

## MODELO COMPUTACIONAL ANALITICO PARA EL ESTUDIO DE COLECTORES ACUMULADORES INTEGRADOS TUBULARES

J. R. Barral\*, B. D. Wood#

\*Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería  
Ruta Nacional 36 km 601, (5800) Río Cuarto - Córdoba - Tel. (058) 676243 - Fax (058) 676246  
E-mail [jbarral@ing.unrc.edu.ar](mailto:jbarral@ing.unrc.edu.ar)

# Arizona State University, College of Engineering and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering  
Arizona State University, Tempe, Arizona 85287  
E-mail [bdwood@asu.edu](mailto:bdwood@asu.edu)

### RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo computacional analítico para la simulación del funcionamiento de colectores acumuladores integrados tipo tubular. El modelo permite el estudio del comportamiento de este tipo de colectores para condiciones climáticas de distintas localidades y con distintos requerimientos de agua caliente. La eficiencia y la fracción solar fueron analizadas para distintas combinaciones de volúmenes totales y áreas de apertura de colector, usando años meteorológicos típicos de ciertas ciudades en simulaciones de un año corridas en un programa comercial de simulación de procesos solares (TRNSYS). De la misma manera, la influencia de algunas variables críticas fue estudiada mediante un análisis de sensibilidad.

### INTRODUCCIÓN

Los colectores acumuladores integrados han probado ser una alternativa muy conveniente para sistemas de agua caliente doméstica en climas con condiciones de congelamiento no muy severas. Aunque hay algunos tests disponibles para determinar comparativamente cuan bien trabajan distintas unidades, las grandes masas térmicas y el comportamiento altamente dependiente de la carga de agua caliente de estos colectores-almacenadores, no permiten realizar predicciones sobre su comportamiento en condiciones reales y por periodos largos de tiempo.

El tipo de unidad estudiada esta compuesta básicamente por tubos conectados en serie y dispuestos uno al lado del otro, en una caja aislada en los laterales y el fondo y con una cubierta (o más) de vidrio en la parte expuesta a la radiación solar. Un corte transversal es mostrado en la Figura 1. La unidad, conectada como precalentador a un sistema convencional, se ubica generalmente en el techo con una determinada inclinación, quedando los tubos en forma horizontal. La entrada de agua se realiza por el tubo inferior (primer tubo); el agua absorbe energía a medida que atraviesa todos los tubos y, finalmente, el agua caliente se extrae por el tubo superior (último tubo). No es necesario un tanque de almacenamiento aparte. Cuando el agua caliente es requerida, ésta fluye desde el tubo superior y es reemplazada por agua fresca en el primer tubo.

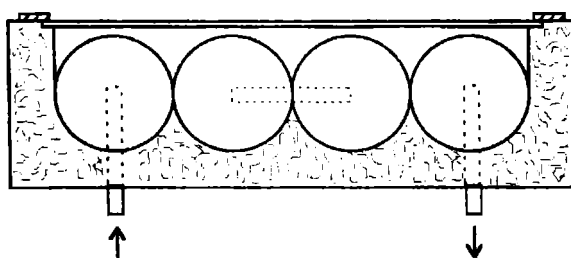


Figura 1. Corte transversal de un colector acumulador integrado tubular.

Este tipo de colectores presenta ciertas ventajas sobre los conocidos sistemas activos de colectores planos: (a) los sistemas son extremadamente simples, no necesitan de componentes auxiliares para funcionar, por lo cual los costos de operación y mantenimiento son mínimos, (b) los costos fijos iniciales y de instalación son bajos (sólo se intercala la unidad entre la entrada de agua y el calentador convencional) y (c) las unidades ofrecen gran resistencia al congelamiento sin ningún elemento de control adicional. La desventaja fundamental de estos colectores se encuentra en sus altas pérdidas nocturnas de energía, lo cual es inevitable dado que la superficie absorbidora y de almacenamiento (los tubos) permanece expuesta sin aislación adicional (solo la cubierta de vidrio) al frío de la noche.

El modelo computacional se basó en un detallado análisis de las ganancias y pérdidas de energía de cada uno de los tubos y los sectores de cubiertas asociados a ellos, considerando a cada elemento como un nodo isotérmico. Para englobar los distintos posibles perfiles de demanda de agua caliente, se utilizaron dos perfiles básicos, uno altamente cargado a la mañana y otro a la tarde.

## MODELO ANALITICO Y SOLUCION NUMERICA

La ecuación de balance de energía (1) [1] se utilizó para evaluar las ganancias y pérdidas de energía de cada uno de los tubos y la ecuación (2) para la evaluación en los nodos de cubierta:

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

$$\frac{dT_C(j)}{dt} = \frac{1}{c_G M_G} [Q_{GAN} - Q_{PERD}] \quad (2)$$

En la ecuación (1)  $T(j)$  representa la temperatura del tubo  $j$ ,  $c_w$  y  $M_w$  el calor específico del agua y la masa de agua en cada tubo respectivamente,  $S(j)$  la energía solar absorbida en el escalón de tiempo considerado, y  $Q_{PERD}$  engloba todas las pérdidas por convección, radiación y conducción que experimenta cada tubo. En la ecuación (2)  $T_C(j)$  representa la temperatura del nodo de cubierta  $j$ ,  $c_G$  y  $M_G$  el calor específico del vidrio y la masa de vidrio en cada nodo de cubierta respectivamente,  $Q_{GAN}$  y  $Q_{PERD}$  los calores ganados y perdidos por el nodo de cubierta.

Para el cálculo de cada  $S(j)$  se usó el modelo HDKR [2] y se tuvieron en cuenta las pérdidas ópticas por la cubierta y efectos de sombreado por los bordes de la caja aislada. Para el cálculo de  $Q_{GAN}$  y  $Q_{PERD}$  en cada ecuación se utilizaron distintas expresiones de transferencia de calor y energía solar. Un tratamiento especial se le dio al cálculo de pérdidas de los tubos con la primera cubierta, en donde resultados de superficies corrugadas se adaptaron para el caso de transferencia por convección y regresiones lineales múltiples se usaron en el planteo de ecuaciones para evaluar los efectos de radiación del calor. El sistema de ecuaciones resultante fue resuelto para cada intervalo de tiempo mediante un método de Runge-Kutta de segundo orden [3].

## SIMULACION MEDIANTE TRNSYS

El modelo analítico descrito en el título anterior fue codificado en FORTRAN, para conformar un componente que responda a los requerimientos de los componentes standard de TRNSYS [4]. Las variables de interés fueron dispuestas como parámetros del componente, a fin de posibilitar una fácil modificación de los mismos para las distintas simulaciones. Los componentes fundamentales del sistema fueron un lector de datos climáticos, funciones forzadoras, un procesador de radiación solar, el colector-acumulador tubular, un calentador auxiliar y un integrador (para integrar mensualmente las distintas energías).

Los datos de entrada para el modelo desarrollado fueron: (a) radiación extraterrestre, radiaciones total y difusa horizontal, y ángulos de posición del sol, datos provistos por el procesador de radiación, (b) temperaturas ambiente y de rocío y velocidad del viento, provistos por el lector de datos, y (c) perfiles de flujo de agua caliente y temperatura del agua de entrada, provistos por las funciones forzadoras. Los datos de salida fueron calor útil, energía total absorbida y temperaturas en los distintos tubos y nodos de cubierta. Como parámetros, con posibilidad de modificación entre una simulación y otra, se dispusieron el volumen y área de apertura totales, espesor de la aislación, distancia absorbedor-primer cubierta, coeficiente de extinción del vidrio, absorbancia de la superficie de los tubos y la emisividad del vidrio. Los datos de entrada fueron leídos en general cada seis (6) minutos, con lo cual se aseguraba la convergencia del método de resolución numérica. La temperatura de salida de agua caliente fue fijada en 50 C.

El modelo fue validado mediante la comparación de datos experimentales extraídos de tests realizados a unidades reales [5] [6] con resultados obtenidos mediante simulaciones utilizando los mismos datos de entrada que en los experimentos [7] y la correspondencia observada fue muy buena, con dispersiones inferiores al 8 %.

En la Figura 2 se muestran algunas temperaturas para una unidad de 6 tubos, como así también temperatura ambiente y radiación solar para tres días invernales en la ciudad de Phoenix (Arizona, U.S.A.). Se puede observar allí que debido a su baja masa térmica, la cubierta refleja rápidamente los cambios que se dan en la temperatura ambiente, mientras que los tubos están fundamentalmente afectados por la radiación solar, sufriendo un lento proceso de enfriamiento durante la noche, hasta llegar toda la unidad prácticamente a la misma temperatura por la mañana temprano.

La eficiencia anual, definida como el cociente entre el calor útil proporcionado por el colector acumulador y la radiación total incidente en el área de apertura, y la fracción solar, definida como el porcentaje de la demanda total de agua caliente cubierta por el recurso solar, fueron estudiadas, para distintas combinaciones de volúmenes y áreas, dejando los otros

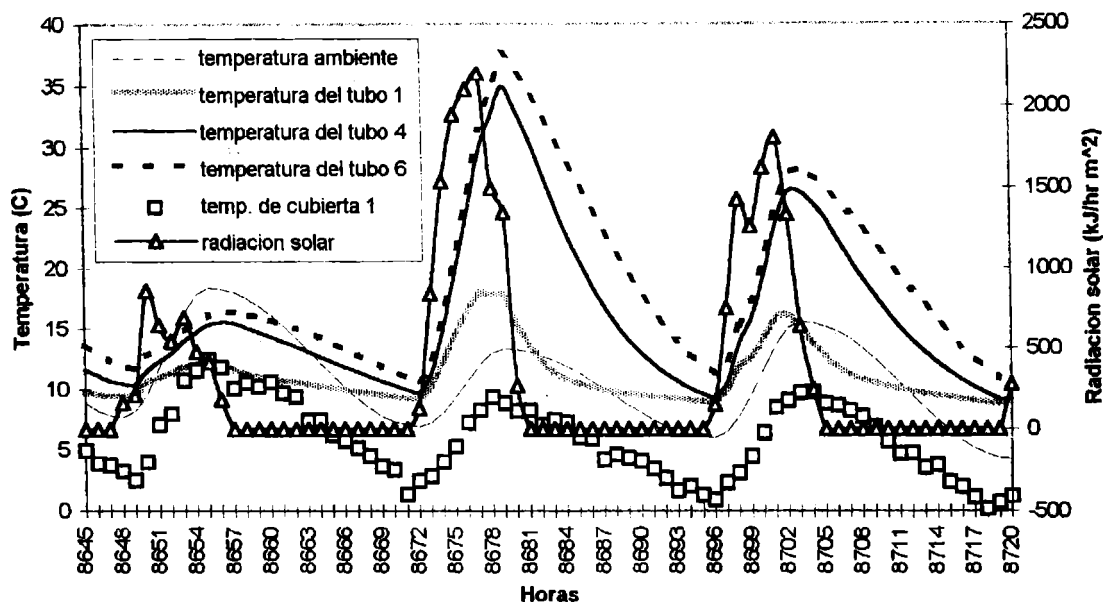
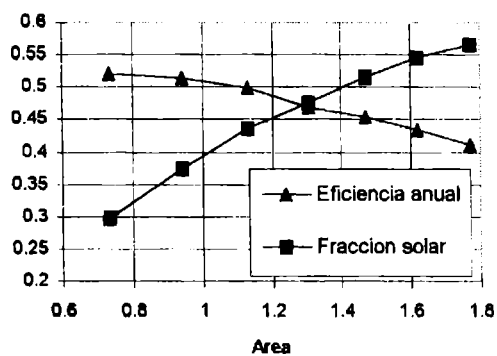
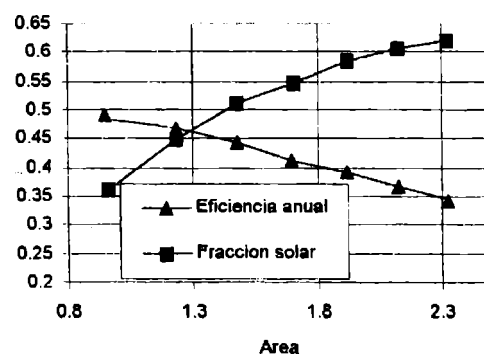


Figura 2. Variables de un colector acumulador de seis tubos, radiación solar y temperatura ambiente.

parámetros constantes. Los resultados para dos volúmenes diferentes son mostrados en la Figura 3. De allí se deduce que la eficiencia no es un parámetro muy conveniente para evaluar la bondad de este tipo de unidades, ya que la misma es baja para unidades que proveen las mayores cantidades de energía anual. Adoptando entonces la fracción solar como parámetro principal para la evaluación de las unidades, se procedió a la comparación de los distintos perfiles de carga, resultado que es mostrado en la Figura 4 para demandas de agua caliente cargadas en la mañana y en la tarde. Allí se puede observar que demandas de agua matutina son menos favorables que aquellas que se dan en la tarde. Estas tendencias se repitieron para los años meteorológicos típicos de distintas ciudades. Finalmente, la Figura 5 muestra fracción solar en función de área para un perfil vespertino y tres volúmenes totales diferentes; allí se comprueba que la curva se superpone y en algunos casos es lo mismo tener un volumen menor con muchos tubos que el volumen mayor siguiendo con menos tubos.



(a)



(b)

Figura 3. Eficiencia y fracción solar en función del área para colector acumulador de volumen total (a) 160 litros y (b) 240 litros.

Para el análisis de sensibilidad se adoptó una unidad de 6 tubos, con valores convencionales para todas las variables de diseño. Luego, las variables de interés fueron variadas, de a una por vez, dejando las otras constantes, para estudiar su influencia sobre la fracción solar del sistema. En la Figura 6 se muestran resultados obtenidos para la variación del espesor de aislación, y en la Figura 7 se muestra la influencia de la distancia absorbedor-primera cubierta.

## CONCLUSIONES

Es conveniente adoptar la fracción solar como parámetro para la evaluación de la performance de los colectores almacenadores tubulares, ya que la eficiencia disminuye con el aumento de área (proporcional a la cantidad de tubos), pero el ahorro de energía aumenta y es esto último en definitiva lo que se busca. Esta disminución de eficiencia se da por el incremento del área expuesta al frío de la noche, lo cual incrementa las pérdidas, pero por otro lado, la mayor área favorece

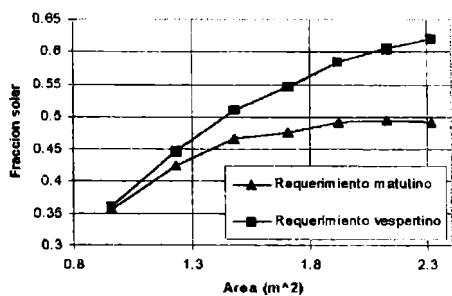


Figura 4. Comparación de requerimientos

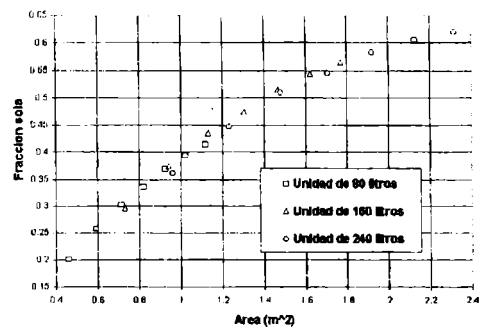


Figura 5. Fracción solar para distintas unidades

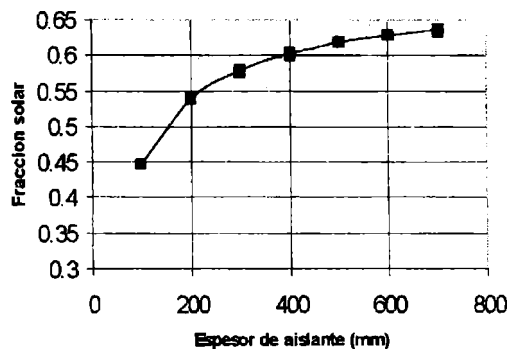


Figura 6. Influencia del espesor de aislante

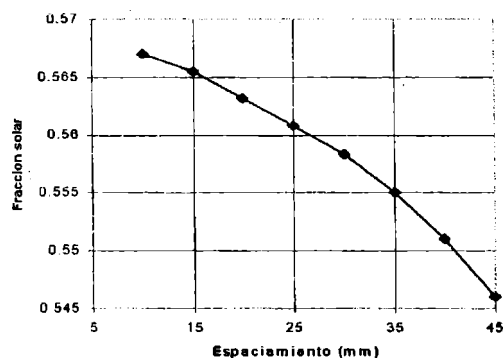


Figura 7. Influencia del espacio absorbedor-cubierta

la absorción de energía solar durante el día, que es cuando generalmente se dan las mayores demandas de agua caliente. En otras palabras, el colector con mayor área (mayor número de tubos) está más capacitado para absorber energía en las horas en que esta es requerida. Se observa en la Figura 4 que las extracciones de agua por la mañana son menos beneficiosas que las hechas por la tarde, lo cual obedece al hecho de que a la mañana el colector no ha tenido tiempo de almacenar suficiente energía debido a la baja radiación solar de las primeras horas del día. De todas maneras la tendencia es la misma para cualquier requerimiento de agua caliente: a mayor volumen total y número de tubos, mayor fracción solar.

Del análisis de sensibilidad se desprende que la aislación debe sobrepasar ciertos valores mínimos para garantizar que la unidad funcionará en la zona de altas eficiencias (Figura 6), después de los 400 mm, incrementos en espesor no producen grandes mejoras y el volumen del colector se incrementa demasiado. En lo que respecta a espaciamiento absorbedor-cubierta (Figura 7), se observa que dentro de las posibilidades tecnológicas es conveniente un espaciamiento pequeño; grandes espaciamientos incrementan los efectos de sombreado.

En definitiva, el modelo computacional desarrollado constituye una herramienta de diseño, que permite en forma simple (cambio de parámetros antes de cada simulación) evaluar el comportamiento que tendrá un colector almacenador para distintas combinaciones de volúmenes, área y otras variables de interés, para distintos requerimientos de agua caliente y condiciones climáticas.

## REFERENCIAS

- [1] Zollner, A., Klein, S. A., and Beckman, W. A., "A Performance Prediction Methodology for Integral Collection-Storage Domestic Hot Water Systems", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 107, p. 265, 1985.
- [2] Duffie, J. A., and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition*, John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [3] Chapra, S. C., and Canale, R. P., *Numerical Methods for Engineers, Second Edition*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
- [4] TRNSYS, "A Transient Simulation Program" Version 14.2, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1996.
- [5] ASU, Solar Collector Test Report No GFW000907, Arizona State University, Solar Test Facility, Tempe, 1997.
- [6] SRCC, Directory of SRCC Certified Solar Collectors and Water Heating Systems Ratings, Solar Rating & Certification Corporation, Washington, D. C., 1996.
- [7] Barral, J. R., "Performance Analysis of Tubular Integral Collector Storage Units", M. S. Thesis, Arizona State University, Tempe, 1997.