

CARACTERIZACION DE UN ACUMULADOR DE PIEDRA CON FLUJO DE AIRE NO REVERSIBLE ¹

S. Bistoni, A. Iriarte³, V. Luque y L. Saravia^{2,3}
INENCO, Fac. de Ciencias Agrarias – UNCa
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca - sbistoni@fcasuser.unca.edu.ar

RESUMEN: Debido a las características climáticas de la región del NOA en los invernaderos se produce un sobrecalentamiento durante el día, mientras que durante la noche es necesario calefaccionarlos. Dado la no simultaneidad de estos procesos se hace necesario la utilización de un almacenamiento temporario de energía. En el presente trabajo se describe un acumulador formado por dos lechos de piedra que presentan la particularidad que el flujo de aire no es reversible como sucede en los lechos convencionales para la carga y descarga. Se describen los procesos de carga y descarga, se determina la dirección de circulación del aire dentro de cada lecho y se analiza el comportamiento teórico y experimental. Durante tres días de funcionamiento continuo la carga energética promedio del acumulador fue de 73,7 MJ y la energía entregada de 57 MJ. Este sistema de acumulación resulta ser un sistema atractivo y económico para almacenar energía.

Palabras clave: lecho de piedra, calefacción solar, comportamiento.

INTRODUCCIÓN

En nuestra región durante el invierno se alcanza altos niveles de radiación solar por lo que durante el día la temperatura interior de los invernaderos excede los valores óptimos. Por lo tanto se hace necesario ventilarlos constituyendo una pérdida de la energía. Por otro lado durante las primeras horas de la mañana es necesario calefaccionarlos para evitar que la temperatura del ambiente interior descienda a valores que sean perjudiciales para el cultivo. Como en esta situación no hay simultaneidad entre la disponibilidad y el requerimiento de energía, se hace necesario considerar un sistema de almacenamiento temporario a fin de mantener la continuidad del proceso térmico.

La elección del medio de almacenamiento depende de la naturaleza del proceso. Los más comunes son en forma de calor sensible de líquidos o sólidos. Si en el proceso es agua la que se calienta, la forma más lógica de almacenamiento es como calor sensible del agua. Pero cuando el fluido es aire conviene el almacenamiento de calor sensible en lechos de piedras (Telkes, 1955). Básicamente un lecho de piedra es un contenedor en donde se colocan piedras de pequeño tamaño y conductos de entrada y salida de aire. En los lechos convencionales el flujo de aire se mantiene en un sentido durante la carga y en sentido opuesto durante la descarga, con el propósito de aprovechar la estratificación de temperatura dentro de los mismos (Sayigh, 1979). La inversión del sentido de flujo implica generalmente un problema técnico - operativo, además de aumentar el costo del sistema.

En el presente trabajo se estudia como sistema de almacenamiento un acumulador que consta de dos lechos de piedras con flujo no reversible es decir presenta la particularidad que tanto la carga como la descarga se realiza en el mismo sentido y por los mismos conductos. El aire caliente que se utiliza para la carga proviene de la parte superior de un invernadero. Se determinan los parámetros de diseño y operacionales del lecho, y se analiza su comportamiento térmico.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL LECHO DE PIEDRA

El lecho de piedra está compuesto por un contenedor en forma de jaula con malla romboidal en sus lados, de 4,5 m por 1,5 m de ancho por 1 m de altura con el eje principal en la dirección Este - Oeste. Esta malla está soportada por 16 caños estructurales de 1,50 m de largo. Dentro de la jaula se colocaron las piedras y en la parte superior se colocó un plástico y una capa de 0,05 m de arena para evitar la salida de aire por esta zona. Los conductos de entrada se construyeron con malla tipo sima cuadrada de 0,15 m por 0,15 m. Todo el sistema fue envuelto con una capa de poliestireno expandido de alta densidad (16 kg m^{-3}) de 0,10 m de espesor formando una caja de $18,5 \text{ m}^2$ de superficie exterior. Esta caja presenta dos entradas en la parte superior Este y una salida en el medio del lateral que da hacia el Oeste. De esta manera, el aire que proviene del invernadero ingresa a cada módulo por la parte superior en el sector Este, atraviesa el lecho de piedra y regresa a través del ducto que queda formado por los dos módulos y por la abertura realizada en la parte Oeste de la caja. La figura 1 muestra esquemáticamente el lecho de piedra en planta y corte.

La circulación de aire a través de lecho se realiza mediante un ventilador de 2,24 kW (3 hp) colocado fuera del lecho, entre éste y el invernadero. Los tubos que unen el lecho con el invernadero son caños de PVC de 0,20 m de diámetro, aislados

¹ Parcialmente financiado por: ANCyT, INTA

² INENCO, U.N.Salta

³ Investigador del CONICET

convenientemente. Durante la descarga del lecho el aire caliente se distribuye dentro el invernadero mediante mangas de plástico transparentes agujereadas.

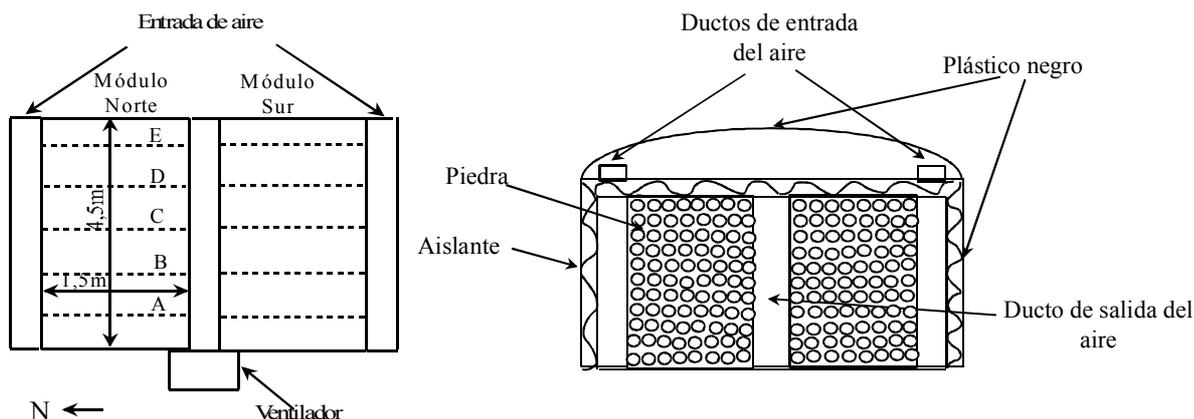


Fig. 1. Esquema del acumulador en planta y corte

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y OPERATIVA DEL LECHO DE PIEDRA

Para caracterizar físicamente el lecho se determinó el diámetro promedio de las piedras y la fracción de huecos. La fracción de huecos se determinó pesando las piedras colocadas en un contenedor de volumen V antes y después de llenarlo con agua. También se determinó la densidad de las piedras y el diámetro promedio de las mismas. La determinación experimental del calor específico de las piedras se realizó utilizando métodos calorimétricos. Para el cálculo de la caída de presión a través del lecho se utilizó la ecuación de Dunkle y Ellul:

$$\Delta P = \frac{L G_0^2}{\rho_{\text{aire}} D} \left(21 + 1750 \frac{\mu}{G_0 D} \right) \text{ donde } G_0 \text{ es la velocidad másica del aire (flujo másico de aire dividido por el área frontal del lecho) y } L \text{ es la longitud del lecho en la dirección de flujo.}$$

Para el cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de calor se utilizó la ecuación de Löff y Hawley:

$$h_v = 650 \left(\frac{G_0}{D} \right)^{0.7}$$

En la Tabla 1 se detallan las características físicas y operativas más relevante que hacen al funcionamiento de cada lecho de piedra. El acumulador completo tiene 13,5 m³ de piedra y una masa total de 20.000 kg. Un caudal de aire de 0,3 kg s⁻¹ circula a través del acumulador succionado por el ventilador e impulsandolo al interior del invernadero.

Fracción de huecos	0,46
Diámetro promedio [m]	0,040
Densidad de la piedra [kg m ⁻³]	2748,7
Calor específico de la piedra [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]	0,90
Caída de presión [Pa]	1,66
Velocidad de aire [m s ⁻¹]	4,22
Velocidad másica del aire [kg s ⁻¹]	0,15
Velocidad másica del aire por unidad de área [kg s ⁻¹ m ⁻²]	0,033
Coefficiente volumétrico de transferencia de calor [W m ⁻³ °C ⁻¹]	568

Tabla 1. Características físicas y operativas del lecho de piedra.

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

El software de control se basa en la comparación de la temperatura de referencia, temperatura del ambiente interior del invernadero, la hora del día y las temperaturas del aire a la entrada y salida del lecho de piedra. La temperatura de referencia es la temperatura de una placa de hierro aislada del ambiente por un vidrio y poliestireno expandido, simulando un colector solar. Esta ubicada en la parte superior del invernadero, próximo a la cubierta en posición vertical. Esta temperatura y la hora del día permiten al software optar por la subrutina según sea de día, noche o día nublado. Así por ejemplo, si la temperatura de referencia es mayor que 25 °C y la hora esta comprendida entre las 10 y 18 horas, el sistema de control reconoce que esta en un período diurno y ordena la puesta en funcionamiento del ventilador del lecho, controlando cada 4 minutos si la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de aire del lecho es positiva o negativa. En caso de ser negativa, automáticamente detiene el ventilador por espacio de 10 minutos, poniéndolo luego de ese periodo, nuevamente en marcha y repite el control periódicamente. El funcionamiento continuo del ventilador indica que el lecho esta cargando energía.

Si la temperatura de referencia es menor que 25 °C y la hora esta entre las 18 y 10 horas el software reconoce que es de noche y repite el sistema de control previsto para los horarios diurnos, pero acciona los contactores asociados al ventilador si la

temperatura del ambiente interior del invernadero es igual o menor que 12 °C. En este caso compara que la temperatura del aire a la salida del lecho de piedra sea mayor que la de entrada y además que la salida no sea menor que 7 °C, temperatura establecida como límite de funcionamiento del lecho. Durante los días nublados, temperatura de referencia menor que 25°C y la hora entre las 10 y 18 horas, la rutina de funcionamiento es igual que durante la noche, es decir que el sistema de acumulación entrega energía al invernadero.

Este sistema de control permite que el aire caliente que es succionado por un ventilador de la parte superior del invernadero, entre las dos cubiertas, atravesase cada cuerpo del lecho de piedra y sea impulsado hacia el interior del invernadero durante el día, mientras que durante la noche o un día nublado el aire del interior del invernadero es reciclado a través del lecho, incorporándose un 10 % de aire externo al mismo.

SISTEMA DE MEDICIÓN Y CONTROL

Para la medición de las temperaturas del acumulador de piedra, entrada - salida del aire y del ambiente exterior se utilizaron termopares de cobre - constantán conectadas a un sistema automático de adquisición de datos "Delta Logger" programado para registrar valores cada 30 minutos. Se colocaron 25 termopares en el interior del lecho de piedra ubicado en el módulo Norte y distribuidos en cinco planos perpendiculares al eje (A,B,C,D y E). Los planos E y A están ubicados a 0,25 m de los extremos Este y Oeste respectivamente, Fig. N° 1. Se incluyeron 5 termopares para la medición de las condiciones del aire a la entrada, salida y ambiente.

La radiación solar fue medida con un radiómetro Black & White y las temperaturas para el control con semiconductores LM35. Ambos sensores fueron acoplados a una computadora PC/AT provista por una tarjeta de adquisición de datos Keithley 1600 y a un circuito para el comando de contactores para el control del ventilador trifásico responsable de la circulación del aire en el lecho de piedra y en el invernadero.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y ENERGÉTICO DEL LECHO

La energía diaria almacenada (EDA) en cada módulo del lecho, se puede determinar utilizando los valores de temperatura de la piedra a lo largo de los planos distribuidos en el ancho del lecho y cada 0,25 m, mediante la siguiente ecuación obtenida de aplicar en la masa de piedra la ecuación calorimétrica en diferencias finitas:

$$EDA = \sum_{i=0}^{n-1} [(T_{pi} + T_{pi+1} / 2) - T_r] C_p M / 3$$

donde T_{pi} es la temperatura medida en el plano i , T_r es la temperatura de referencia mínima establecida para el lecho de piedra, n es el número de los planos considerados, M es la masa total del lecho y C_p el calor específico de la piedra. Utilizando la ecuación anterior y teniendo en cuenta la cantidad de energía que carga el lecho durante las horas diurnas y descarga durante las nocturnas se puede realizar un balance energético detallado para las diferentes horas de funcionamiento del acumulador. En la tabla 2 se muestra el comportamiento energético del lecho en términos de la energía colectada, acumulada y usada para tres días de ensayo.

	[MJ]			[kWh]		
	1er. día	2do. día	3er. día	1er. día	2do. día	3er. día
Energía disponible al inicio de la carga del acumulador	80.8	42.1	91.6	22.5	11.7	25.4
Energía cargada durante el día (carga del lecho)	58.3	77.1	85.8	16.2	21.4	23.8
Energía entregada al invernadero (descarga del lecho)	76.6	39.6	54.8	21.3	11.0	15.2
Exceso de energía (energía cargada – energía entregada)	-19.0	37.4	30.9	-5.3	10.4	8.6
Energía disponible en el acumulador al día siguiente	42.2	91.8	93.9	11.7	25.5	26.1

Tabla 2. Balance de energía en el lecho de piedra para tres días consecutivos de ensayo.

Como en el programa de control se ha fijado en 7 °C, que se considera el umbral próximo a la temperatura mínima biológica (5 °C), la energía se ha calculado respecto a esta temperatura.

En la figura 2 se muestra la energía acumulada durante la carga para distintas horas del día. En ella se advierte que la energía acumulada crece a razón de 0,0104 MJ s⁻¹ (37,5 MJ h⁻¹) hasta las 15:00 horas. A partir de allí la tasa de crecimiento disminuye hasta alcanzar el máximo valor de energía acumulada a las 16:10 horas. El proceso de acumulación continúa hasta las 18 horas pero se advierte que no sólo la tasa de acumulación ha disminuido sino también la energía.

Es claro que la carga de un acumulador de lecho de piedra con un sistema de calentamiento solar, como es un invernadero, no opera con valores constantes de temperatura de entrada porque existen variaciones de la radiación solar y de la temperatura ambiente. Por lo tanto, para realizar su estudio es necesario realizar las siguientes suposiciones:

- El flujo de aire en el lecho es unidireccional.
- No hay conducción axial o dispersión del calor.
- Las propiedades físicas de la piedra son constantes durante el proceso.
- No hay transferencia de masa.
- No se considera la pérdida de calor al exterior.
- No hay gradiente de temperatura en la piedra.

La ecuación del balance de energía en el aire puede ser escrita como (Duffie y Beckman, 1991):

$$(\rho C_p)_a \varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{(\rho C_p)_a}{A} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_v (T_p - T_a)$$

si consideramos que en un determinado intervalo de tiempo no hay variación de T_a , se puede escribir:

$$\frac{(\rho C_p)_a}{A} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_v (T_p - T_a) ; \quad \frac{\partial T_a}{\partial x} = NTU (T_p - T_a)$$

La ecuación de balance en la piedra es: $(\rho C_p)_p (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_v (T_a - T_p) ; \quad \frac{\partial T_p}{\partial t} = NTU (T_a - T_p)$

Donde $NTU = \frac{h_v AL}{(\rho C_p)_a}$ y $\theta = \frac{t(\rho C_p)_a}{(\rho C_p)_p (1 - \varepsilon) AL}$

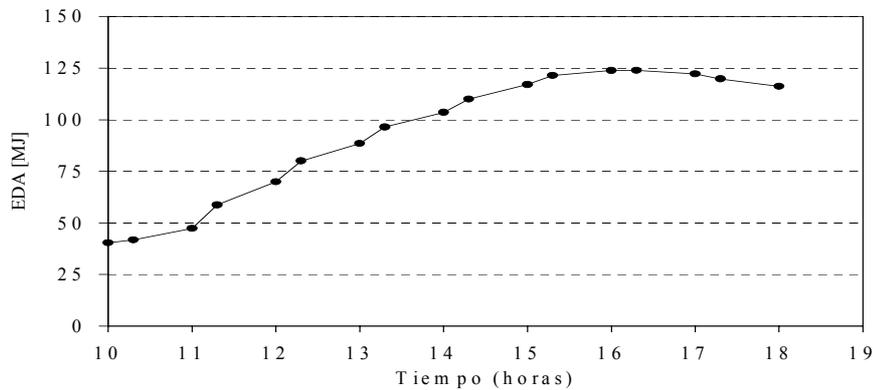


Fig. 2. Energía diaria almacenada (EDA) en cada lecho.

La temperatura del aire y de las piedras en distintos lugares dentro del lecho y para distintas horas se obtiene de la resolución de las ecuaciones precedentes mediante diferencias finitas para el lecho dividido en tres partes de 0,25 m de longitud. La expresión general será:

$$T_{a,i+1} - T_{p,i} = (T_{a,i} - T_{p,i}) e^{-NTU \left(\frac{\Delta x}{L}\right)}$$

De la resolución de estas ecuaciones se obtiene la temperatura del aire a la salida del lecho. En la figura 3 se compara los resultados obtenidos en la resolución de las ecuaciones con los datos obtenidos experimentalmente para diferentes tiempos. Se advierte que el ajuste entre las 12:00 y 15:00 horas está 2 °C por encima de los datos experimentales, ajustándose adecuadamente a las 16:00 horas. Se estima que la diferencia en el ajuste se debe fundamentalmente al hecho que en el modelo no se ha previsto la pérdida de calor hacia el exterior, situación que en los balances experimentales es muy importante entre las horas mencionadas.

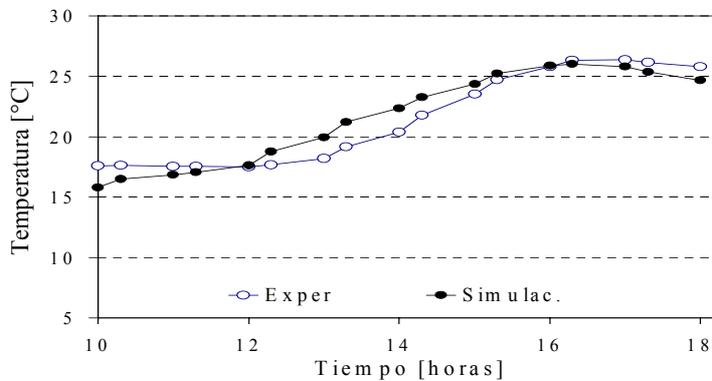


Fig. 3. Simulación numérica y datos experimentales de la temperatura del aire a la salida del lecho de piedra

Con el propósito de determinar la dirección del flujo de aire dentro del lecho se analizaron las variaciones de temperaturas de las piedras en distintos planos, tres planos longitudinales y cinco planos transversales. Del análisis de los resultados obtenidos se observó que el flujo predominante de aire tiene dirección transversal. La figura 4 (a) y (b) se muestran las variaciones de

temperatura de las piedras en un plano transversal ubicado a 3,5 m de la entrada del aire caliente y en la dirección vertical y horizontal. Si comparamos las figuras 4 (a) y 4 (b) se ve que las variaciones de temperatura en los tres puntos de la dirección vertical no son apreciables pero sí lo son en la dirección horizontal. En la Figura 4 (b) se observa que entre las 10 horas y las 11 horas permanece la estratificación debida a la descarga nocturna y que a partir de las 11 horas comienza la estratificación de la carga. Entre las 12 y las 15 horas continúa el proceso de carga con una tasa de crecimiento constante.

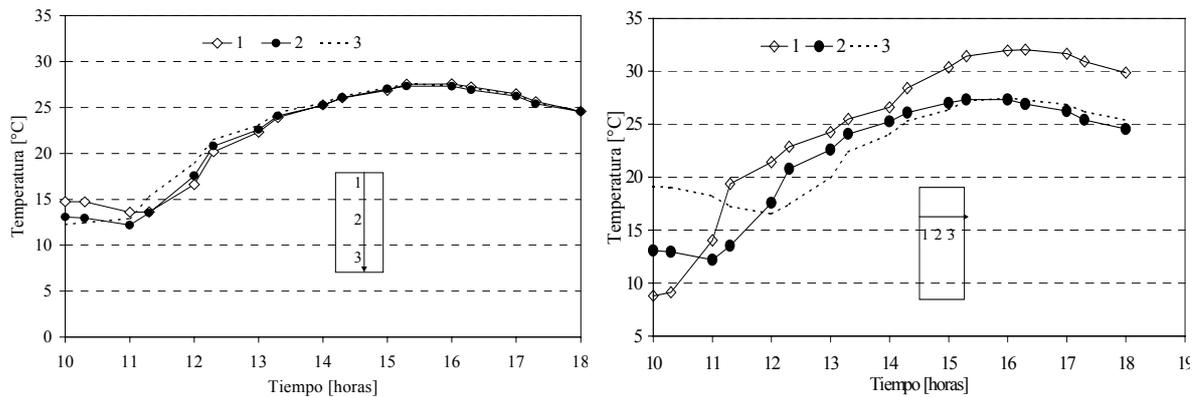


Fig. 4a. Variación de temperatura en dirección vertical Fig. 4b. Variación de temperatura en dirección horizontal

Esto mismo puede observarse en la figura 5 donde se grafican las temperaturas promedio de las piedras en la dirección horizontal en cinco posiciones a lo largo de la dirección de flujo y para distintas horas durante el proceso de carga. Se advierte que el proceso de carga dura aproximadamente cinco horas.

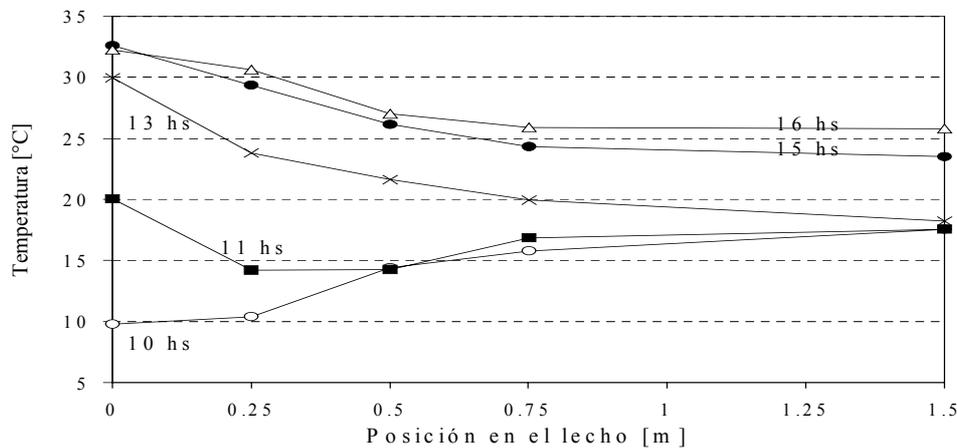


Fig. 5. Variación de temperaturas en el lecho durante el proceso de carga

Las figuras 6 muestra el comportamiento térmico del lecho para tres días consecutivos y para tres planos separados 0,25 m en la dirección del flujo. De acuerdo a las condiciones que se fijaron para el funcionamiento del lecho se ve que durante el primer día la descarga comenzó a las 23 hora (28 de julio), en el segundo día a las 4: 30 de la mañana (29 de julio) y en el tercer día a las 2:30 hora (30 de julio) finalizando a las 9:30 horas del día siguiente en los tres días. Además el ventilador funcionó durante el día desde las 10 horas hasta las 18 horas para la carga del acumulador.

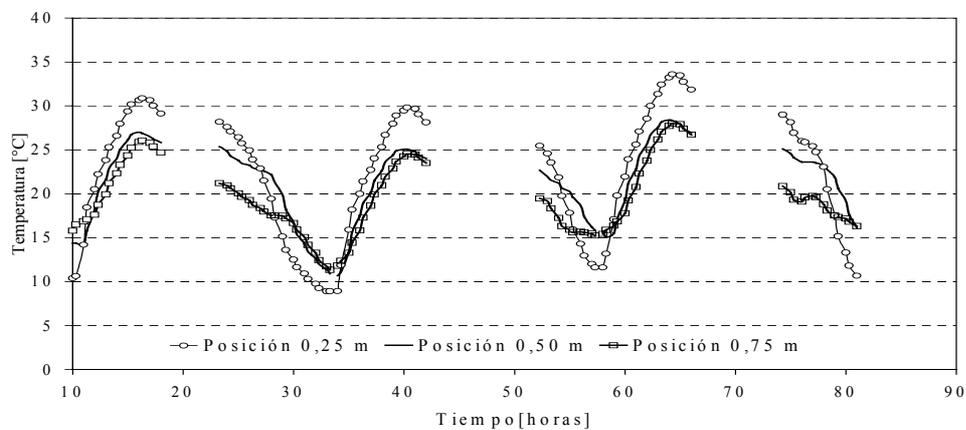


Fig.6 Variación de las temperaturas promedio de las piedras en tres posiciones en la dirección del flujo

En la figura 7 se grafican las variaciones de temperatura del aire a la entrada y salida del lecho y la temperatura ambiente exterior para los mismos días.

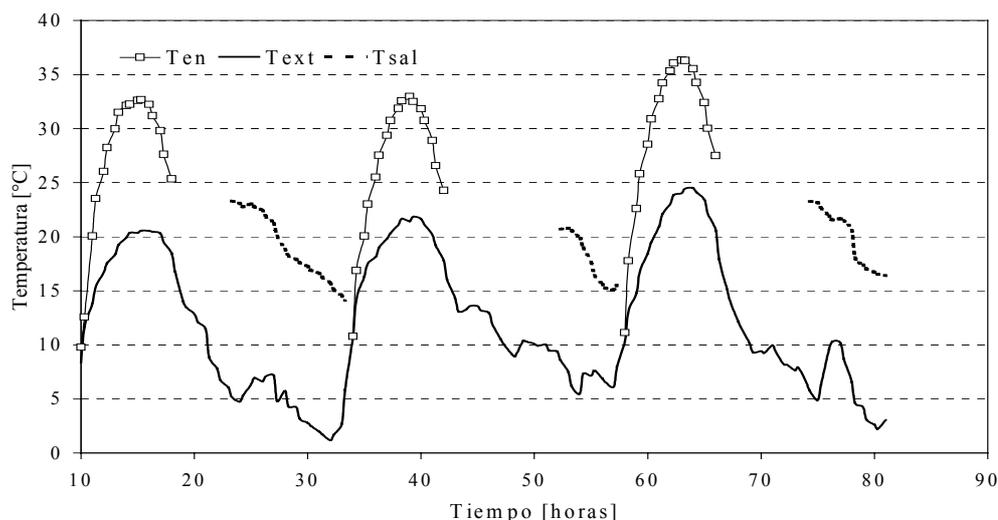


Fig 7. Temperaturas de entrada y salida del lecho en contraste con la temperatura del ambiente exterior para tres días consecutivos

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de temperatura del aire a la salida del lecho son adecuados para mantener la temperatura dentro del invernadero en niveles superiores a la temperatura mínima biológica de las plantas. Sin embargo para lograr temperaturas óptimas es necesario incorporar una mayor cantidad de acumuladores de este tipo.

El acumulador de piedra con flujo de aire no reversible, si bien no respeta la estratificación de temperatura típica de un lecho con flujo reversible, es más simple de construir y menos costosa su operación. La simulación realizada no tiene en cuenta las pérdidas de calor, por lo tanto es necesario un estudio más profundo que permita simular el comportamiento integral del lecho.

NOMENCLATURA

\dot{m}	Flujo másico [kg s^{-1}]	Tsal	Temperatura del aire a la salida del lecho [$^{\circ}\text{C}$]
c_p	Calor específico a presión constante [$\text{J kg}^{-1}\text{s}^{-1}$]	Text	Temperatura ambiente exterior [$^{\circ}\text{C}$]
ρ	Densidad [kg m^{-3}]	Tr	Temperatura mínima de funcionamiento del lecho [$^{\circ}\text{C}$]
ϵ	Fracción de huecos	M	Masa total de piedras [kg]
h_v	Coefficiente de transferencia de calor volumétrico	t	Tiempo (s)
A	Sección transversal del lecho [m^2]	Subíndices	
L	Longitud del lecho [m]	a	referido al aire
T_a	Temperatura del aire dentro del lecho [$^{\circ}\text{C}$]	p	referido a la piedra
T_p	Temperatura de las piedras del lecho [$^{\circ}\text{C}$]		
Ten	Temperatura del aire a la entrada del lecho [$^{\circ}\text{C}$]		

REFERENCIAS

- Duffie J.A. y Beckman W.A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2^o edición, pp 393-399. Wiley.
 Sayigh A., (1979), Solar Thermal Energy Storage Systems, Solar Energy Application in Buildings, Cap. 4, Academic Press.
 Telkes, M., (1955). Solar Heat Storage, Solar Energy Research, University of Wisconsin Press, Madison.

ABSTRACT- Due to the climatic characteristics of the NOA region, a daily overheating occur in greenhouses, while it is necessary to heat them during the night. So a temporary storage of energy has to be devised because of the lack of simultaneousness of these processes. In this paper a packed bed storage, built with two pebble beds where the air flow is not reversible during the charge and discharge unlike conventional beds is described. Theses charge and discharge processes and the theoretical and experimental behavior are described and the air flow direction, within each bed, was determined. During three days of continuous working the average energy charge to the storage unit was 73,7 MJ and the energy delivered 57MJ. This storing system appears to be an attractive and economic system to store energy.