

ANÁLISIS TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DE UN COLECTOR ACUMULADOR INTEGRADO TUBULAR

Alba Lema, Jorge Barral, Pablo Galimberti, Javier Mola
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nac. 36 Km. 601 - 5800 Río Cuarto - E - mail: alema@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla un modelo computacional dinámico simplificado que permite evaluar el comportamiento térmico de un colector acumulador integrado tubular (CAI). 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. Se codifica el modelo y la validación se lleva a cabo cotejando los resultados arrojados por la simulación con los obtenidos experimentalmente. Los datos experimentales se obtienen a partir un colector acumulador integrado tubular de gran tamaño, construido con materiales no convencionales pero de fácil obtención, destinado al consumo de agua caliente para una granja educativa de la Región Central de la Argentina.

INTRODUCCIÓN

Un Colector Acumulador Integrado Tubular (CAI-Tubular) es un componente de un sistema de calentamiento de agua destinado a uso doméstico, que combina colección y acumulación de energía solar. La unidad está compuesta básicamente por un grupo de tubos conectados en serie ubicados dentro de un recinto aislado y cubierto por una superficie transparente. Esta simplicidad de funcionamiento y montaje ha hecho que este tipo de colectores sea cada vez más utilizado, desplazando en muchos casos al tradicional colector plano.

Los CAI 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. Lo habitual es que estos componentes presenten 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 (Tripanagonstopoulos y Yianoulis, 1992). La posibilidad de conectar la alimentación del CAI 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 aquellos procesos que involucran el uso del recurso solar como medio de calentamiento, la fuente de energía y las variables climáticas están muy lejos de comportarse en forma constante. Si a esto se le suma que en los CAI influye la inercia térmica del elemento acumulador, nos encontramos con múltiples variables interrelacionadas en procesos transitorios que imposibilitan totalmente cualquier aproximación a partir de variables promedio y se hace estrictamente necesario el uso de simulaciones (Barral, 1997).

El presente trabajo estudia el comportamiento de un CAI Tubular, alimentado con agua proveniente de una fuente de energía geotérmica de baja temperatura (según clasificación ASHRAE 1993) mediante una simulación computacional. Esta última permite evaluar el comportamiento o la respuesta de este colector frente a distintas condiciones de funcionamiento o la influencia de determinadas variables en su operación, prescindiendo completamente de la experimentación la cual muchas veces no resulta conveniente o posible.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El CAI de tipo tubular, consta fundamentalmente de una serie de tubos conectados en serie ubicados dentro de una caja aislada con una cubierta transparente. Los tubos constituyen la superficie absorbadora y el agua contenida en ellos es el elemento acumulador. 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).

Los tubos son de PVC, de 110 mm de diámetro y 3.2 mm de espesor (cañerías comerciales de PVC, que habitualmente se utilizan para desagües cloacales). Están dispuestos formando dos circuitos independientes de seis tubos cada uno, que se intercalan para ocupar toda la superficie de la cavidad aislada. Dichos circuitos funcionan en paralelo (Figura 2. A), 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. En la Figura 1, se muestra uno de estos circuitos.

La parte exterior de la caja y los soportes para los tubos son de anchico, que es una madera resistente a la intemperie. La aislación está formada por una combinación de lana de vidrio (la que se utilizó para aislación de techos de viviendas) y poliestireno expandido de alta densidad. La cubierta transparente, por razones de la gran superficie a cubrir, facilidad de manejo y precio, es de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor. Entre la lana de vidrio y los tubos se colocó una superficie reflectante de aluminio confeccionada con las hojas de aluminio comunes que se comercializan para cocción de alimentos.

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

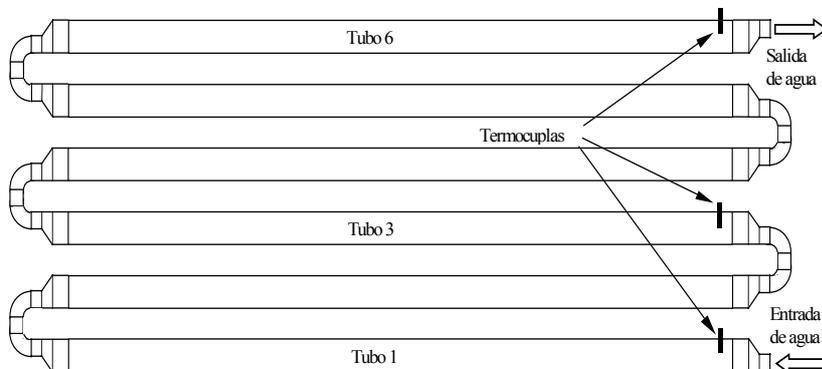


Figura 1. Vista superior de uno de los circuitos de la superficie absorbadora.

OPERACIÓN DEL SISTEMA

Respecto al modo de funcionamiento, el agua en el CAI se va calentando durante toda la mañana y parte de la tarde, sin que se realice extracción alguna, a partir de cierta hora de la tarde se inicia un uso continuo y prácticamente a flujo constante durante un cierto tiempo. La demanda prevista está destinada a agua caliente para que se duchen aproximadamente 15 personas que trabajan en una granja educativa de la Región Central de la Argentina. Iniciada la demanda, el agua caliente sale por el extremo final del último tubo, indicado en la Figura 1 como tubo 6. Dicha demanda va siendo remplazada por agua proveniente del surgente que entra por el primer tubo. El agua se va moviendo a lo largo de todo el circuito recibiendo en el trayecto un calentamiento por acción de la radiación solar. De esta manera, cuando se está extrayendo agua del sistema, se establece un perfil de temperaturas entre la entrada y la salida, en forma creciente.

Debido a que se ensayó en época invernal, se orientó la superficie absorbadora hacia el norte con un ángulo respecto a la horizontal de 45 grados. Por igual razón se fijó como hora de llenado las 10:00 a.m. que coincide aproximadamente con la hora solar 9 a.m. El ciclo de calentamiento se inicia con el llenado del colector con el agua a 28 °C proveniente del surgente. El consumo de agua caliente comienza aproximadamente a las 4 p.m. El caudal se regula a 8 litros/min. Cuando finaliza la utilización del agua caliente, se procede al vaciado del colector que se encuentra lleno de agua proveniente del surgente, con lo cual el ciclo concluye.

MEDICIONES REALIZADAS

Se registraron las siguientes variables: temperaturas en distintos puntos del colector, caudal de agua, algunos datos meteorológicos como temperatura ambiente, humedad relativa ambiente, radiación solar global, velocidad y dirección del viento y presión relativa del agua en el sistema. Dichas variables fueron luego datos de entrada para las simulaciones.

Las temperaturas en distintos puntos del colector fueron registradas mediante termocuplas K conectadas a un termómetro de múltiples entradas con almacenamiento de datos. Los puntos de medición corresponden a la entrada y salida de los tubos del circuito inferior del colector. Las restantes termocuplas fueron colocadas para medir la temperatura del aire interior al colector, y la temperatura entre la capa de lana de vidrio y poliestireno expandido.

Los caudales de agua de cada circuito se midieron mediante caudalímetros analógicos del tipo pistón y resorte. Se adoptó una descarga de flujo uniforme de 8 litros por minuto durante dos horas, a partir de las 4:00 p.m. hasta las 6:00 p.m.. Las variables meteorológicas se midieron mediante una estación meteorológica automática, que registra temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc. mientras que la radiación solar se registró mediante un piranómetro fotovoltaico conectado a un sistema de adquisición de datos. La presión relativa del agua se midió mediante un manómetro analógico. Los registros del termómetro digital, la estación meteorológica, y el piranómetro se realizaron en forma automática cada 3 minutos durante todo el ciclo de funcionamiento, mientras que los registros de los caudalímetros y del manómetro se realizaron en forma manual únicamente durante el lapso de la extracción de agua caliente.

DESARROLLO DEL MODELO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN

De acuerdo al diseño del colector, fue sencillo establecer una unidad elemental sobre la cual estudiar la naturaleza de los distintos flujos de energía que tuvieron lugar. La unidad elemental se muestra en la Figura 2, está compuesta por dos tubos, cada uno pertenece a uno de los dos circuitos que funcionan en paralelo, incluye además el sector de la cubierta que los cubre y la porción de la caja aislada que los contiene.

La transferencia de calor ha sido modelada bajo una hipótesis de nodo isotérmico (Zollner et al., 1985) y con suposiciones simplificadoras referentes a la geometría del colector. El agua contenida dentro de los tubos de cada unidad elemental se representó como un nodo isotérmico, despreciándose el efecto de la masa térmica del tubo frente a la gran masa de agua contenida en los mismos. Esto equivale a suponer que cada tubo se comporta como un tanque de mezcla completa, donde no ocurre estratificación, suposición razonablemente buena para unidades con muchos tubos, pero su efectividad decrece para colectores con pocos tubos. Cada una de las seis partes en que fue dividida la cubierta transparente constituyó un nodo isotérmico de cubierta.

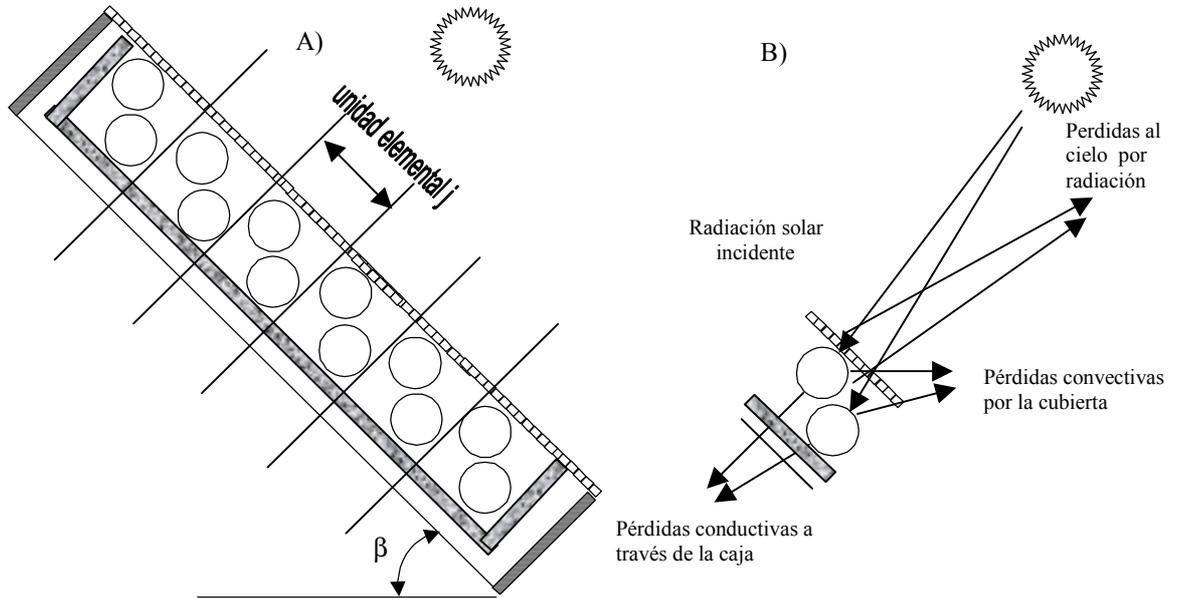


Figura 2. A) Vista en corte del Colector Acumulador Integrado Tubular
B) Ganancias y Pérdidas térmicas de los tubos en una unidad elemental

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 modelo analítico 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.

RESULTADOS

Para la validación teórica del modelo se compararon durante diez días los valores de temperaturas arrojados por la simulación con los medidos. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para tres tubos, en un día invernal característico con dos horas de extracción de agua, entre las 16:00 y las 18:00 hs.

La bondad del modelo merece ser analizada en dos etapas de acuerdo a la existencia o no de demanda de agua. Durante el calentamiento sin extracción de agua, las temperaturas simuladas indican semejanza de temperaturas en todos los tubos. Esta situación si bien difiere de la real era previsible ya que en esta primera instancia de modelización no se tuvo en cuenta la estratificación de temperaturas debida a la convección natural.

Una vez iniciada la demanda de agua, las temperaturas que predice el modelo se aproximan a las experimentales, aumentando su exactitud hacia las últimas unidades. La temperatura real alcanzada por el agua en el último tubo es aproximadamente 2°C mayor que la simulada.

El salto de temperaturas más significativo que ocurre cuando se inicia el consumo de agua, se ubica en ambos casos en el primer tubo siendo aproximadamente de 10 °C.

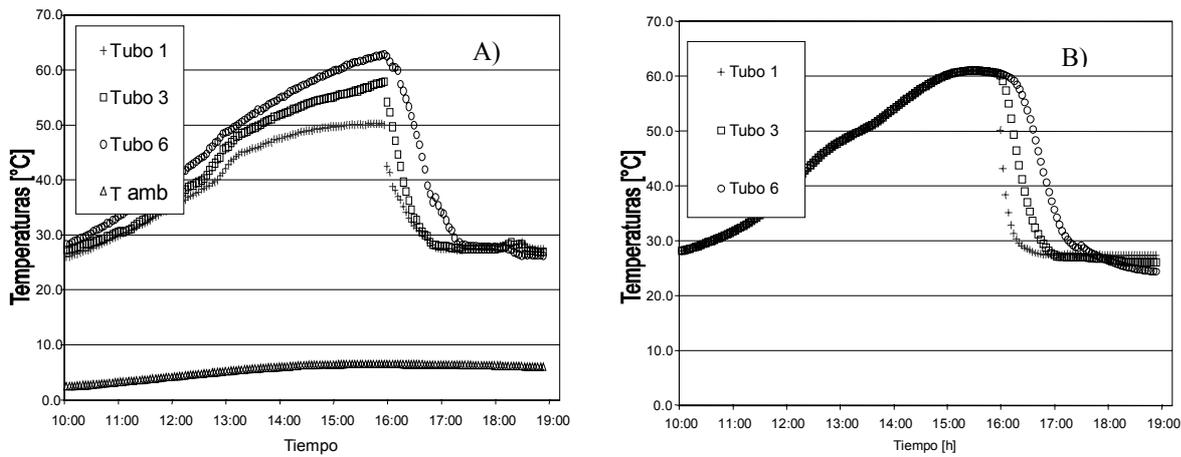


Figura 3. A) Temperaturas experimentales correspondiente al ambiente y al agua dentro de los tubos 1, 3 y 6
B) Temperaturas simuladas para las unidades elementales 1, 3 y 6.

CONCLUSIONES

Se ha logrado desarrollar un modelo analítico simplificado que permite predecir con buena exactitud la temperatura del agua destinada a consumo que es la proveniente del último tubo, durante el período de demanda, para diferentes condiciones climáticas sin tener que recurrir a la experimentación que requiere mucho tiempo y dinero.

Los efectos de la estratificación son importantes en la medida que no hay consumo de agua. Una vez iniciada la demanda, una corriente de agua circula por los tubos volviéndose despreciable la convección natural frente a la forzada.

Para analizar la performance del colector es necesario completar el modelo de modo que contemple la estratificación que se produce por convección natural y diferentes demandas.

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., y Lema, A. (1999) Diseño, Construcción y Análisis de un Colector Acumulador Integrado Tubular de Bajo Costo, trabajo presentado en *el Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM'99*, Santiago de Chile.
- Incropera, F. P. y DeWitt, D.P. (1990) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Third Edition*, John Wiley and Sons, New York.
- Kreider, J. F. (1989) *Solar Design: Components, Systems, Economics*, Hemisphere Publication, New York.
- Lenel, U. R. y 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.
- Tripanagostopoulos, Y., y Yianoulis, P. (1992) Integrated Collector-Storage Systems with Suppressed Thermal Losses, *Solar Energy*, Vol. 48, pp. 31-37.
- 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, p.p. 265-273.