

## MODELIZACIÓN DE UN ACUMULADOR DE CALOR EN LECHO DE AGUA

S. Bistoni, A. Iriarte<sup>2</sup> y L. Saravia<sup>1,2</sup>  
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca. sbistoni@fcasuser.unca.edu.ar

### RESUMEN

En las aplicaciones de sistemas solares, la demanda de energía por lo general no coincide con el período de abastecimiento de energía solar, siendo indispensable el uso de acumuladores de calor. El almacenamiento de energía como calor sensible puede ser en un líquido o sólido. Cuando el fluido que transporta la energía es aire se utilizan acumuladores en lecho de piedra, pero teniendo en cuenta las ventajas térmicas y físicas que presenta el agua, una alternativa es reemplazar la piedra por botellas de plástico conteniendo agua. El objetivo del presente trabajo es el estudio del comportamiento térmico de un "lecho de agua", construido con botellas de plástico, con agua en su interior, mediante un modelo que utiliza la analogía térmica - eléctrica. Se construyó un prototipo con el objeto de determinar los coeficientes de transferencia de calor, validar el modelo y caracterizarlo física y térmicamente. La predicción del modelo siguió la tendencia de los datos experimentales de la temperatura del agua en el lecho, con una desviación promedio de 0,41 °C y un error relativo promedio del 1,1 %.

### INTRODUCCIÓN

En las aplicaciones de sistemas solares, la demanda de energía por lo general no coincide con el período de abastecimiento de energía solar, siendo indispensable por lo tanto el uso de acumuladores de calor. En caso de utilizar energía térmica es conveniente su almacenamiento como calor sensible de un fluido o de un sólido o como calor latente de un material cuando éste sufre un cambio de fase. El almacenamiento de energía como calor sensible puede ser de un líquido, generalmente agua o de un sólido que comúnmente se utiliza la piedra. Si en el proceso es agua la que se calienta, la forma más lógica de almacenar la energía es como calor sensible del agua. En este caso la energía es agregada y renovada por transporte del mismo medio que la almacena y se evita así la caída de temperatura que se produce entre el medio de transporte y el fluido que acumula. Para calcular la eficiencia de estos acumuladores existen numerosos modelos. (Duffie y Beckman, 1991). Se ha demostrado por otro lado que la estratificación de la temperatura en los tanques generalmente conduce a una ganancia en la eficiencia de acumulación de calor entre un 6 y un 15 % respecto a sistema mezclados (Eldessouky, 1993).

Cuando el fluido que transporta la energía es aire se utilizan acumuladores en lecho de piedra. Entre las ventajas que presentan estos acumuladores se pueden mencionar:

1. La disponibilidad y costo relativamente bajo del material de almacenamiento.
2. El contacto directo entre el fluido y el material sólido, lo que resulta en un gradiente pequeño de temperatura.
3. La baja conductividad térmica de los sólidos en la dirección radial que reduce los requerimientos de aislación.
4. No hay límite para la temperatura de almacenamiento.
5. Estratificación térmica.

La acumulación en lechos de piedra presenta la desventaja que se requieren grandes volúmenes de almacenamiento debido a la baja capacidad calorífica de la piedra.

Para este tipo de lecho existen varios análisis teóricos que permiten definir parámetros operacionales tales como flujo de masa de aire, fracción de huecos, tamaño de lecho, propiedades del sólido, etc. (Choudhury et al, 1993). Se ha comprobado que la estratificación del calor aumenta la eficiencia del sistema en un 5 % y la cantidad de calor almacenado por día en 25 % (El-Kassaby y Ghoem, 1993). Choudhury *et al.* (1995) hicieron consideraciones sobre aspectos relacionados con el costo y la efectividad, ya que el costo del equipo solar juega un papel importante a la hora de definir el diseño del sistema.

Uno de los posibles usos de este tipo de acumulador es almacenar el calor proveniente de un invernadero durante el día y utilizarlo posteriormente durante la noche. Pero un inconveniente que posee es que los volúmenes involucrados son importantes con relación al tamaño del invernadero. Teniendo en cuenta este problema y considerando que el calor específico del agua es unas 4 veces superior al de la piedra y su densidad aparente, una vez empacada, unas 1,8 veces menor, hace que el uso del agua en lugar de la piedra permita reducir prácticamente a la mitad el volumen necesario para una misma cantidad de calor. En el INENCO - Salta se ha construido un acumulador tipo lecho en donde se ha reemplazado las piedras por botellas de plástico conteniendo agua. La simulación del sistema permitió inferir los coeficientes de transferencias de calor involucrados (Saravia *et al.*, 2000).

---

<sup>1</sup> INENCO, U.N.Salta

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

En el presente trabajo se realiza el estudio de un prototipo de acumulador en lecho de agua con el objeto de determinar experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor y se plantean las ecuaciones que permiten calcularlo teóricamente. Mediante la analogía térmica eléctrica se modeliza el lecho y se simula el comportamiento del mismo para distintas configuraciones. Los circuitos eléctricos correspondientes se resuelven con el programa de cálculo SCEPTRE (Becker, 1998).

### PROTOTIPO EXPERIMENTAL

El prototipo propuesto para el acumulador en lecho de agua consiste en una estructura de hierro de 0,60 m de ancho por 0,50 m de alto por 1,46 m de largo, con paredes de poliestireno expandido de 0,005 m de espesor y en cuyo interior se colocaron cuatro bloques de veinticinco (25) botellas cada uno conteniendo agua. El aire succionado por un ventilador axial se calienta antes de entrar a la sección de las botellas mediante tres (3) velas de cuarzo. Se colocaron veintiséis (26) termopares de Cu-Cn distribuidos en distintas posiciones del aire y dentro de las botellas con agua y sensores en la entrada y a la salida del lecho, conectados a un sistema automático de adquisición de datos programado para registrar valores cada 10 minutos. La velocidad del flujo de aire se midió en nueve (9) lugares del ducto de salida.

La fracción de huecos se determinó colocando ocho (8) botellas en un recipiente que fue llenado hasta una marca con un volumen determinado de agua, luego se sacaron las botellas y se completó con agua el volumen del recipiente; haciendo el cociente entre estos volúmenes se obtuvo dicha fracción.

La caída de presión fue determinada mediante la siguiente fórmula (Duffie y Beckman, 1991):

$$\Delta P = \frac{L G_0^2}{\rho_a D} \left( 21 + 1750 \frac{\mu}{G_0 D} \right) \quad [1]$$

donde L es la longitud del lecho en la dirección del flujo,  $G_0$  es el flujo másico de aire por área frontal del lecho ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^2$ ), D es el diámetro de la partícula en metro y  $\rho_a$  y  $\mu$  son la densidad y viscosidad dinámica del aire respectivamente.

En la figura 1 se muestra un esquema del prototipo como asimismo la distribución de los termopares en los módulos y en la tabla N° 1 se detallan las características física y operativas del lecho.

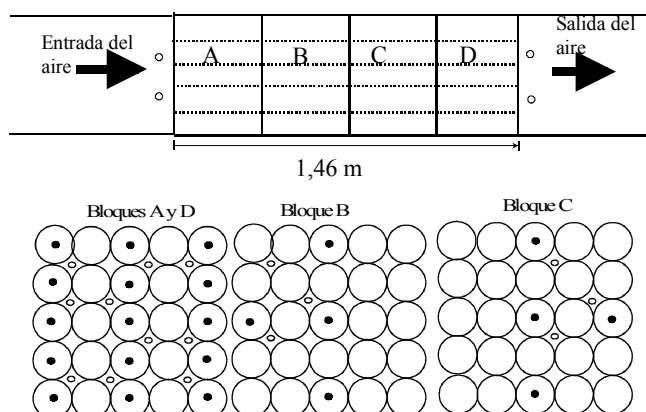


Figura 1. Esquema del lecho de agua y distribución de termopares

Ancho del lecho (W)	0,6 m
Largo del lecho (L)	1,46 m
Alto del lecho (H)	0,5 m
Diámetro equivalente de las botellas	0,09 m
Longitud equivalente de la botella	0,365 m
N° de filas de botellas en cada módulo	5
Fracción de huecos ( $F_h$ )	0,49
Velocidad promedio del aire en el conducto de salida	$0,14 \text{ m s}^{-1}$
Flujo másico de aire	$0,05 \text{ kg s}^{-1}$
Flujo másico de aire por unidad de área	$0,166 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
Caída de presión	9,12 Pa

Tabla 1. Características físicas y de funcionamiento del lecho de agua

### DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La determinación experimental del coeficiente promedio de transferencia de calor h, entre el agua contenida en las botellas y el aire circulante se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$h = \frac{m_w c_p (t_o - t_i)}{A (t_m - t_a) \tau} \quad [2]$$

donde  $m_w$  y  $c_p$  son la masa y el calor específico del agua respectivamente,  $t_i$  es la temperatura promedio inicial del agua y  $t_o$  la temperatura final luego de un tiempo  $\tau$ ;  $t_m$  es la temperatura promedio del agua en ese período y  $t_a$  la temperatura promedio del aire en el mismo tiempo.

El coeficiente de transferencia de calor teóricamente se puede determinar utilizando el coeficiente volumétrico entre el aire y el agua mediante la ecuación (Duffie y Beckman, 1991):

$$h_v = 650 \left( \frac{G_o}{D} \right)^{0,7} \quad [3]$$

Esta ecuación ha sido desarrollada para partículas de formas esféricas, condición que no se cumple en el lecho construido. Por lo tanto para el cálculo de  $h_v$  se utilizó como longitud característica el largo de las botellas y no su diámetro. Otra forma de calcular el coeficiente de transferencia de calor es teniendo en cuenta que el proceso involucra una transferencia convectiva entre el aire circulante y la superficie de las botellas ( $h_{c,a-b}$ ), un proceso conductivo a través del espesor de la botella y una convección natural entre la pared de la botella y el agua ( $h_{c,b-w}$ ). Para el cálculo de  $h_{c,a-b}$  se utilizó la ecuación empírica:

$$Nu = B Re^n \quad [4]$$

donde Nu es el número de Nusselt, Re el número de Reynolds, B y n son constante que dependen del número de Reynolds (McAdams, 1978). Para el cálculo del número de Reynolds se supuso que el aire circula a través de los canales que quedan formados entre las botellas.

Para la transferencia de calor entre la botella y el agua se utilizó la ecuación empírica recomendado por McAdams (1978):

$$\frac{h_{c,b-w} D_e}{k_f} = 0,53 [Gr Pr]^{0,25} \quad [5]$$

donde: Gr: Número de Grashof  
Pr: Número de Prandtl  
 $k_f$ : conductividad térmica del agua  
 $D_e$ : diámetro equivalente de la botella

La resistencia conductiva a través de las paredes de la botella se calculó mediante la ecuación de conducción correspondiente a un cilindro hueco. Por tanto la resistencia térmica equivalente del proceso ( $R_{t,e}$ ) se calculó con la ecuación:

$$R_{t,e} = \frac{1}{A_b (h_{c,a-b})} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \pi k L} + \frac{1}{A_b (h_{c,b-w})} \quad [6]$$

donde  $A_b$  es el área superficial de una botellas,  $D_o$  y  $D_i$  son los diámetros exterior e interior, L la longitud botella y k la conductividad térmica del plástico. El coeficiente global de transferencia entre el aire y el agua se determinó mediante:

$$h = \frac{1}{R_{t,e} \cdot A_b} \quad [7]$$

## MODELIZACIÓN DE ACUMULADOR EN LECHO DE AGUA

Una forma sencilla de resolver las ecuaciones que describen el comportamiento de un lecho es utilizando la analogía que existe entre la transferencia de calor y la corriente eléctrica (Saravia *et al.*, 2000, Iriarte, 2001). De la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia térmica con los fenómenos de transferencia de calor. En el estudio del comportamiento térmico del acumulador en lecho propuesto se emplea esta analogía y el problema se reduce a la resolución de un circuito eléctrico, para el cual existen software especiales. Uno de estos programas es el SCEPTRE que utiliza el método de variables de estado para resolver circuitos eléctricos (Becker D., 1998).

Para la construcción del circuito eléctrico análogo al térmico se comienza identificando los puntos representativos (nodos) que se conectan con elementos eléctricos representativos de los fenómenos térmicos. Los coeficientes de pérdidas de calor se calculan como resistencias térmicas y se representan con RD si las pérdidas son conductivas; con RV si las pérdidas son convectivas y con RR si las pérdidas son por radiación. Los flujos asociados con flujos de masa (JMQ) se representan con fuentes de corrientes. La acumulación de calor sensible se esquematiza mediante capacitores (C) y las fuentes de tensión (E) representan valores de temperatura conocidos. Para determinar el valor de la temperatura en un nodo se utiliza como termómetro una fuente de corriente (JT) de valor nulo entre el nodo y la tierra. El valor se mide con la diferencia de potencial de la fuente (VJT).

En el modelo, el acumulador de calor se ha dividido en cuatro (4) sectores que están conectados entre sí por fuentes de corriente. Los nodos 2A, 2B, 2C y 2D se refieren al aire y los nodos 3A, 3B, 3C y 3D al agua dentro de las botellas para los

distintos sectores. Se considera que tanto el agua como el aire tienen concentrada su masa en esos nodos. En los nodos correspondientes al agua se colocaron capacitores que representan la acumulación de calor del agua. Los valores de tensión de la fuente E2 representan los valores de temperatura de entrada del aire durante la carga y la descarga y la fuente E4 representa los valores de la temperatura ambiente que se consideró fija en 20°C. La figura 2 muestra el esquema térmico del primer sector y el circuito eléctrico análogo de todo el acumulador. La masa del agua del prototipo es 228 kg y teniendo en cuenta que el calor específico es de  $4190 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , la capacidad calorífica de la misma es  $955,32 \text{ kJ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

La transferencia de calor entre el aire y el agua está representada por la resistencia térmica equivalente RV, y la pérdida de calor entre la caja y el ambiente exterior se contempló con la resistencia conductiva RD a través de las paredes del recinto.

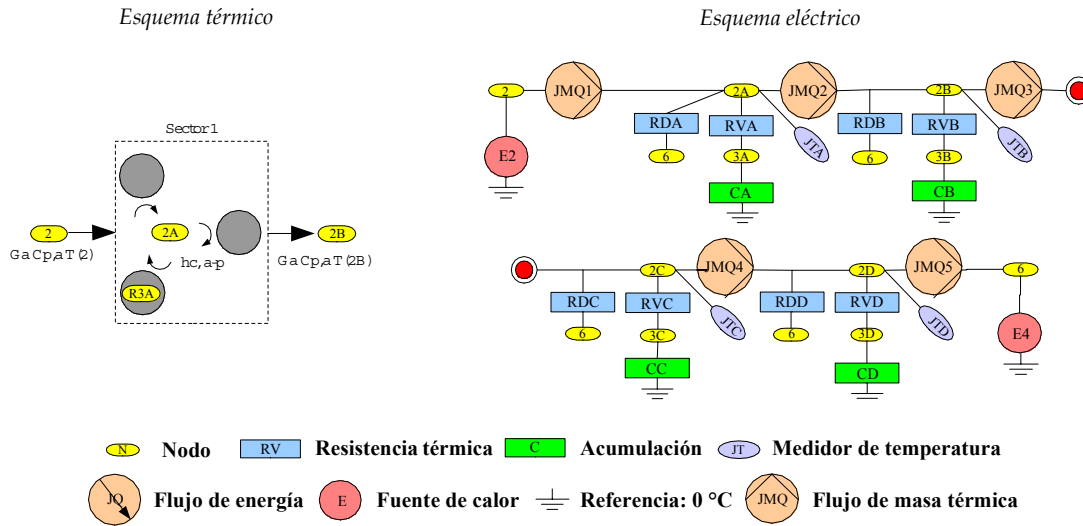


Figura 2. Esquema térmico y eléctrico para el acumulador en lecho de agua

Mediante el programa se simularon distintas configuraciones del lecho analizando para cada una de ellas las temperaturas del agua como así también la energía diaria acumulada para cada situación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta las temperaturas promedio del agua y del aire para los distintos bloques del prototipo se determinó experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor entre el aire y el agua de las botellas obteniéndose el valor de  $11,07 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para este coeficiente.

Utilizando la ecuación [3] para el cálculo teórico del coeficiente de transferencia de calor, para un caudal de  $G = 0,05 \text{ kg s}^{-1}$  y para las características del prototipo, se obtuvo un valor de  $h = 15 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , mientras que el valor calculado mediante la ecuación [7], dio un valor  $h = 11,78 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Dada la similitud entre el valor medido y el calculado mediante la resistencia térmica equivalente, se utilizaron las ecuaciones [4], [5], [6] y [7] para la determinación de la resistencia convectiva RV.

Para validar el modelo se tuvieron en cuenta los valores de temperatura medidos en el prototipo. La temperatura del agua en las botellas fue simulada y comparada con los datos experimentales. Los resultados se muestran en la figura 3 donde se comparan los datos experimentales y simulados de la temperatura del agua para el primer bloque de botellas del lecho. La desviación promedio fue de  $0,41 \text{ }^\circ\text{C}$  con un error relativo promedio del 1,05 %. A partir de las 4:13 horas las gráficas empiezan a separarse hasta alcanzar una desviación de  $1,10 \text{ }^\circ\text{C}$  con un error del 2,6 % a las 7:40 horas. Si se realiza una gráfica entre los valores experimentales (variable independiente) y simulados (variable dependiente) se obtiene un ajuste con un  $R^2$  de 0,998.

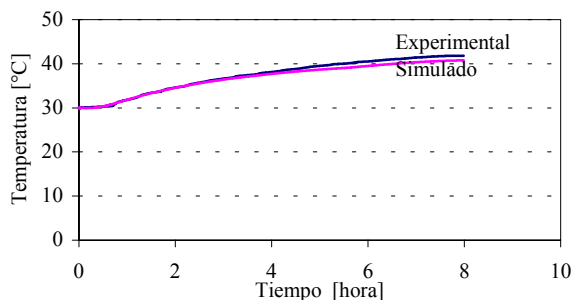


Figura 3. Comparación de los valores medidos y simulados de las temperaturas del agua

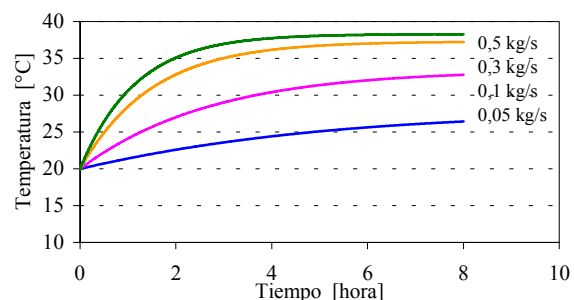


Figura 4. Variación de la temperatura promedio del agua para distintos flujos de aire

El modelo se utilizó para investigar la influencia del flujo de aire y la longitud del lecho en el comportamiento del acumulador.

En la figura 4 se muestra la variación de temperatura promedio del agua en función del tiempo, para distintos caudales de circulación de aire en el tiempo de carga de 8 horas, con una temperatura constante de 40 °C. Como puede verse para un flujo másico de aire de 0,05 kg s<sup>-1</sup> la ganancia promedio de temperatura del lecho es de 6 °C para el tiempo fijado para la carga. Para flujos de 0,3 kg s<sup>-1</sup> o superiores, el lecho alcanza un valor de temperatura constante en menor tiempo.

En la figura N° 5 se muestra las temperaturas en los cuatro bloques del prototipo para los siguientes caudales: de 0,05 kg s<sup>-1</sup>, 0,08 kg s<sup>-1</sup>, 0,1 kg s<sup>-1</sup>, 0,3 kg s<sup>-1</sup> y 0,5 kg s<sup>-1</sup>, observándose la estratificación de temperatura la cual se mantiene constante para caudales superiores a 0,4 kg s<sup>-1</sup>.

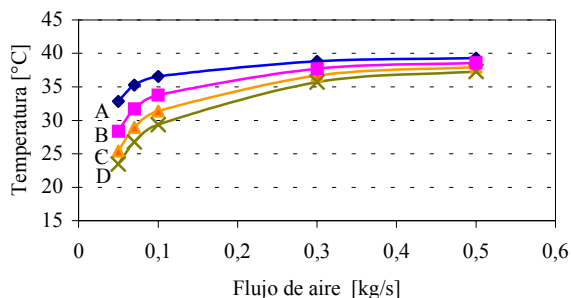


Figura 5. Temperatura del agua en distintas posiciones en función del flujo de aire para el tiempo de carga

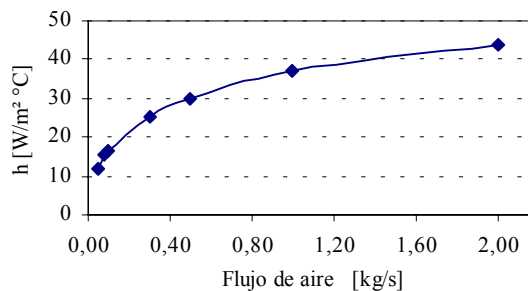


Figura 6. Coeficiente de transferencia de calor en función del flujo de aire

Como era de esperar el flujo de aire es uno de los parámetros que más afectan el rendimiento del acumulador, pues el coeficiente de transferencia de calor entre el aire y la botella depende de este flujo. Como se ve en la figura 6 el coeficiente de transferencia aumenta rápidamente en función del flujo para caudales inferiores a 0,5 kg s<sup>-1</sup>.

La tabla 2 muestra la energía almacenada al cabo de las ocho horas de carga para distintos flujos másicos de aire y para los cuatro bloques del prototipo construido.

G [kg s <sup>-1</sup> ]	Bloque A [MJ]	Bloque B [MJ]	Bloque C [MJ]	Bloque D [MJ]	Energía Acumulada Pro- medio [MJ]
0,05	12,55	10,85	9,72	8,97	10,52
0,1	13,97	12,90	11,99	11,22	12,52
0,3	14,84	14,41	14,01	13,64	14,22
0,5	15,01	14,75	14,50	14,25	14,63

Tabla 2. Energía acumulada por el agua para distintos flujos de aire y en distintas posiciones para el tiempo de carga

Si se tiene en cuenta la energía acumulada promedio referida al aumento en el flujo de aire, para caudales entre 0,05 kg s<sup>-1</sup> y 0,1 kg s<sup>-1</sup>, para caudales entre 0,1 kg s<sup>-1</sup> y 0,3 kg s<sup>-1</sup> y para caudales entre 0,3 kg s<sup>-1</sup> y 0,5 kg s<sup>-1</sup>, se obtienen para esta relación los valores 40 MJ kg<sup>-1</sup>s, 8,5 MJ kg<sup>-1</sup>s y 2 MJ kg<sup>-1</sup>s respectivamente, advirtiéndose que para caudales de aire superiores a 0,3 kg s<sup>-1</sup> la variación en la energía acumulada por el lecho no es significativa. Por lo tanto si bien el caudal de aire es uno de los parámetros necesarios para tener en cuenta, para una dada configuración del acumulador existe un caudal límite. Valores superiores a este caudal no producen cambios energéticos apreciables. Este hecho se puede apreciar también en la figura N° 7 donde se muestra la variación de la energía acumulada promedio en función del tiempo para distintos flujos de aire.

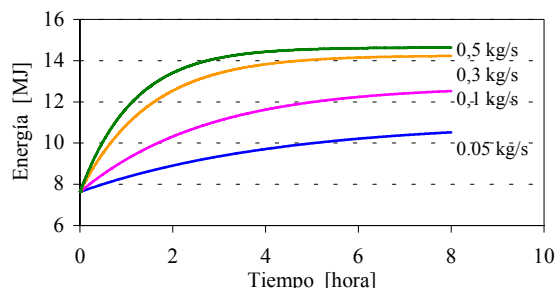


Figura 7. Variación de la energía acumulada promedio para distintos flujos de aire

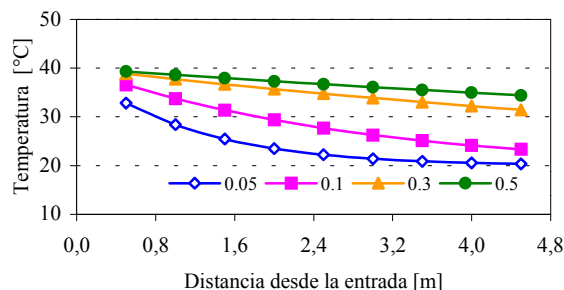


Figura 8. Variación de la temperatura del agua con la longitud del lecho para el tiempo de carga

La influencia de la longitud del lecho se muestra en la figura 8 donde se ve claramente la dependencia que tiene este parámetro con el flujo de aire para una sección transversal del lecho fija (0,3 m<sup>2</sup>) y para un tiempo de carga dado (8 h). Si se analizan las curvas se advierte que la distancia para la cual la temperatura se hace estable, depende del flujo de aire.

## CONCLUSIÓN

La determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor permitió ajustar las ecuaciones necesarias para su cálculo teórico.

Los datos simulados se ajustaron a los experimentales con error relativo porcentual de la desviación del 2 %, valor que se considera aceptable para este caso ya que es muy difícil mantener un flujo de aire uniforme a través de las botellas. Asimismo el modelo propuesto ha demostrado ser una herramienta útil a la hora de analizar y optimizar el comportamiento de acumuladores tipo lecho.

## REFERENCIAS

- Becker David, Extended SCEPTRE, Vol1, User's manual, edit. Wolf - Rainer Novender, 1998.
- Choudhury C. y Garg H.P., Performance calculations for closed-loop air- to-water solar hybrid heating systems with and without a rock bed in the solar air heater, *Renewable Energy*, Vol3, N° 8, pp.897-905, 1993.
- Choudhury C., Chauhan P.M., y Garg H.P, Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy, *Solar Energy*, Vol. 55, N° 1, pp 29-37,1995.
- Duffie A y Beckman W, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley Interscience, 2da Ed., 1991.
- Eldessouky E.A.E., A long term system performance for stratified solar storage container, *Renewable Energy*, Vol 3, N° 6/7. pp 633-643, 1993.
- El-Kassaby, M. M. y Ghoneim A. A., Comparison of measured and predicted performance of different heat storage systems, *Renewable Energy*, Vol3, N° 8, pp.849-856, 1993.
- Iriarte A. (2001). Acondicionamiento término solar de invernaderos para la producción agrícola intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- McAdams, W.H., *Transmisión de calor*, Mc Graw Hill, 3<sup>rd</sup> Ed, 1978.
- Saravia L. y Saravia D. (2000). Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, ASADES, Vol. 4, pp. 8.17 – 8.22.
- Saravia L., Echazú R., Quiroga M y robredo P., Acumulador de agua para climatización de invernaderos armado con botellas de PET, *Avances en Energías renovables y medio Ambiente*, Vol 4, N° 1, pp. 02.07-0.2.12, 2000.

## ABSTRACT

In solar systems applications, generally the energy demand does not fit with the period of supplying solar energy, so the use of a heat storage unit is indispensable. In the case that thermal energy be used, it is convenient to store it as sensible heat or as latent heat of a phase- change material. A liquid, generally water, or a solid, usually rocks, can be used to store energy as sensible heat. Rocked beds storage is used when the fluid that carries the energy is air, but taking into account the advantage of water to store heat, an option to store energy is to replace the rocks by plastic bottle with water. The objective of the present work is to study the thermal behaviour of a "water bed", built with water - containing plastic bottles, by means of a model based on the thermal - electric analogy. To determine heat transfer coefficients and to validate the model, a "water bed" was built and its physical and thermal characterisation was established. The model was validated and found to fit well to experimental data.