

ACUMULADOR DE AGUA PARA CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS ARMADO CON BOTELLAS DE PET¹

L. Saravia³, R. Echazú², M. Quiroga² y P. Robredo⁴

INENCO

Universidad Nacional de Salta - CONICET

Buenos Aires 177 - 4400 Salta, Argentina

FAX 54-387-4255489, e-mail : echazur@inenco.net

RESUMEN Se presenta el diseño y la experimentación de un prototipo de acumulador de calor a utilizar como parte de un sistema de acondicionamiento térmico de un invernadero hidropónico. Básicamente, el conjunto acumula calor durante el día tomando el aire que se calienta durante el día en el propio invernadero y lo devuelve a la noche para mantener la temperatura del local. El sistema consta de acumuladores formados por paquetes de botellas de agua colocados en un recinto. Mediante ventiladores y ductos el aire circula entre las botellas transmitiendo el calor transportado a través de la pared del recipiente. Los acumuladores en el interior del invernadero se arman sobre el piso con una altura de 0,50 m y 1 m de ancho sirviendo como soporte para las piletas de cultivo. Para caracterizar el acumulador se construyó un prototipo a escala y luego se armó un invernadero a escala real con un área de suelo de 100 m², nueve piletas hidropónicas y sus correspondientes acumuladores. Se presentan las experiencias realizadas sobre uno de los acumuladores y se determinan los parámetros térmicos de funcionamiento.

1. INTRODUCCIÓN

La difusión masiva del uso del politereftalato de etilenglicol (PET) para la fabricación de botellas de bebidas gaseosas, trajo aparejado, además de las indudables ventajas higiénicas y de costos para los fabricantes, un importante problema ambiental : El PET no se degrada por acción de la radiación solar, como otros materiales plásticos, debido a que se formula, con un alto contenido de aditivos anti-UV para la protección de las bebidas durante el transporte. Como los envases no se retornan a la embotelladora y como el reciclado de éste plástico requiere mucha energía, una gran cantidad de material no degradable queda abandonada sumándose a los otros contaminantes ambientales.

Se ha pensado en en aprovechar este material para construir acumuladores de calor para invernadero, presentándose aquí el diseño, ensayos y modelización de un prototipo y de una unidad a escala real. Ha sido habitual utilizar acumuladores de cantos rodados para llevar a cabo la función que aquí se estudia, habiéndose realizado recientemente un trabajo en tal sentido (Saravia et. al.,1997, 1998; Echazú et al., 1999) El calor específico del agua es unas 4 veces superior al de las piedras y su densidad aparente, una vez empacada, unas 1.8 veces menor. Esto implica que el uso del agua permite reducir prácticamente a la mitad el volumen necesario para una cierta cantidad de calor. Esto es significativo ya que los volúmenes involucrados son importantes en relación al tamaño del invernadero. La reducción del mismo permite adoptar disposiciones geométricas de interés, como la presentada aquí en el sentido de aprovechar el volumen disponible debajo de las bandejas hidropónicas.

En las secciones que siguen se describe el prototipo de acumulador y su ensayo así como el invernadero de 100 m² y el ensayo del acumulador a escala real. Finalmente se presenta un modelo computacional del acumulador cuyos resultados muestran un buen acuerdo con la experiencia y permite determinar los parámetros térmicos del sistema.

2.- PROTOTIPO DE ACUMULADOR Y SU ENSAYO.

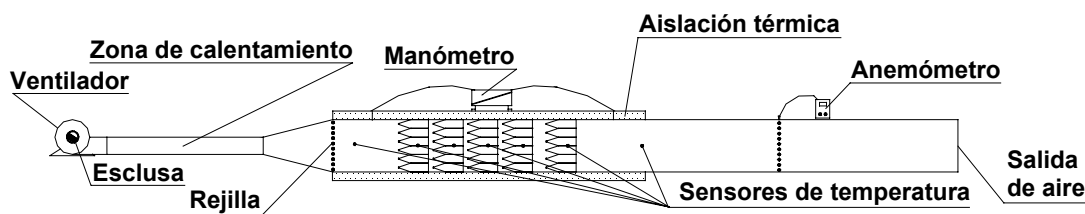
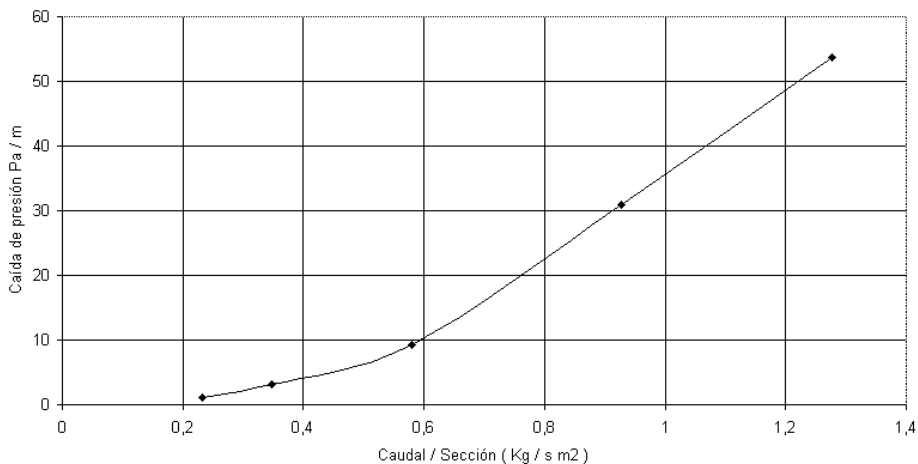


Figura 1 : Esquema del prototipo de acumulador

Para el dimensionamiento de los acumuladores, se realizó un ensayo previo en un prototipo de 1.90 m de largo y 0.60 x 0.68 m de sección transversal., con 240 botellas llenas de agua, como se esquematiza en la figura 1. Los parámetros del relleno para el empaque utilizado son: fracción de huecos $\epsilon = 0.53$, factor de forma $\alpha : 1.41$, diámetro equivalente, $D = 0.14$ m

¹ Financiado por el FONCYT (SECYT) y por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.

² Personal del CIUNSa. - ³ Investigador Principal del CONICET - ⁴ Facultad de Ciencias Exactas de la UNSa.



. Figura 2 : Caída de presión en función del caudal en el prototipo

Un ventilador centrífugo impulsa aire a lo largo del acumulador y por medio de una esclusa, se regula el caudal en distintos valores, midiendo simultáneamente la velocidad y la caída de presión. Para cada punto, se midieron con un anemómetro térmico TSI 1400 los perfiles de velocidad en el tramo de cañería aguas abajo, integrándose los valores para calcular el caudal. Las pérdidas de carga, se determinaron midiendo la diferencia de presión entre dos puntos de la cañería, aguas arriba y aguas abajo del relleno de botellas, con un manómetro de agua de columna inclinada. En la figura 2 se presentan los datos correspondientes a las pérdidas de carga. Se muestran los resultados expresando la pérdida de carga por unidad de longitud como función del flujo másico por unidad de área de sección. Estos datos fueron utilizados para dimensionar el circuito de aire del acumulador definitivo, en especial el ventilador a usar. En definitiva se usaron velocidades de aire que corresponden a la región con menores caídas de presión.

El factor de huecos del sistema con botellas es similar al del lecho de piedras, pero la pérdida de carga es menor por tres razones: 1) Al ser las botellas de “ granulometría “ mas homogénea, se forman canales de circulación. 2) el factor de fricción para el plástico es menor que para la piedra y 3) la forma de las botellas es mas aerodinámica.

3.- EL ACUMULADOR A ESCALA REAL

Con los resultados de la sección anterior se diseñó y construyó un conjunto de 9 acumuladores para un invernadero de 100 m², con un total de 11000 Kgs de agua. Cada acumulador, ubicado por debajo de las piletas de cultivo hidropónico, tiene un largo de 5 m, un ancho de 1 m y una altura de 0.60 m. En su interior se disponen 550 botellas de 2.25 litros, como se esquematiza en la figura 3. Se ensayó uno de los acumuladores, con aire circulando desde la parte superior del invernadero, y saliendo por el otro extremo, nuevamente al ambiente del invernadero.

El aire es impulsado a lo largo del acumulador, por un ventilador axial de 0.43 m de diámetro, 6 palas a 35 grados acoplado a un motor monofásico de 370 W (1/2 HP) que gira a 1450 RPM, valores seleccionados de acuerdo a los resultados del prototipo. Para las medidas de pérdida de carga se instaló a la entrada un registro que permite regular el caudal y se ensayó el sistema, obteniéndose los valores que se presentan en la figura 4. Se espera que el acumulador trabaja normalmente con flujos entre 0.3 y 0.5 kg/s, ya que ello permite la carga completa del mismo en las horas de sol. En esas condiciones las pérdidas de carga se encuentran entre 3 y 6 mm de columna de agua, las que pueden ser manejadas eficientemente por un ventilador axial con paletas de buena inclinación, como el instalado.

Se ensayó el acumulador en ciclos de carga y descarga a diferentes caudales midiéndose, además del caudal, la evolución en el tiempo del perfil de temperatura a lo largo del lecho. En estos ensayos, el aire de la parte superior del invernadero, por medio de un ducto vertical, ingresa al pleno de entrada, donde se encuentran el registro de control y el ventilador. Para estas medidas, se instaló un sistema automático de toma de datos Nudam 6018 con 8 termocuplas tipo K conectado a una PC con un conversor serie RS232-RS485. Se tomaron los datos con una frecuencia de 15 minutos. En la figura 3 se muestra un corte de estos dispositivos y la ubicación de las termocuplas.

Se realizaron tres series de medidas, con diferente régimen de circulación de aire y con la temperatura de entrada variando según la hora del día. Estas series fueron tomadas en días soleados, por lo que la temperatura dentro del invernadero ha llegado a valores entre 30 y 35 C poco después de mediodía. Durante la noche la temperatura en el invernadero ha bajado a un intervalo entre 5 y 10 C. Cabe recalcar que el ensayo se hacía con un solo acumulador de los 9, por lo que su acción sobre el invernadero es muy pequeña y éste llega a la noche a temperaturas 3 o 4 grados por encima de la ambiente, como es natural en invernaderos no climatizados.

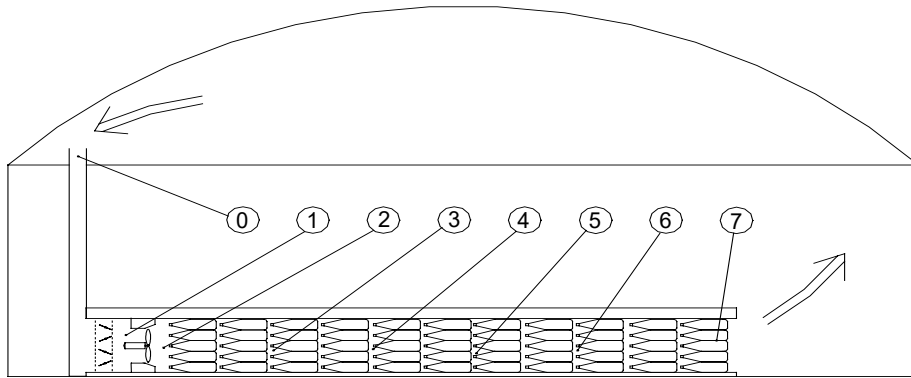


Figura 3 : Corte del acumulador en el invernadero mostrando el movimiento del aire y la ubicación de los sensores de temperatura

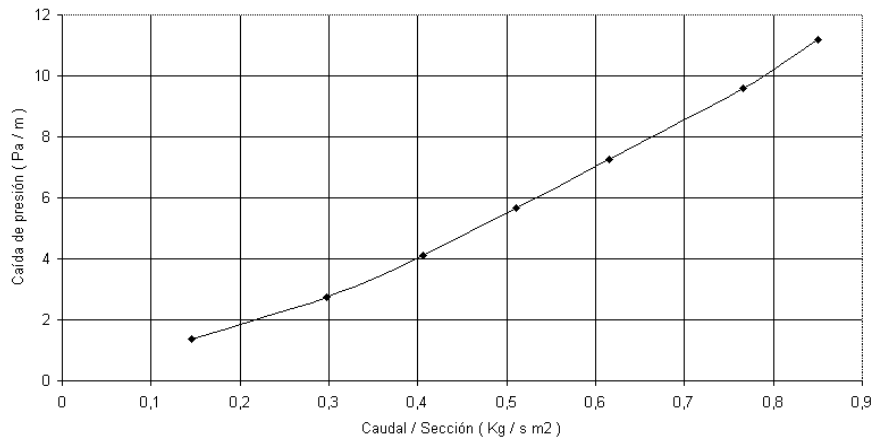


Figura 4 : Caída de presión en función del caudal en el acumulador ensayado

En la figura 5 se presenta una serie de medidas de temperatura durante 3 días del 31/julio/2000 al 2/agosto del 2000, correspondientes a un régimen de 0.5 Kg/s y en la figura 6, 3 días del 6 al 8 de agosto del 2000, para 0.3 Kg/s. Por razones de espacio no se identificaron las curvas en los gráficos. Los pequeños saltos son debidos a que el equipo de toma de datos ha registrado los mismos redondeados a grados.

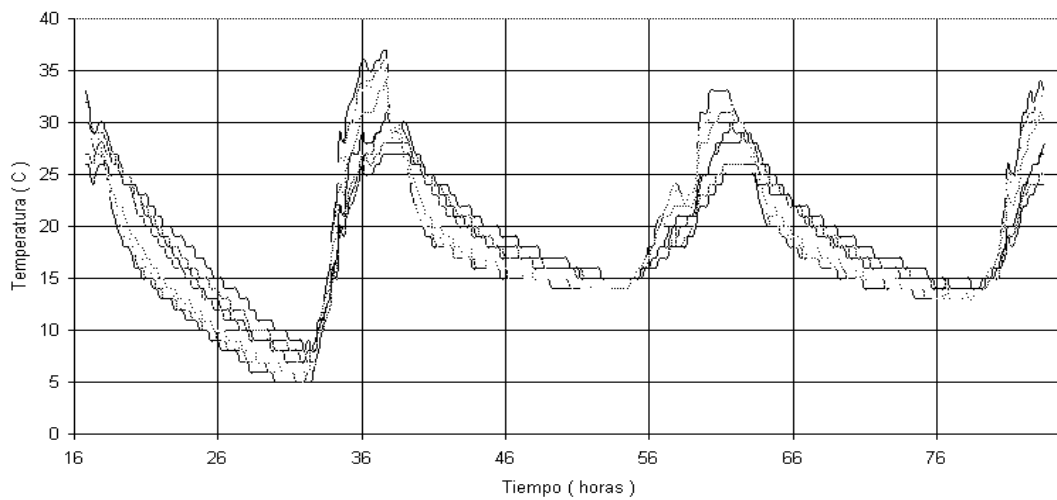


Figura 5 : medidas de temperatura en función del tiempo para un caudal de 0.5 Kg/s.

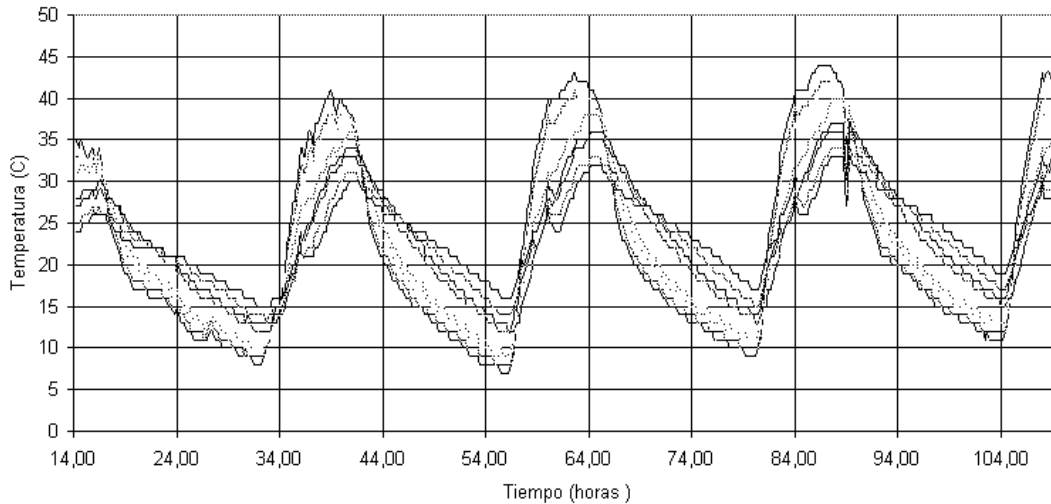


Figura 6 : medidas de temperatura en función del tiempo para un caudal de 0.3 Kg/s

Si se supone que no se quiere que la temperatura baje de los 15 C en el invernadero, se aprecia que durante el día es posible levantar la temperatura en unos 10 C. Teniendo en cuenta la masa de agua, la energía acumulada en una unidad está en el orden de los 50 Mj, o sea 450 Mj para todo el acumulador. Esta es una cantidad significativa para lograr el acondicionamiento nocturno. Durante el día el proceso de carga se ve ayudado por el incremento de la temperatura debido a la salida del sol. Durante la noche la caída de la temperatura de salida es más lenta

Cabe destacar que estos ciclos de carga y descarga sirven a efectos del análisis térmico del sistema, como se hará en la próxima sección, pero no corresponden a los que se llevarán a cabo en condiciones normales de trabajo. Durante el día el sistema trabajará en forma similar, funcionando en forma continua y alcanzando su temperatura máxima en unas 8 a 10 horas. Cabe notar que en ese momento existe en el acumulador una dispersión de temperatura a su largo del orden de los 10 C. Como ahora la temperatura del invernadero empieza a caer, la distribución tiende a igualarse, lo que ocurre alrededor de una hora más tarde. En ese momento el acumulador ha terminado su carga diaria y conviene apagarlo. Un sistema automático de control estará sensando la temperatura del invernadero y cuando esta comience a caer recién volverá a prender el ventilador del invernadero cuando llegue debajo de la admisible, por ej. 15 C. Se producirá un aumento de la temperatura hasta que el control corte nuevamente el ventilador del acumulador. El funcionamiento dará una curva de temperatura nocturna en forma de diente de sierra con varios ciclos cortos, típica de un sistema bajo control.

4.- SIMULACION NUMÉRICA DEL FUNCIONAMIENTO TERMICO DEL ACUMULADOR

El parámetro térmico más importante en el funcionamiento es el coeficiente de transferencia entre el aire y las botellas y su evaluación permite predecir el funcionamiento del equipo en condiciones reales. Con ese fin se ha preparado un modelo computacional del sistema utilizando como base un programa de cálculo del comportamiento transitorio de circuitos eléctricos, llamado Sceptre, cuyo uso en los casos térmicos se discute en otro trabajo (Saravia y Saravia, 2000). El programa se corre para uno de los días medidos usando como datos las temperaturas medidas del aire de entrada y la distribución inicial de temperaturas a lo largo del acumulador, también medida. Se elige un valor presunto del coeficiente de transferencia y se simula el comportamiento comparando las curvas experimentales y teórica resultantes para el perfil de temperaturas como función del tiempo. El coeficiente se cambiará hasta obtener coincidencia entre ambos conjuntos de datos.

La figura 7 muestra el circuito térmico utilizado para la simulación. El acumulador es dividido en 7 bloques de igual longitud cada uno, suponiendo que cada uno tiene igual temperatura y una masa determinada. Entre los bloques se producirá una transferencia de calor debida al pasaje de aire a través de los mismos y su contacto térmico con las botellas. En la figura 7 uno de los nodos de cada bloque representa la temperatura del agua y el otro el del aire. El condensador representa la masa de acumulación del bloque y las resistencias la transferencia térmica. Las fuentes de calor representan los flujos térmicos debidos al movimiento del aire entre bloques. Fuentes de tensión fijan la temperatura de entrada, conocida, como función del tiempo. Las diferencias de tensión sobre el condensador dan la temperatura en el acumulador.

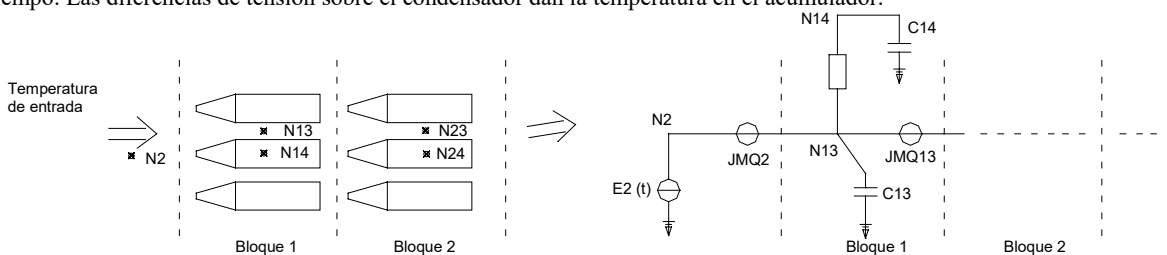


Fig. 7.- Esquema del equipo y del circuito térmico equivalente utilizado en el Sceptre para la simulación.

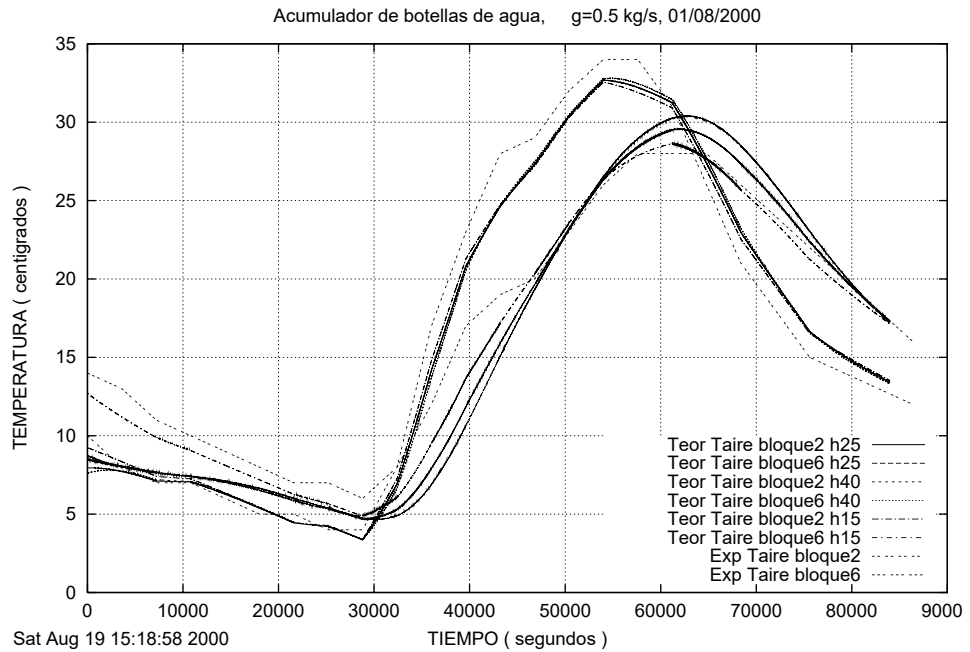


Fig. 8.- Comparación de resultados experimentales y teóricos para una carga-descarga del acumulador con un gasto de aire de 0,5 kg/s y transferencias de 15, 25 y 40 W/(m²C). Se obtiene coincidencia para h=15

El coeficiente de transferencia térmica aire-botella dependerá del flujo de aire. El primer ajuste se ha realizado para un gasto de 0,5 kg/s. La figura 8 muestra los resultados experimentales, en punteado, para el 2do. y 6to. bloque, de la temperatura del aire que pasa por el acumulador. En abscisas se da el tiempo empezando a las 0 horas y expresado en segundos. A ellas se han sumado los resultados teóricos para tres valores del coeficiente h, iguales a 40, 25 y 15 W/(m²C). Se aprecian diferencias claras a última hora de la tarde cuando se llega al pico de temperatura. La curva teórica correspondiente a h=15 W/(m²C) tiene una buena coincidencia con el valor experimental.

Este coeficiente cambia con el gasto de aire utilizado. Se ha realizado su evaluación para un gasto de 0.3 kg/s, mostrándose en la figura 9 los resultados del ajuste. La curva teórica correspondiente a h = 6 W/(m²C) se ajusta bien a los datos experimentales.

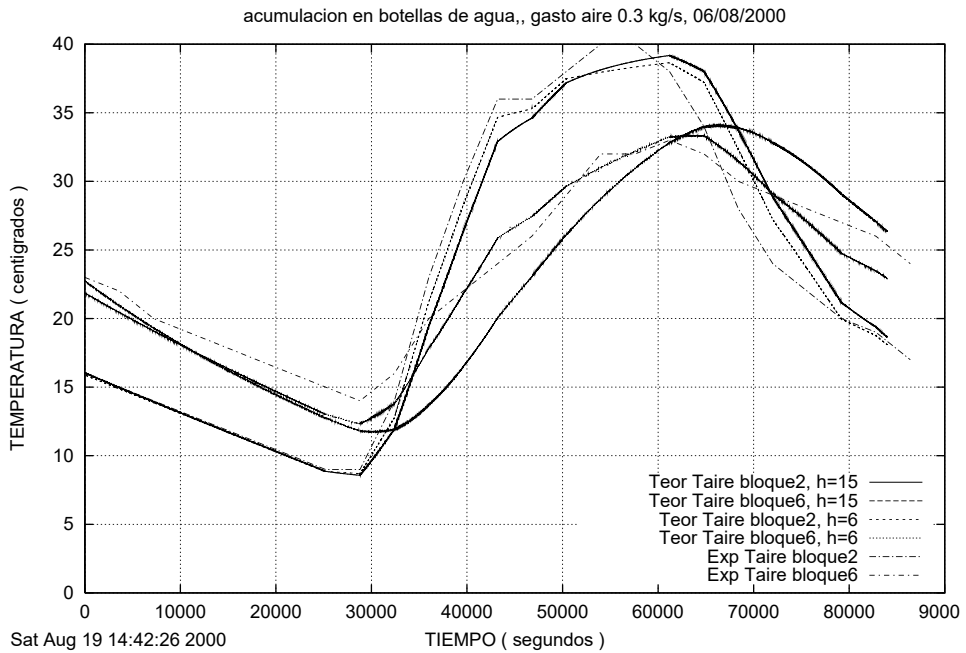


Fig. 9.- Comparación de resultados experimentales y teóricos para una carga-descarga del acumulador con un gasto de aire de 0,3 kg/s y transferencias de 6 y 15 W/(m²C). Se obtiene coincidencia para h=6

La figura 10 muestra un cálculo del funcionamiento del acumulador correspondiente a los datos del mejor ajuste para un gasto de aire de 0.5 kg/s habiéndose dibujado los perfiles de temperatura durante la etapa de carga como función del tiempo, para 5 puntos sucesivos en el sistema.

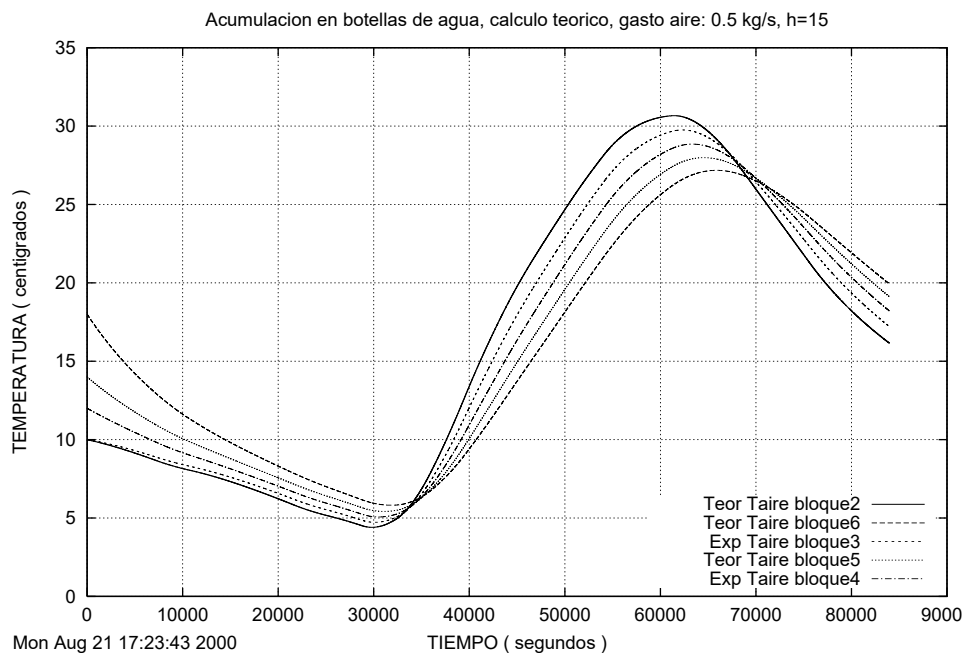


Fig. 10.- Muestra un proceso de carga de un acumulador real para un flujo de 0.5 kg/s como función del tiempo en 5 puntos del acumulador a lo largo del mismo.

5. CONCLUSIONES

Se ha mostrado que el comportamiento térmico de un acumulador de botellas de agua es bueno siendo posible empacar en un volumen adecuado una cantidad de energía que permite un control efectivo de temperatura en el invernadero, del orden de 20 MJ/m³. La velocidad de descarga es razonable, en el orden de los 4 kw por acumulador, es decir 36 kW en total, cuando la pérdida convectiva estimada hacia el fin de una noche fría está en el orden de los 25 kW para el invernadero construido.

La simulación ha dado resultados que se comparan bien en relación con los experimentales y se han podido determinar los parámetros importantes del modelo usado. Es de esperar que el mismo pueda integrarse a los modelos del resto del invernadero para analizar simular el comportamiento del sistema completo de acondicionamiento térmico del local.

6. REFERENCIAS

Saravia L. et al (1996) "Acondicionamiento por Vía Solar de un Sistema de Cultivo Hidropónico Bajo Invernadero : Diseño y Construcción" en : Actas de la XIX Reunión de la ASADES, p 01.29, editada por ASADES, Argentina.

Saravia L. et al (1997) "Cultivo Hidropónico en Invernadero : Uso de Acumulador de Piedras y Malla Aluminizada para Control Térmico" AVERMA 1,1 p.p. 29-32, editada por ASADES, Argentina.

McCorquodale, J. A. et al (1978) "Hydraulic Conductivity of Rock Fill" ,Hydraulic Research, 16 (2) 123

Duffie J. And Beckman J. (1991) "Solar Engineering of Thermal Processes" John Wiley & Sons, N. York

Saravia L. et al (1998) "El Ensayo de un Acumulador de Piedras como Práctico de Laboratorio de un Curso de la Maestría en Energías Renovables" en AVERMA Vol 2,N 1 p.p. 10.1, editada por ASADES, Argentina

Saravia L. y Saravia D." Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad" Presentado para publicación en la XXIII Reunión de Trabajo de la ASADES, p 6, Octubre del 2000.

WATER STORAGE MADE WITH PLASTIC BOTTLES FOR GREENHOUSE HEATING AND COOLING

L. R. Saravia, R. Echazú, M. Quiroga and P. Robredo

ABSTRACT. A Water storage made with used PET bottles is studied as a part of a hydroponic greenhouse heating and cooling system. The storage is heated during the day using the hot air from the greenhouse and the heat is returned to the system during the night to keep the temperature at an appropriate value. The storage is made with 2.25 l plastic bottles filled with water, packaged and placed in an enclosure below the hydroponic table. An axial fan moves the air through the enclosure exchanging heat with the water in the bottles. A 100 m² greenhouse containing nine storage units was built and one of them has been measured under real conditions in a charge-discharge daily cycle using different air flows. A computer simulation of the system was run determining the main thermal parameters by comparison with the experimental results.