

**EL ENSAYO DE UN ACUMULADOR DE PIEDRAS COMO PRÁCTICO DE  
LABORATORIO DE UN CURSO DE LA MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**Luis Saravia<sup>1</sup>, Ricardo Echazú<sup>2</sup>  
INENCO<sup>3</sup>Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta - República Argentina  
E-Mail : echazu@ciunsa.edu.ar , FAX 54-87-255489 -**RESUMEN**

Para el dictado de la Maestría en Energías Renovables en la Universidad Nacional de Salta, se pusieron en marcha una serie de actividades prácticas en laboratorio relacionadas con un curso de transferencia de calor. Una de ellas, que se describe en este trabajo es el estudio experimental de un acumulador de calor en lecho de piedras, para el que se diseñó y construyó un equipo en pequeña escala, que fue ensayado por cuatro grupos de alumnos de la maestría. Se presentan resultados con los valores obtenidos y se comparan con una simulación del sistema realizada con el programa Mathematica 2.2.

**INTRODUCCIÓN**

Los acumuladores de piedras se utilizan generalmente combinados con colectores de aire y sus principales aplicaciones son el acondicionamiento térmico de viviendas, invernaderos y sistemas de secado. (1), (3), (4), (5), (7)

Algunos modelos describen el calentamiento y enfriamiento de los lechos de piedras, entre ellos el de Schuman, para circulación en una sola dimensión, que considera propiedades constantes y no tiene en cuenta la conducción axial o dispersión, ni la disipación de calor al ambiente. No contempla tampoco gradientes de temperatura entre las partículas del material.

En esta condiciones, las ecuaciones diferenciales para la temperatura del fluido y del lecho son

$$(\rho C_p)_f \epsilon \partial T_f / \partial t = - (1/A) (m C_p)_s (\partial T_f / \partial x) + hv (T_b - T_f)$$

$$(\rho C_p)_b (1-\epsilon) (\partial T_b / \partial t) = hv (T_f - T_b)$$

donde  $\epsilon$  es el factor de huecos del lecho y  $hv$  es el coeficiente volumétrico de transferencia de calor entre el lecho y el fluido.

En el laboratorio se ensaya el ciclo de carga de un acumulador a pequeña escala, con aire ingresando a temperatura constante y midiendo las variables de operación. Con estos datos experimentales se calculan los parámetros representativos del sistema.

**EQUIPO EXPERIMENTAL**

El equipo empleado, que se esquematiza en la figura 1, está compuesto por un lecho de piedras de 0.096 m<sup>3</sup>, soportado en un cajón de madera, a través del cual se impulsa aire con un ventilador tangencial. El aire se calienta por medio de resistencias eléctricas antes de ingresar al acumulador y luego sale al ambiente. En la tabla 1 se indican los valores de las constantes del sistema.

Se miden las variables de operación del equipo, durante un ciclo de carga, manteniendo, constantes la velocidad del aire de entrada al acumulador y el aporte de energía térmica de las resistencias. La temperatura inicial de la masa de piedras es uniforme y cercana a la temperatura del laboratorio.

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

<sup>2</sup> Personal del Consejo de Investigación de la UNSa

<sup>3</sup> Instituto UNSa- CONICET

Tabla 1 : Constantes del sistema.

Longitud del acumulador	0.60	m	Potencia nominal del ventilador	1/10	H.P.
Ancho del acumulador	0.40	m	Potencia nominal de las resistencias	2 x 700	W
Altura del acumulador	0.40	m	Capacidad calorífica de la piedra	950	J / Kg C
Diámetro de la cañería de entrada	0.20	m	Capacidad calorífica del aire	1007	J / Kg C
Largo de la cañería de entrada	2.00	m	Factor de forma	1.5	Adimensional

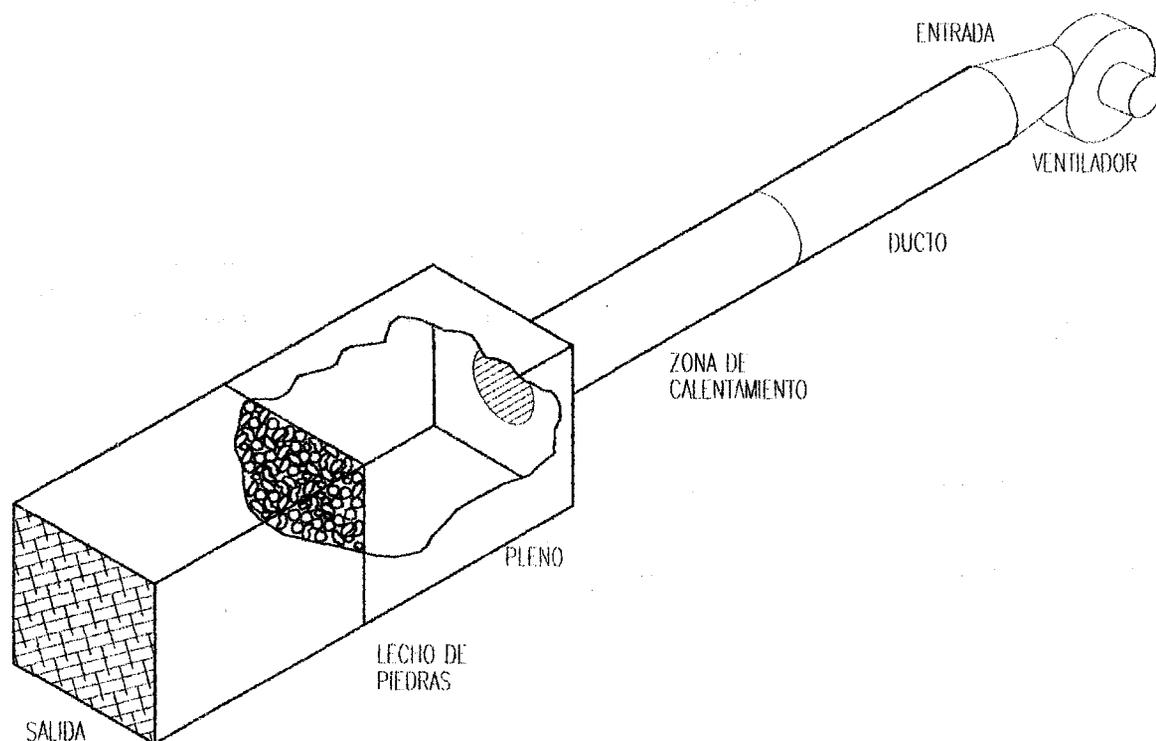


Figura 1 : Vista general del equipo.

## MEDICIONES

1- Temperaturas: Se mide el perfil de temperatura en la masa de piedras, sobre el eje central, con espacios de 8.5 cm entre cada punto, con un conjunto de 8 termocuplas. Las lecturas se realizan con intervalos de 5 minutos.

2- Caudal: Con una sonda anemométrica direccional se mide la velocidad del aire en la cañería de entrada tomando puntos situados a 2 cm sobre un eje vertical y otro horizontal. Se obtiene el caudal volumétrico integrando estos valores sobre la sección de la cañería.

3- Caída de presión: se mide la caída de presión provocada por la masa de piedras y por la cañería, con un manómetro de agua de columna inclinada conectado en orificios laterales del equipo.

4- Potencia eléctrica: Con un watímetro digital se mide la potencia absorbida por las resistencias eléctricas y por el ventilador durante la operación.

5- Caracterización del relleno: Se determina el factor de huecos la densidad de la piedra y la densidad aparente del lecho, midiendo pesos y volúmenes de una muestra. Se cuentan las piedras.

Con los valores obtenidos, se sigue el procedimiento de Duffie (8) para caracterizar el material y se calcula:

El factor de huecos de la muestra, se determina pesando una muestra en un recipiente de volumen conocido  $V$ , al que se agrega agua llenado los huecos y se vuelve a pesar. Entonces se calcula:  $\epsilon = m_w / (\rho_w \cdot V)$

Donde  $m_w$  es la masa de agua y  $\rho_w$  su densidad. Si la masa de piedras es  $m$ , la densidad se calcula como:  $\rho_p = m / V(1 - \epsilon)$

El diámetro medio, definido como el diámetro de una esfera del mismo volumen, se obtiene como:  $D = (6m / \pi \rho_p N)^{1/3}$

Donde  $N$  es el número de piedras de la muestra.

El factor de forma  $\alpha$  es la relación entre la superficie de cada piedra y la de una esfera de igual volumen. Se tomó un valor de 1.5 característico del material de los rios de montaña.

Se completa entonces la tabla 2 con los valores obtenidos por uno de los grupos:

Tabla 2: Valores calculados en base a las medidas

Volumen de la muestra	$V = 0.008 \text{ m}^3$	Factor de huecos	$\epsilon = 0.425$
Factor de forma	$\alpha = 1.5$	Número de piedras de la muestra	$N = 1535$
Masa de la muestra	$m = 15 \text{ Kg}$	Diámetro medio de piedra	$D = 0.01788 \text{ m}$
Masa de agua	$m_w = 3.4 \text{ Kg}$	Caudal másico por unidad de sección	$G_0 = 0.975 \text{ Kg/s m}^2$
Densidad del agua	$\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$	Densidad del aire	$\rho_a = 1.16 \text{ Kg/m}^3$
Densidad de la piedra	$\rho_p = 3260 \text{ Kg/m}^3$	Viscosidad del aire	$\mu = 0.00001857 \text{ Kg/m s}$

La evolución de temperaturas y de energía acumulada, se presenta en las figuras 2 y 3. La energía acumulada, se graficó como porcentaje de la carga máxima posible que se obtiene con todo el acumulador a la temperatura de carga. La figura 4 muestra la evolución temporal del perfil de temperatura, obtenido por simulación.

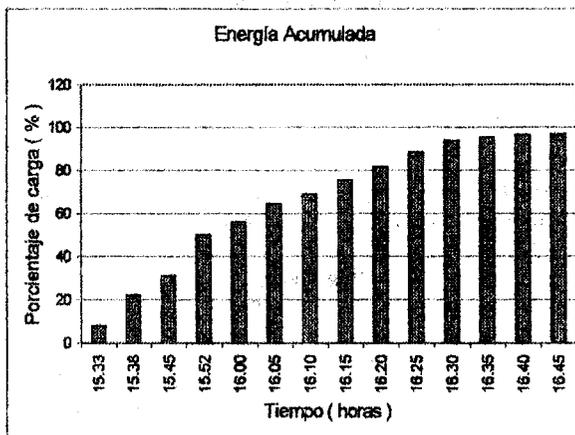
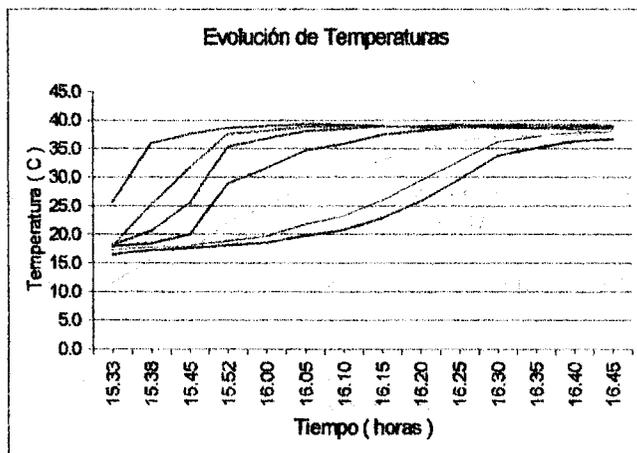


Figura 2 : Evolución temporal del perfil de temperatura

Figura 3 : Incremento de la energía acumulada en el tiempo

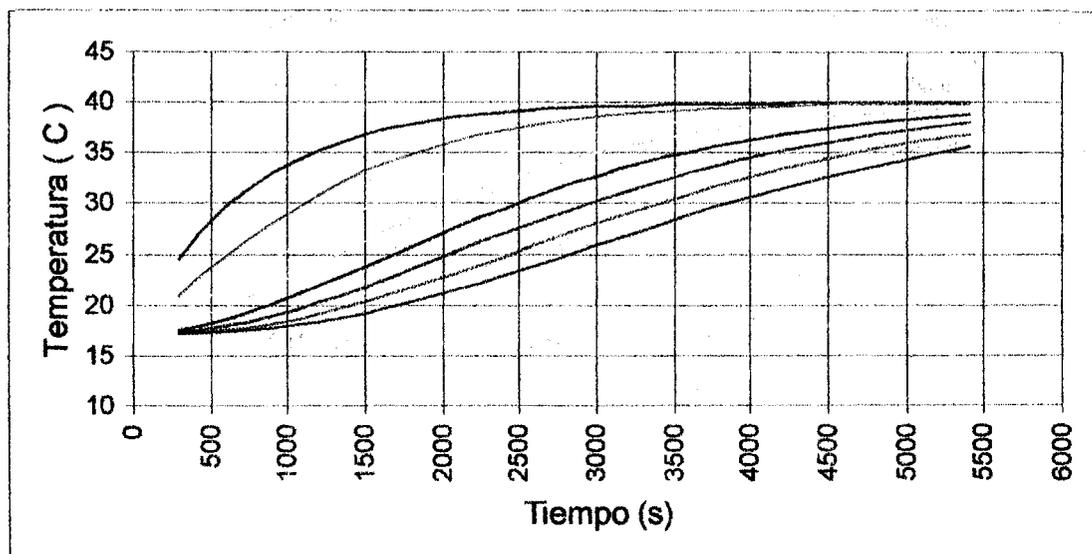


Figura 4: Evolución de temperaturas simulada.

## CONCLUSIONES

Se considera que este práctico es altamente instructivo como aplicación en cursos de transferencia de calor en la enseñanza de la tecnología de las energías renovables.

Con el fin de posibilitar la realización de la experiencia en dos horas, se han elegido adecuadamente los parámetros del sistema. En particular, la velocidad del aire en la sección del acumulador es mayor que la empleada habitualmente en los acumuladores reales, para que el sistema evolucione rápidamente.

El equipo diseñado es de muy bajo costo y con instrumentos adecuados permite tomar todas las medidas necesarias para el cálculo del balance térmico del acumulador, siguiendo la evolución de temperaturas de un ciclo de carga. De este modo, en muy poco tiempo se toman datos experimentales, adquiriendo práctica con varios instrumentos, se los elabora y se los compara con valores simulados, del mismo modo en que se procede para el dimensionamiento de acumuladores a mayor escala.

Para mayor generalidad de los resultados, sería conveniente repetir las medidas con diferentes valores de velocidad del aire y otros tamaños de piedra, pero esto obligaría a dedicar un tiempo considerablemente mayor a la experiencia.

En el mencionado curso sobre transferencia de calor, se ha empleado el paquete de rutinas Ind Therm del programa Mathematica 2.2 como base de cálculo para los distintos ejercicios de transferencia conductiva, convectiva y radiativa.

Este paquete tiene una base de cálculo analítica, por lo que no puede realizar la simulación de algunos sistemas, entre los cuales se encuentran los acumuladores de piedra. El programa preparado, se puede incluir como parte del paquete aumentando su utilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1- "Acondicionamiento por Vía Solar de un Sistema de Cultivo Hidropónico bajo Invernadero". Diseño y Construcción., L. Saravia, M. Quiroga, R. Echazú, C. Cadena. Actas de la 19a. Reunión de Trabajo de ASADES, Mar del Plata 1996 p.p. 01.29
- 2- " A Method of Simulating The Perfomance of a Pebble Bed Thermal Energy Storage and Recovery System " Mumma, S. D. and WC Marvin, AASME 76-HT-73 (1976)
- 3- "Construcción y Ensayo de un Secadero Solar de Tabaco": E. Frigerio, L. Saravia, I. de Paul, R. Echazú, J. Arias y D. Fernández de Ulibarri. Actas de la 6a. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar y Ambiente, ASADES, Catamarca 1980 p.p.39
- 4- "Cultivo Hidropónico en Invernadero: Uso de Acumulador de Piedras y Malla Aluminizada para Control Térmico" L. Saravia, R. Echazú, M. Quiroga, C. Cadena, P. Robredo, S. Flores. Actas de la 20 a Reunión de ASADES, Río Cuarto, 1997. p.p. 29
- 5- " El diseño de los Acumuladores de Piedra" L. Saravia y E. Alanis. Actas de 2a. Reunión de Trabajo de ASADES. Salta 1976.
- 6- " Packet Bed Thermal Storage Models for Solar Air Heting and Cooling Systems " Huges, P.J.S.A. and Close D. Trans ASME, J. Heat Transfer 98, 336 (1976)
- 7- "Programa de Secado Solar de Tabaco: Segunda Fase": L. Saravia E. Frigerio, I. de Paul y R. Echazú. Actas de 7a. Reunión de Trabajo de ASADES. Rosario 1981. p.p. 11
- 8- " Solar Engineering of Thermal Processes " J. Duffie and W. Beckman. John Wiley & Sons N. York 1991