontalmente de este a oeste.

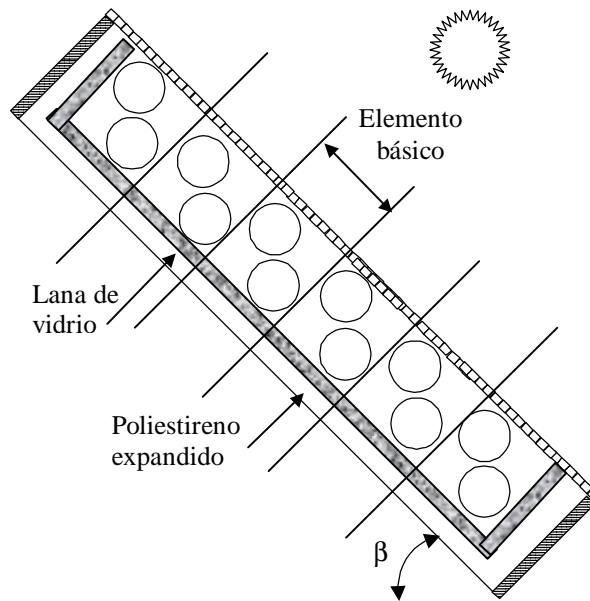


Figura 2. - Sección del Colector Acumulador Integrado Tubular

3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En este diseño particular, el agua del CAI se calienta durante la mañana y parte de la tarde sin que ocurra extracción de agua. Aproximadamente a las 16:00, hora solar, el personal de la granja (24 personas) toma sus duchas, produciéndose una extracción continua de agua con un flujo casi constante. La temperatura del agua disponible para los usuarios es la temperatura del último tubo (salida de la CAI). El agua del último tubo que abandona el CAI es reemplazada por agua templada proveniente de la fuente geotérmica, que entra al primer tubo a 28 °C aproximadamente. El agua circula por los tubos creando un perfil de temperatura ascendente desde el primero al último tubo.

En la Figura 3 se muestran las válvulas, elementos de medición y conexiones de agua del sistema, usados para llenar y vaciar la unidad. La cañería de acceso (a), comienza en una válvula de cierre del tipo esférica (b), por la cual ingresa el agua proveniente del pozo geotérmico, aproximadamente a una temperatura de 28 °C y la distribuye a ambos circuitos del colector por la parte inferior (e), atravesando previamente dos válvulas esféricas (d). La cañería de ingreso tiene una derivación con una válvula propia que permite desagotar el colector (c).

Antes de iniciar el ciclo, es necesario desalojar el agua que se ha enfriado durante la noche. A los fines de realizar un vaciado rápido del colector, se agregaron dos válvulas extras (f) para permitir la entrada y salida del aire atmosférico, de este modo se evita desalojar el agua fría mediante el ingreso de agua templada.

Previamente a la unión de los dos circuitos a la salida, se colocaron dos caudalímetros de pistón (g). Agua abajo, se conectó en derivación mediante una válvula (h) un tanque de expansión (j), para permitir la dilatación del fluido que de otra manera podría destruir el colector, esta línea tiene un manómetro (i) que mide la presión de trabajo del colector.

El sistema se completa con una válvula esférica de cierre rápido, que tiene el propósito de realizar un control del caudal del tipo todo o nada y una válvula exclusiva que regula el flujo de salida en forma precisa (l).

Puesto que las experiencias se desarrollaron en invierno, la inclinación del CAI se fijó en 45°. Por la misma razón el llenado se realizaba a las 10:00 AM, correspondiente a las 9:00 hora solar, de modo que la ganancia calórica supere a las pérdidas.

El ciclo de calentamiento se inicia con agua en todos los tubos a 28 °C. Para realizar el llenado se abren las válvulas (f) y (g), salvo las válvulas (h) y (d), que permanece abiertas durante todo el proceso, las restantes están cerradas. Cuando se completa el llenado se cierra la válvula (f) y se inicia el calentamiento.

Durante el ciclo de utilización que empieza a 5:00 PM, se adopta un flujo de salida constante de 8 litros/minutos. Para extraer el agua caliente, se abren las válvulas (k) y (l) y se ajusta la válvula (l) para obtener la proporción de flujo deseada.

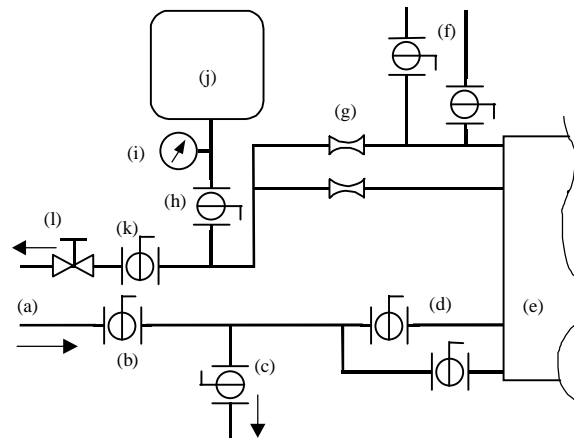


Figura 3. - Sistema de conexiones del CAI.

Las mediciones de temperaturas se realizaron mediante termocuplas ubicadas en los extremos del primer, tercer y sexto tubo (último tubo). El caudal de salida fue evaluado por dos caudalímetros de pistón. Los datos climáticos se registraron mediante una estación meteorológica portátil (temperatura, velocidad del viento, y humedad relativa), y la radiación solar fue medida mediante un piranómetro fotovoltaico.

Este sistema fue analizado experimentalmente y mostró ser conveniente desde el punto de vista económico, para aquellos lugares alejados de las ciudades, donde el gas natural no está disponible (Barral et al., 1999).

4. DESARROLLO DEL MODELO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN

De acuerdo con el funcionamiento del CAI, se pensó en un elemento básico de modo que la unidad quedara dividida en componentes discretos, sobre los cuales se realizaron los balances de energía. El elemento básico se muestra en la Figura 2. Comprende dos tubos, uno de cada circuito independiente, incluyendo la parte de la cubierta transparente sobre los dos tubos y la aislación correspondiente en la parte inferior de la caja del CAI.

La transferencia de calor fue modelada bajo la hipótesis de nodos isotérmicos (Zollner et al., 1985), tomando cada elemento básico como un nodo. Sólo se consideró la inercia térmica del agua despreciándose la de los tubos que es pequeña comparada con la primera. Este modelo supone que cada tubo se comporta como un tanque de mezcla completa, es decir no

hay estratificación, lo cual es una buena aproximación para colectores de este tipo cuando tienen muchos tubos.

Luego, considerando la unidad elemental j , a cada nodo de tubo le corresponde una ecuación de balance de energía que considera las pérdidas y ganancias en cada intervalo de tiempo

$$\frac{dT(j)}{dt} = \frac{1}{c_w M_w} \left[S(j) + c_w \left(\frac{dM_w}{dt} \right) [T(j-1) - T(j)] - Q_p(j) \right]$$

Siendo $S(j)$ es la radiación solar absorbida por unidad de tiempo, c_w representa el calor específico del agua, M_w es la masa de agua contenida en la unidad, $T(j)$ es la temperatura del agua dentro de los tubos correspondientes y $Q(j)$ representa las pérdidas de energía por conducción a través de la aislación, por convección y por radiación hacia el cielo.

Similarmente para cada nodo de cubierta, su comportamiento térmico fue descrito por:

$$\frac{dT_c(j)}{dt} = \frac{1}{c_c M_c} [QC_g(j) - QC_p(j)]$$

Donde M_c es la masa de la cubierta asociada a la unidad elemental j , c_c es el calor específico del material de la cubierta, $T_c(j)$ es la temperatura del nodo-cubierta j y los términos $QC_g(j)$ y $QC_p(j)$ tienen en cuenta el calor ganado y perdido por la cubierta mediante mecanismos de convección y radiación.

Como hipótesis de trabajo se consideró que la temperatura permanecía constante durante cortos intervalos de tiempo, al igual que todas las propiedades que son sólo función de la temperatura. Los coeficientes convectivos de transferencia de calor se calcularon a partir de correlaciones conocidas (Incropera, 1995). A los fines del análisis de la transferencia de calor por radiación, los tubos que constituyen la superficie absorbidora, la cubierta y las paredes laterales se consideran de extensión infinita en la dirección longitudinal, lo cual permite simplificar significativamente el cálculo de los factores de vista.

Se construyó un algoritmo matemático que representa el comportamiento del CAI y se codificó en lenguaje FORTRAN. Se utilizó el método de Runge y Kutta de segundo orden para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales resultante.

El programa lee desde un archivo datos de temperatura ambiente exterior, humedad relativa, radiación solar sobre la superficie absorbidora del colector, velocidad del viento y consumo de agua. Para correr las simulaciones se usaron los datos climáticos y de consumo de agua caliente utilizados durante las experiencias, a fin de validar el modelo computacional propuesto.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La validación del modelo teórico fue hecha por comparación de los resultados arrojados por las simulaciones y los obtenidos experimentalmente. Se midieron las temperaturas de tres tubos (primero, tercero y sexto de un circuito) en un día de invierno, frío pero con buena radiación solar, Figura 4. El periodo de demanda de agua caliente fue de dos horas, de 16:00 a 18:00 hora solar.

Esta experiencia se compara con una simulación hecha con los mismos datos climáticos y con igual consumo de agua caliente, que se muestran en la Figura 5. Puede observarse que

cuando comienza la demanda las temperaturas simuladas por el modelo tienen una buena concordancia con las temperaturas medidas durante la experiencia.

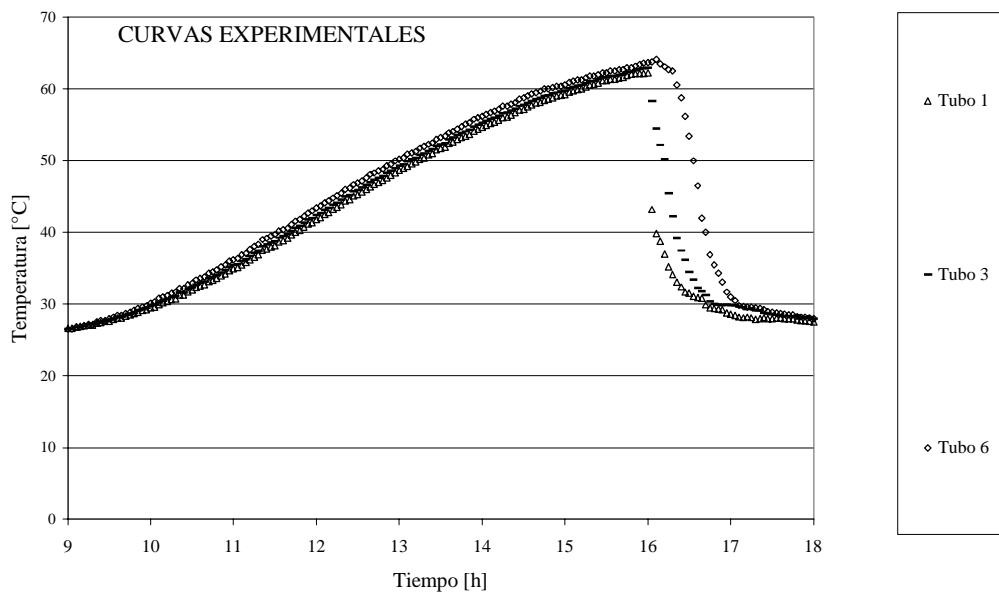


Figura 4. - Temperaturas experimentales medidas en el prototipo.

Mientras tiene lugar el proceso de calentamiento sin extracción, la temperatura del agua en los diferentes tubos arrojadas por la simulación difieren de las obtenidas experimentalmente. Aquellas predichas por la simulación son prácticamente iguales en todos los tubos, sin embargo las obtenidas experimentalmente son mayores en los tubos superiores. De esto se infiere que el modelo no predice correctamente los efectos de convección natural que tienen lugar. Es de destacar que al estar los tubos ubicados transversalmente, las corrientes convectivas que se generan no son lo suficientemente importantes como para producir corrientes de circulación entre los distintos tubos. No obstante, estos efectos son considerables dentro de un mismo tubo, pero el modelo supone para cada tubo mezcla completa. Por consiguiente, se buscará perfeccionar el modelo, contemplando este efecto en una segunda aproximación.

Se hicieron numerosas experiencias y se compararon los resultados con las simulaciones correspondientes y en todos los casos presentan un comportamiento similar.

La Figura 6 muestra una simulación correspondiente a un día con buena radiación solar y temperatura ambiente relativamente alta por ser un día invernal. Por comparación es evidente que la respuesta del sistema mejora notablemente con respecto al día de Figura 5.

Los resultados simulados mostrados en la Figura 7, corresponden a un día normal templado de invierno, pero completamente nublado (radiación solar muy baja). En este caso, puede verse que el colector comenzó el ciclo con agua a 28 °C por la mañana y sufrió grandes pérdidas de calor que hicieron que la temperatura del agua descendiera respecto de la inicial. Significa, que las pérdidas de calor son mayores que la energía ganada por calentamiento solar.

De lo anterior y de las experiencias realizadas se infiere que la respuesta de este tipo de colector es muy afectada por la radiación solar, pero no es demasiado sensible a la temperatura ambiente durante días de radiación solar buena, como se muestra en Figuras 5 y 6.

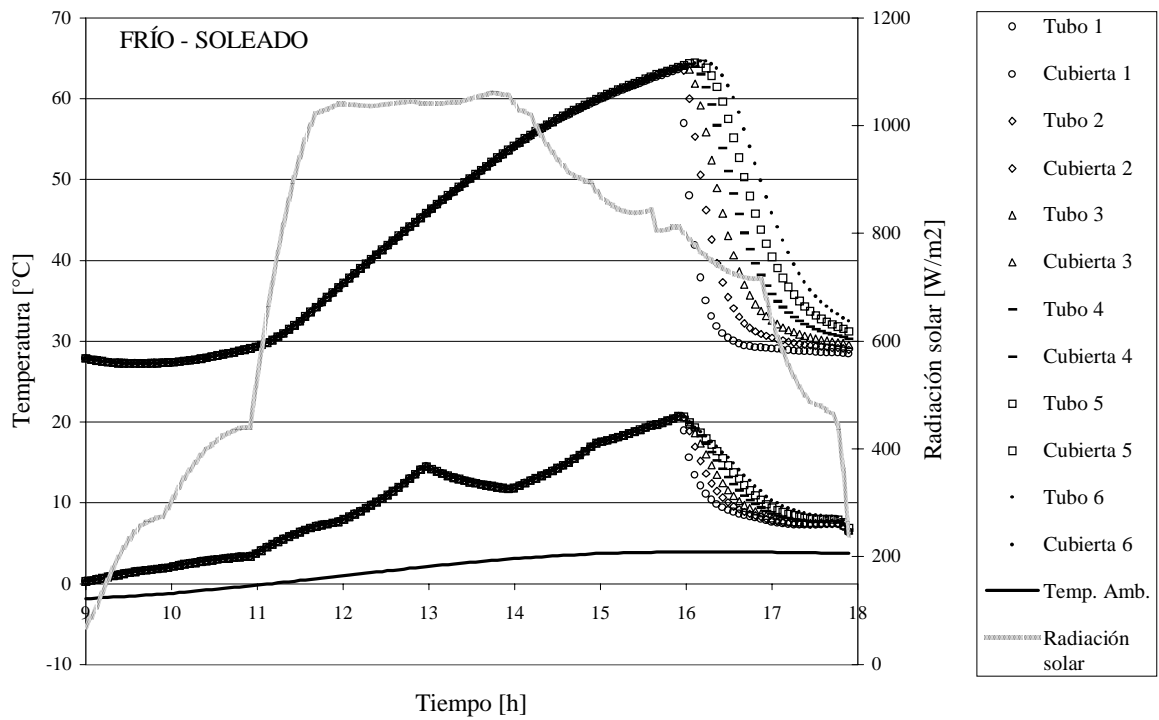


Figura 5. - Temperaturas simuladas por el modelo computacional durante un día frío con buena radiación solar.

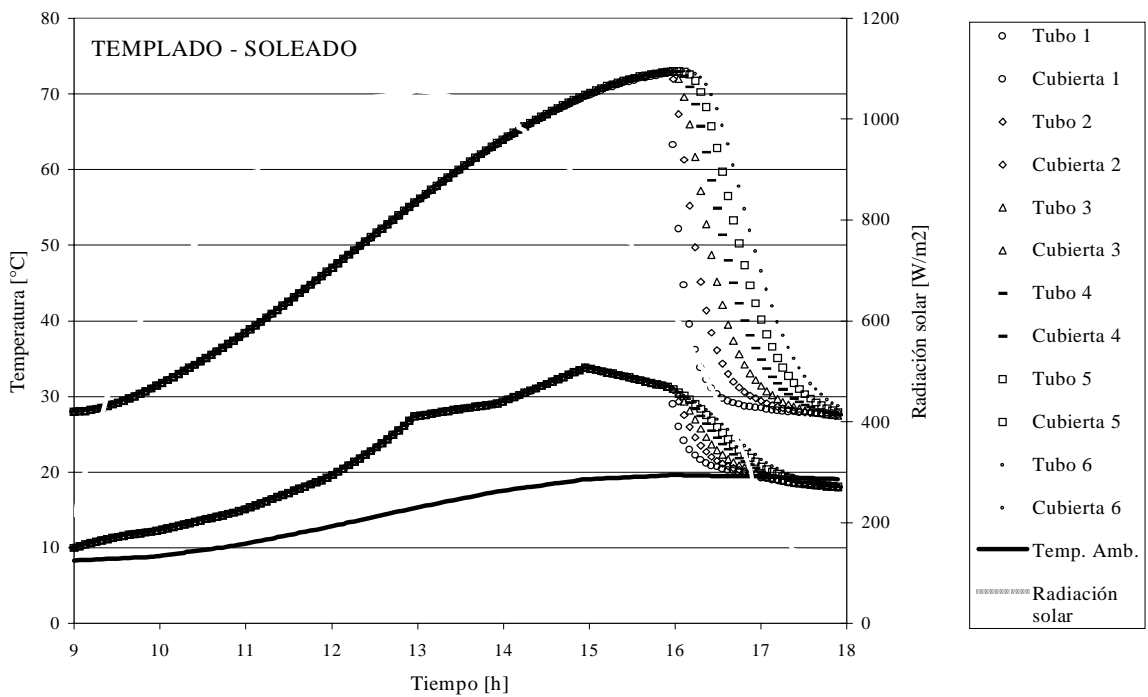


Figura 6. - Temperaturas simuladas por el modelo computacional para un día templado con buena radiación solar.

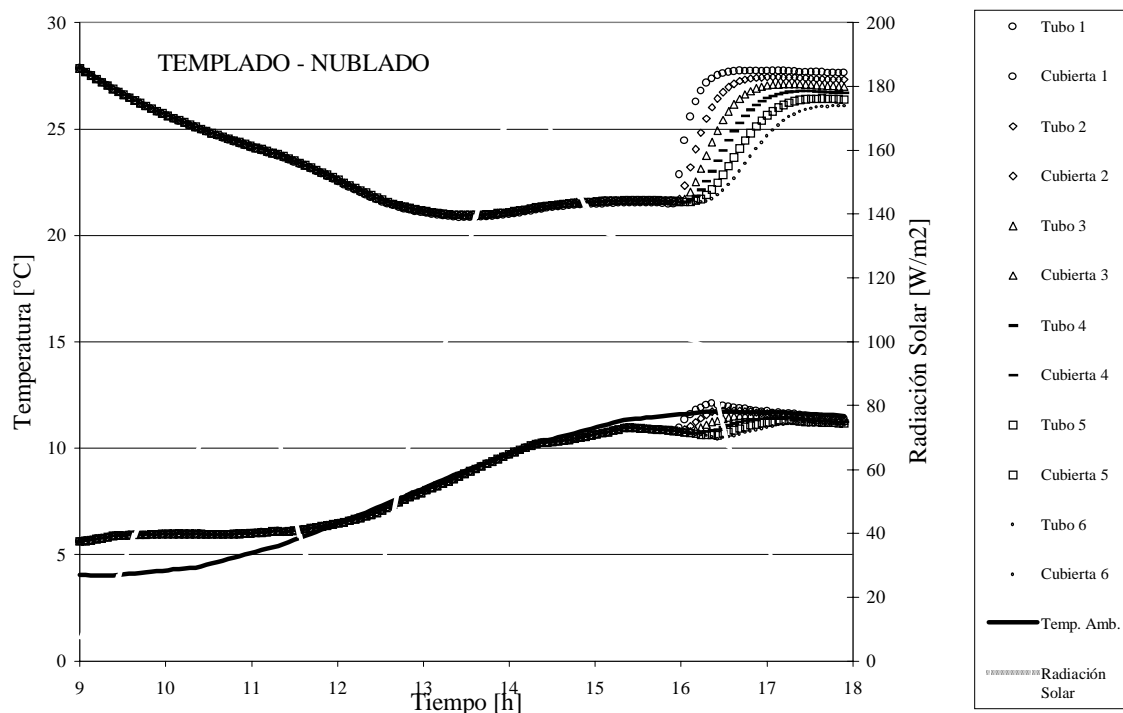


Figure 7. Temperaturas simuladas por el modelo computacional para un día templado con pobre radiación solar .

En conclusión, se ha desarrollado un modelo computacional dinámico que tiene una buena resolución en relación a las medidas experimentales. No obstante exige algunas correcciones que permitan contemplar y analizar la convención natural dentro de los tubos como así también evaluar los perfiles de temperatura para diferentes demandas de agua caliente. Esto permitiría obtener un modelo completo, el cual podría ser usado para analizar aplicaciones de este tipo de sistemas (CAI-T) para otras condiciones climatológicas.

REFERENCIAS

- Barral, J. R. (1997) Performance Analysis of Tubular Integral Collector Storage Units, MSc. Thesis, Arizona State University, Tempe, USA.
- Barral, J., Galimberti, P., Mola, J., Caracoche, F., and Lema, A. (1999) Diseño, Construcción y Análisis de un Colector Acumulador Integrado Tubular de Bajo Costo, *In Proceedings of Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM '99*, Santiago de Chile.
- Dickson M.H. and Fanelli M. (1995) *Geothermal Energy*, pp. 14-15. John Wiley & Sons, Inc., Chichester.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition*, John Wiley and Sons, New York.
- Incropera, F. P., and DeWitt, D.P. (1990) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Third Edition*, John Wiley and Sons, New York.
- Lenel, U. R., and Mudd, P. R. (1984) A review of materials for solar heating systems for domestic hot water, *Solar Energy*, Vol 32, N° 1, pp.109-120.

- Tripanagonstopoulos, Y., and Yianoulis, P. (1992) Integrated Collector-Storage Systems with Supressed Thermal Losses, *Solar Energy*, Vol. 48, pp. 31-37.
- Zollner, A., Klein, S. A., and Beckman, W. A. (1985) A performance prediction methodology for integral collection-storage solar domestic hot water systems, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 107, p.p. 265-273

THEORETICAL PERFORMANCE OF A TUBULAR INTEGRAL COLLECTOR STORAGE SYSTEM

Alba Lema, Jorge Barral, Pablo Galimberti

Department of Mechanical Engineering, National University of Río Cuarto
Ruta Nac. 36 Km. 601 - 5800 Río Cuarto, Argentina, Tel/Fax 54 358 467 6246
E-mail: alema@ing.unrc.edu.ar

Amílcar Fasulo

Department of Physics, National University of San Luis
Chacabuco y Pedernera - 5700 San Luis, Argentina, Tel/Fax: 54 02652 430224
E-mail afasulo@unsl.edu.ar

Key words: Integrated collector storage system, Solar energy, Heating water

Abstract – A simplified theoretical dynamic computational model is developed in this work to evaluate the thermal comportamiento of a tubular integral-collector-storage system. A generic unit is studied under the hypothesis of isothermal nodes for the tubes and the corresponding pieces of transparent cover. The physical-mathematical model takes into account the energy balances relating the water of the tubes, the cover, and the collector surroundings. The model is codified in FORTRAN to perform simulations using the climatic local data and a typical hot water demand. The model is validated by comparing simulation results with experimental data obtained from a prototype built in a educational farm of the central part of Argentina.