

ENSAYO, MODELIZACION Y SIMULACION DE UN SISTEMA COLECTOR-ACUMULADOR DE AGUA A CIRCULACION NATURAL

R. Gaspar, M.A. Lara y R.D. Piacentini
Grupo de Energía Solar, Facultad de Ciencias Exactas e
Ingeniería, U.N. de Rosario, Pellegrini 250, Rosario

Resumen

El presente trabajo trata del ensayo, modelización y simulación de un sistema colector de agua y tanque de acumulación con circulación natural. El equipo se encuentra en operación desde hace un año. Los ensayos se han hecho con y sin extracción y reposición de agua. Durante los mismos las temperaturas se han registrado mediante un selector de señales de tipo mecánico. Un modelo teórico (sin estratificación) permite simular el sistema. El modelo incluye parámetros externos, internos y variables de diseño. A través de simulaciones diarias se compara el modelo con los ensayos efectuados, discutiéndose sus resultados. Se analiza además el comportamiento en condiciones climáticas particulares.

Abstract

This paper deals with the essay, modelisation and simulation of a solar water heater-storage system. It has been in operation for a year. Essays have been made with and without water extractions. During them, temperatures have been recorded with an automatic mechanical signal selector. A theoretical model, without stratification, allows the system simulation. The model includes external and internal parameters and design values. It is compared with experimental data, and results are analysed. The whole system performed is studied in particular weather conditions.

Introducción

El calentamiento solar de agua para uso domiciliario es co-

mún en muchas partes del mundo. En nuestro país se fabrican calefones solares desde hace varios años. En Rosario se investiga en el tema desde 1974, habiéndose realizado ensayos experimentales /1/ y modelos numéricos simples /2/. El presente trabajo amplía los estudios previos relativos a un sistema en operación. Se presenta un modelo teórico general para un fluido en movimiento con transferencia de energía y se lo particulariza para el sistema ensayado experimentalmente.

Modelo Matemático

El sistema es un calefón solar compuesto por dos colectores, un tanque de acumulación y caños de interconexión en el cual el agua circula por termoconvección natural. Un esquema se da en la figura 1. Llamando con t a la temperatura del agua y v su velocidad, hipótesis razonables en casi todo el circuito son que t y v son constantes en cada sección perpendicular a la velocidad (tales como S_1 , S_2 y S_3 en la figura 1). En esas condiciones son sólo funciones de una coordenada generalizada q y del tiempo θ . Por ejemplo, q puede ser la distancia sobre el circuito de agua, a partir de un dado punto del sistema (A en la figura 1). Los mayores apartamientos respecto del modelo planteado pueden producirse en los caños de distribución y recolección de agua en el colector y en las zonas de entrada y salida de agua en el tanque. Un balance de energía permite escribir, para cualquier valor de q y θ

$$v(q, \theta) \frac{\partial t}{\partial q} + \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{f(t, q, \theta)}{C_1(q, \theta)} \quad (1)$$

donde C_1 es la capacidad calorífica del sistema por unidad de q y $f(t, q, \theta)$ la energía transferida por unidad de q y tiempo. El flujo de masa \dot{m} es

$$\dot{m}(q, \theta) = A(q) \rho_a v(q, \theta) \quad (2)$$

donde $A(q)$ es la sección transversal del circuito de agua y ρ_a su densidad (supuesta constante para el cálculo de \dot{m}). Cuando no hay extracciones, \dot{m} es independiente de q , dado que el agua es prácticamente incompresible. La ecuación (1) es

La expresión más general para el caso considerado. En la literatura se han estudiado / algunos casos particulares. Para los colectores solares, se resuelve habitualmente en la aproximación de los estados cuasiestacionarios /3/, donde el término $dt/d\theta$ se desprecia. El factor $f(t, q, \theta)$ se da en función de la radiación incidente, las características físicas del colector y / las condiciones exteriores. // El caso /4/ considera

$$Q_{\text{útil}} = [H^*(\theta) - U_a(t - t_a)] \cdot d_c \quad (3)$$

expresión que hemos adoptado / en un trabajo previo /2/. En (3), $H^*(\theta)$ es la radiación / absorbida, t_a la temperatura / ambiente, U_a el coeficiente global de pérdidas (función eventualmente de q , t y t_a) y d_c el ancho del colector. Además

$$C_t = A(q) \rho_a c_a + \frac{C_c}{L} \quad (4)$$

donde c_a la capacidad calorífica específica del agua, C_c la capacidad calorífica del colector (excluida el agua) y L la longitud (en la dirección de q) del mismo. Otras simplificaciones de (1) para los colectores, siempre en la aproximación de estados cuasiestacionarios, se dan en /5/, /6/, /7/. En el presente trabajo se sigue el esquema usual /8/

$$f(t, q, \theta) = F' d_c [H^*(\theta) - U_a(t - t_a)] \quad (5)$$

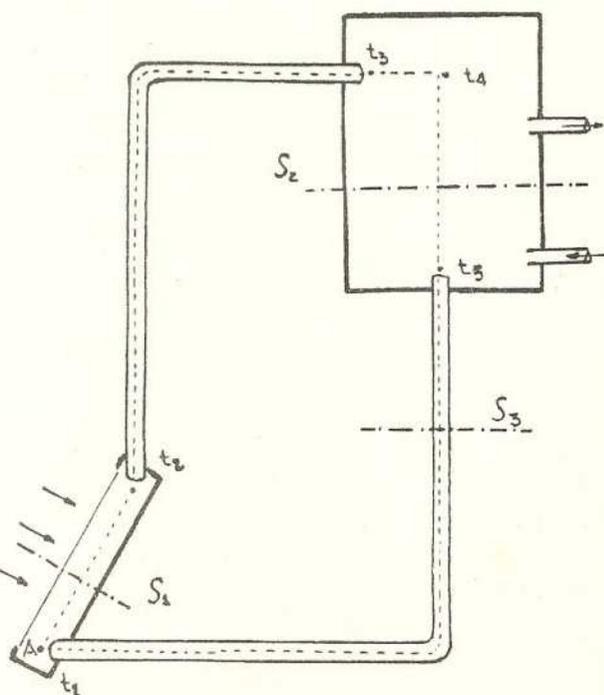


FIGURA N:1

donde la radiación absorbida está dada por

$$H(\theta)^* = (\tau\alpha)_e \beta(\theta) R(\theta) H(\theta) \quad (6)$$

indicando $(\tau\alpha)_e$ el coeficiente efectivo de transmisión-absorción, $\beta(\theta)$ el factor de sombra, $R(\theta)$ el de orientación y $H(\theta)$ la radiación solar incidente sobre un plano horizontal. F' , el factor de eficiencia del colector, tiene en cuenta gradientes transversales de temperatura fuera del circuito de agua, (1) queda entonces, para el colector,

$$\rho_a A_c \frac{\partial t}{\partial q} + \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{F' d_c [H(\theta)^* - U_a(t-t_a)]}{\rho_a A_c c_a + \frac{C_c}{L}} \quad (7)$$

Si se desprecia en el denominador del segundo miembro el término correspondiente a la capacidad calorífica del colector, y se hace la aproximación de estados cuasiestacionarios, se obtiene /8/ la ecuación usual

$$\dot{m} c_a \frac{\partial t}{\partial q} = F' d_c [H(\theta)^* - U_a(t-t_a)] \quad (8)$$

Modelos no estacionarios han comenzado recientemente a ser tratados /8/, /9/, aunque no en forma sistemática. Si en (8) se admite que U_a (y por lo tanto F' , /5/, /8/) es esencialmente constante en un instante dado, una integración da

$$\dot{m} c_a (t_1 - t_2) = F' A_c [H(\theta)^* - U_a(t_1 - t_a)] \quad (9)$$

donde t_1 y t_2 , indicadas en la figura 1, son las temperaturas a la entrada y salida del colector, A_c su área y t_1 la temperatura media del agua en el mismo. La ecuación (9) es la utilizada en la presente modelización.

Al aplicar (1) a los tubos de interconexión colector-tanque, debe considerarse

$$f(t, q, \theta) = U_{ca} P (t - t_a) \quad (10)$$

donde C_{ca} es el coeficiente global de pérdidas para los caños, P el perímetro exterior y C_e resulta, despreciando la capacidad calorífica de los tubos sin agua

$$C_x = A \rho c_a \quad (11)$$

Por consiguiente, en la aproximación de estados cuasiestacionarios

$$\dot{m}_{ca} \frac{dt}{dq} = - U_{ca} P (t - t_a) \quad (12)$$

integrando

$$\dot{m}_{ca} (t_3 - t_2) = - U_{ca} (t_j - t_a) A_{ca} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{ca} (t_4 - t_5) = - U_{ca} A_{ca} (t_k - t_a) \quad (14)$$

donde t_3 y t_5 son las temperaturas de entrada y salida del agua en el tanque, A_{ca} el área lateral del caño de afluencia y A_{ca} la del de retorno; t_j y t_k indican las respectivas temperaturas medias.

La modelización del tanque de acumulación es más delicada. En primer lugar, en la región 3-4 (Figura 1) el esquema unidimensional no es correcto. Sin embargo, en una primera etapa se supondrá válida la relación

$$t_3 = t_4 \quad (15)$$

En segundo lugar, la condición \dot{m} constante no es real si hay extracciones y/o reposiciones no instantáneas de agua. Sin embargo, en el modelo que se presenta (extracciones y reposiciones virtuales) sigue siendo válida la independencia de \dot{m} respecto de la variable q .

Por tanto puede hacerse la aproximación de estados cuasiestacionarios, por ser éste un acumulador de energía por varia-

ción de temperatura. En los modelos sin estratificación (tal como el considerado en el presente caso) se postula que $\frac{dt}{d\theta}$ no depende de q . La ecuación (1) queda, en esas condiciones y luego de integrada

$$v(t_5 - t_4) + L_t \frac{dt_1}{d\theta} = - \frac{U_t A_t (t_1 - t_a)}{\rho A c_a} \quad (16)$$

donde L_t es la longitud del tanque según q , A_t su área exterior, t_1 su temperatura media y $A(q)$ el área transversal del circuito de agua. Operando queda

$$m c_a (t_5 - t_4) + C_t \frac{dt_1}{d\theta} = U_t A_t (t_1 - t_a) \quad (17)$$

C_t indica capacidad calorífica del tanque. (9), (13), (14), (15) y (17) dan

$$\begin{aligned} F' A_c H^*(\theta) = F' A_c U_c (t_i - t_a) + A_{ca} U_{ca} (t_j - t_a) + \\ + A'_{ca} U_{ca} (t_k - t_a) + U_t A_t (t_1 - t_a) + C_t \frac{dt_1}{d\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

Close /4/ y Ong /6/ admiten

$$t_i = t_e \quad (19)$$

Esta condición, como se observará de los registros efectuados, es válida durante las horas centrales del día. Como t_j y t_k están acotadas por t_i y t_1 , podemos tomar

$$t_i = t_j = t_k = t_e \quad (20)$$

quedando así una ecuación ordinaria en la función t_1

$$F' A_c H^*(\theta) = [F' A_c U_c + U_{ca} (A_{ca} + A'_{ca}) + U_t A_t] \cdot (t_e - t_a) + C_t \frac{dt_e}{d\theta} \quad (21)$$

Durante la operación nocturna, como se notará de las curvas experimentales, la condición (19) no es satisfecha. Debemos buscar alguna relación equivalente. Si se grafican en función de θ , $(t_i - t_a)$, $(t_j - t_a)$, $(t_k - t_a)$ y $(t_l - t_a)$ se observa que aproximadamente, se satisfacen las siguientes relaciones

$$(t_i - t_a) = g_i (t_e - t_a) \quad (22a)$$

$$(t_j - t_a) = g_j (t_j - t_a) \quad (22b)$$

$$(t_k - t_a) = g_k (t_k - t_a) \quad (22c)$$

donde g_i , g_j y g_k son factores de ponderación. Quedará por ver si los mismos dependen o no fuertemente de t_l y t_a en otras épocas de ensayos, distintas de las consideradas. Se obtiene así para la noche

$$[F' A_c U_c g_i + U_{ca} (g_j A_{ca} + g_k A'_{ca}) + U_t A_t] \cdot (t_e - t_a) + C_t \frac{dt_e}{d\theta} = 0 \quad (23)$$

Las extracciones y reposiciones se consideran virtuales.

Ello implica que son instantáneas y que, en forma inmediata se restablece la condición (20) o (22) para extracciones diurnas o nocturnas, respectivamente. Esto corresponde a una transferencia de energía que es prácticamente instantánea y que se realiza para todo q . Si bien las extracciones y reposiciones reales se efectúan sólo en el tanque, la aproximación anterior es razonable dado que la mayor capacidad calorífica se concentra en el mismo.

Para completar la modelización resta la asignación de valores a los parámetros y coeficientes del sistema considerado. Esto se omite en el presente trabajo pues se describe en detalle en /11/. Para otros modelos y aplicaciones ver /5/, /8/ y /10/.

Simulación del Sistema

Dado que los ensayos fueron llevados a cabo en días claros, la radiación solar puede representarse por

$$H(\theta) = H_{\max} \cos(\omega_h \cdot \theta) \quad (24)$$

correspondiendo $\theta = 0$ para el mediodía solar y $H = 0$ a la salida y la puesta del sol. Análogamente, la temperatura ambiente resulta

$$t_a(\theta) = t_0 + t_{\max} \sin(\omega_t \theta + \phi) \quad (25)$$

siendo $t_a = t_0$ a la salida del Sol y estando el máximo de temperatura desplazado del de la radiación hacia las horas de la tarde. Durante la noche, y de acuerdo a /2/, se da una disminución lineal de la temperatura ambiente desde su valor a la puesta del Sol hasta su nuevo valor a la salida del Sol del día siguiente. La velocidad del viento se toma constante y el coeficiente superior de pérdidas del colector se determina con la formulación empírica de Klein /12/, la cual tiene la ventaja de ser analítica y dar resultados prácticamente iguales que expresiones más complejas, dentro de un amplio rango de temperaturas.

Las ecuaciones (21) y (23) son integradas numéricamente con pasos de integración autoajustados según la precisión soli-

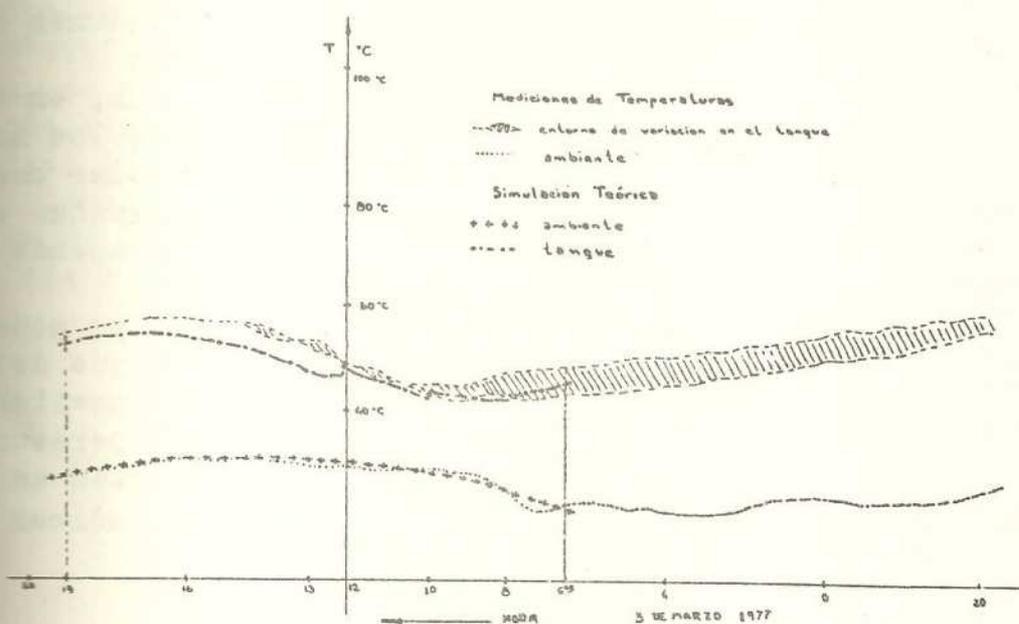


FIGURA N°2

citada /13/. Cada simulación requiere menos de dos minutos en una computadora IBM 1130. Resultados típicos de la simulación teórica durante un período diurno, obtenidos como solución de la ecuación (21), se muestran en la figura 2, comparándose con las mediciones experimentales de las temperaturas del tanque. Se analizan a continuación con mayor detalle, el sistema de medición, los resultados experimentales y las curvas teóricas obtenidas.

Descripción y Ensayo del Sistema

El sistema ensayado consiste en dos colectores de agua del tipo placa-caño, conectados en paralelo. Ambos son de tubos de hidrobronce, pero uno de ellos tiene placa de cobre y el otro de aluminio. Llaves de paso permiten la operación individual o en conjunto de ambas unidades. El agua caliente se transfiere a un tanque de acumulación térmicamente aislado. El tanque tiene conductos para la extracción y reposición de agua, entrando ésta a través de un depósito auxiliar con flotante. Una perspectiva general se muestra en la figura 3. El tanque

de acumulación es de 0.19 m^3 y el área total de colectores 2.4 m^2 . Ello da una relación área de colección/volumen de acumulación, un 25% menor que los valores usuales.

Se efectuaron ensayos con y sin extracción de agua, en diversas condiciones ambientales y operativas. Durante los mismos se miden la velocidad del viento, la radiación solar con un piranómetro tipo Robitsch y las temperaturas indicadas en la figura 3 (el punto indicado con el número 3 corresponde a la temperatura ambiente).

Todas las temperaturas son registradas en un equipo monocanal mediante un selector construido por el grupo, que determina la señal de entrada a través de levas y microswitches. Un esquema general del sistema de medición de temperaturas se presenta en la figura 4. Ocho señales se detectan en ciclos de treinta minutos. Ensayos independientes indican una

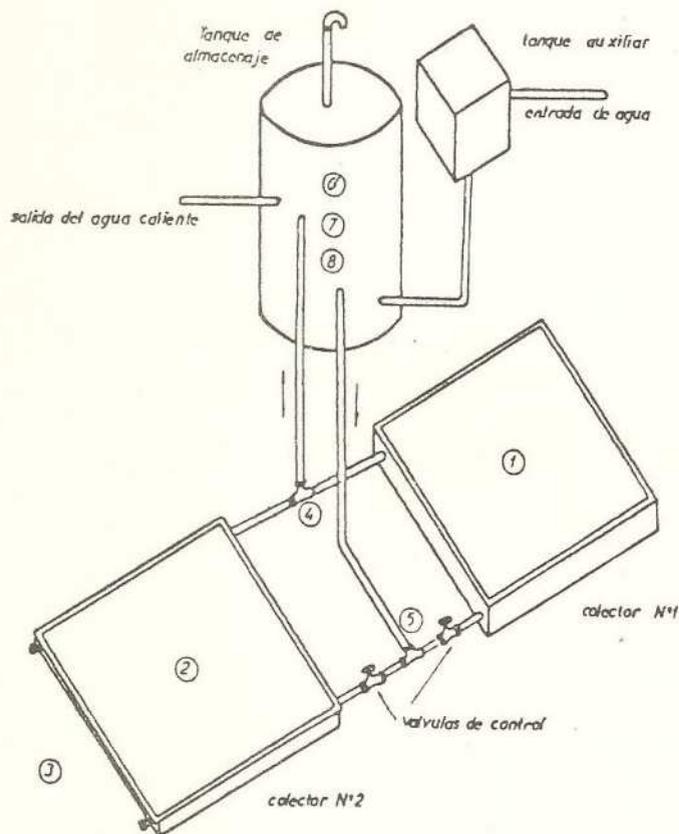


FIGURA N:3

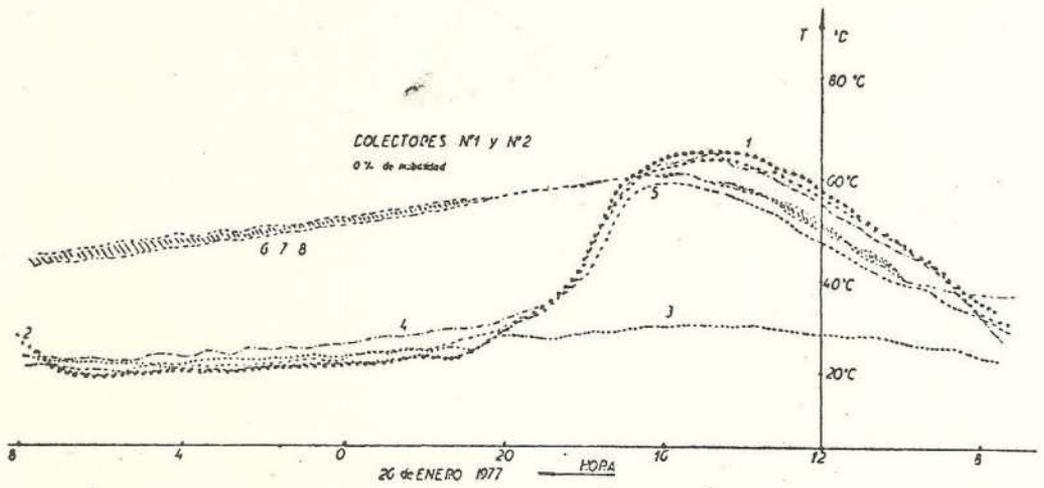


FIGURA N°5a

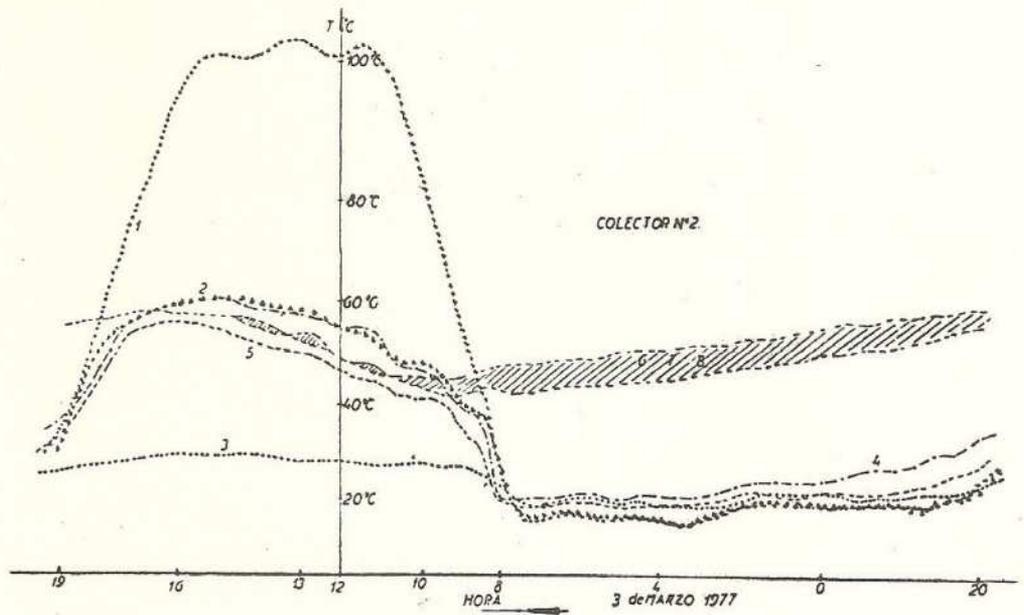


FIGURA N°5b

La evolución general de las curvas teórica y experimentales de las temperaturas del tanque. Sin embargo, hay algunas diferencias significativas. Durante las primeras horas de sol, la curva teórica decrece más rápidamente que las experimentales. Ello se debe a que, en la simulación considerada, se empleó la ecuación (21) desde la salida del Sol, cuando en realidad su rango está limitado a las horas del día. Además, a partir de la tercera extracción (doce, hora local), si bien la variación de las curvas es del mismo tipo, las menores temperaturas teóricas respecto de las experimentales se deben esencialmente a haber considerado una variación de energía térmica del sistema, por extracción-reposición, superior a la que realmente se produce. Ello se debe a que no se tiene en cuenta completamente el aporte de energía solar en el circuito de alimentación de agua a partir de la red de distribución. Un análisis detallado de las temperaturas media y superior del tanque (t_7 y t_6 respectivamente) muestra frecuentes inversiones de las mismas. Ello se observa cuando la circulación es pequeña o luego de las extracciones. En el primer caso se debe a que, del volumen de agua en el tanque, el tercio central es el que tiene menor superficie de contacto con el exterior y por lo tanto en él las pérdidas son menores. En las extracciones, la inversión se produce porque el agua de reposición no alcanza a elevar su temperatura, al pasar por el colector, al valor correspondiente de t_7 .

Cabe destacarse que, además de lo anterior, fluctuaciones externas no consideradas en el presente modelo, tales como ráfagas de viento, oscilaciones en la radiación, etc., pueden contribuir además al fenómeno observado.

Conclusiones y Perspectivas

La simulación teórica considerada en el presente trabajo, unidimensional, por componentes y sin estratificación en el tanque, permite describir en sus características esenciales un sistema de colección-acumulación de energía solar. Posibles desarrollos en el tema son:

- * Estudio del sistema en forma continua, por integración en todo punto e instante de la ecuación (1).

- * Generalización de (1) a casos multidimensionales.
- * Descripción más elaborada de ciertos parámetros y variables del sistema y del medio exterior.

Bibliografía

- /1/ Corbella y otros: "Ensayo de un Calentador Solar". Primer congreso A.L.E.S., San Miguel (1975).
- /2/ Garibotti y otros: "Estudio Experimental y Simulación Teórica de un Sistema Colector Plano-Acumulador de Energía Solar". 62° Reunión A.F.A., Rosario (1975).
- /3/ Hottel y Woertz: "Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors". Trans A.S.M.E. 64, 91 (1942).
- /4/ Close: "The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation". Solar Energy 6, 33 (1962).
- /5/ Whillier: "Prediction of Performance of Solar Collectors", en "Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings", A.S.H.R.A.E. (1977).
- /6/ Ong: "A Finite Difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater", Solar Energy 16, 137 (1974).
- /7/ Gupta y Garg: "System Design in Solar Water Heaters with Natural Circulation". Solar Energy 12, 163 (1968).
- /8/ Duffie y Beckman: "Solar Energy Thermal Processes", Ed. J. Wiley (1974).
- /9/ Klein, Duffie, Beckman: "Transient Considerations of Flat Plate Solar Collectors". A.S.M.E J. Eng. Power 96A, 109 (1974).
- /10/ Whillier: "Design Factors Influencing Collector Performance", en "Low Temperature Applications of Solar Energy", A.S.H.R.A.E. (1967).
- /11/ Lara: "Ensayo y Parametrización de un Sistema Colector-Acumulador de Agua". Trabajo Final. Rosario (1977).
- /12/ Klein; "Calculation of Flat Plate Collector Coefficients". Solar Energy 17, 79 (1975).
- /13/ Bulirsch y Stoer: "Numerische Mathematische" 8, 1 (1966).