

## SIMULACION DE SISTEMAS QUE INCLUYEN

### ACUMULADORES DE PIEDRAS

L.Saravia,<sup>†</sup> E.Alanís,<sup>†</sup>  
I.DePaul, A.Castagnolo  
Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta  
República Argentina

#### Introducción:

Los acumuladores de piedras son utilizados en múltiples aplicaciones relacionadas con el uso de la energía solar, como el calentamiento y/o enfriamiento habitacional, secado de diversos productos agrícolas, etc (1,2,3). Sus mayores ventajas son: sencillez de construcción y funcionamiento y una mayor eficiencia de colección para el conjunto acumulador-colector respecto a sistemas que utilicen acumuladores de cambio de fase (4). La mayor desventaja radica en que la energía acumulada por unidad de volumen es baja respecto a otros métodos.

El análisis del comportamiento técnico con fines de diseño requiere la solución de dos ecuaciones diferenciales parciales acopladas. Para el caso más sencillo, en que la temperatura del aire a la entrada del lecho es constante en el tiempo, y la temperatura del lecho es uniforme en el instante inicial, se dispone de soluciones en forma de series, las que se han graficado con todo detalle (5). Sobre esta base se puede formular un diseño del acumulador (6), aunque sólo tendrá un carácter aproximado, puesto que la temperatura de entrada varía de acuerdo a lo que entrega el colector, y la temperatura inicial del lecho será la obtenida en el período previo de trabajo del acumulador, la cual sólo excepcionalmente será constante.

El análisis de datos experimentales de sistemas solares de aire, así como su diseño, requiere una simulación detallada del funcionamiento. Con este fin, en las secciones que siguen se describe un algoritmo para la obtención de la solución de las ecuaciones por vía computacional, teniendo en cuenta condiciones variables en la temperatura del gas y del lecho. Los pro-

<sup>†</sup> Investigador CNEGH

gramas se han desarrollado en forma tal que permiten un acoplamiento a los programas correspondientes para otros elementos solares, permitiendo la simulación de sistemas completos.

Como ejemplo de aplicación se reproducen las curvas experimentales obtenidas durante el calentamiento y posterior enfriamiento de un lecho de piedras utilizado para medir el coeficiente de transferencia térmica, y se comparan con las obtenidas mediante el cálculo numérico.

Finalmente, se detalla el cálculo de acumuladores de piedras con flujo radial y se discute su posible utilización en relación con el acondicionamiento a corto plazo de algunos tipos de plantas.

## 2.-Planteo del problema.

Dado un lecho de piedras de longitud  $L$  y sección  $A$ , con un cierto perfil inicial de temperatura  $T_s(x,0)$ , a través del cual circula aire que entra al acumulador a una temperatura  $T_g(x,0)$ , se quiere determinar las distribuciones de temperaturas del sólido y del gas, en función de la coordenada  $x$ , el tiempo  $t$  y los parámetros constructivos.

Las ecuaciones que fijan el funcionamiento del acumulador se determinan haciendo un balance energético en un elemento de volumen de espesor  $dx$ , durante un tiempo  $dt$ . El sufijo  $s$  indicará propiedades del sólido y  $g$  las del gas.  $T$  es la temperatura,  $c$  el calor específico y  $\rho$  la densidad.  $f$  la fracción de huecos del lecho,  $h$  el coeficiente de transferencia térmica entre la piedra y el gas y  $\dot{m}$  el gasto de aire a través del acumulador.

Para el sólido:

$$c_s \rho_s (1-f) dV \frac{\partial T_s}{\partial t} dt = h dV (T_g - T_s) dt$$

$$\therefore \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{h}{c_s \rho_s (1-f)} (T_g - T_s) = \alpha (T_g - T_s)$$

para el gas:

$$c_g \rho_g \int_0^V \frac{\partial T_g}{\partial t} dt = -hA dx (T_g - T_s) dt - c_g \dot{m} dt \frac{\partial T_g}{\partial x} dx$$

En esta ecuación el término que contiene  $\rho_g$  es despreciable frente a los otros debido a que la masa de gas contenida en el acumulador es despreciable frente a la de piedra, por lo que resulta:

$$\frac{\partial T_g}{\partial x} = -\frac{h}{c_g \rho_g v_g} (T_s - T_g) = \beta (T_s - T_g)$$

Así queda planteado un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, de primer orden, acopladas. Sus condiciones de contorno están fijadas por la temperatura inicial del lecho  $T(x)$  y la temperatura de entrada del gas  $S(t)$ .

$$\begin{aligned} \text{en } x = x_0 & \quad T_g(x_0, t) = S(t) \\ \text{en } t = 0 & \quad T_s(x, 0) = T(x) \end{aligned}$$

La resolución numérica de las ecuaciones con el fin de obtener  $T_s(x, t)$  y  $T_g(x, t)$  se explica en la próxima sección. En ella se utilizan los valores de  $T_s(x_0, t)$ , temperatura a la entrada del lecho como función del tiempo, y  $T_g(x, 0)$ , temperatura inicial del gas a lo largo del lecho. La forma explícita de estas funciones se obtiene a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_s(x_0, t) = T_s(x_0, 0) e^{-\alpha t} + \alpha e^{-\alpha t} \int_0^t S(t') e^{\alpha t'} dt'$$

$$T_g(x, 0) = T_g(x_0, 0)e^{-\beta(x-x_0)} + \beta \int_{x_0}^x T(x') e^{\beta x'} dx'$$

Obsérvese que para calcular  $T_g(x, 0)$  es necesario conocer el perfil inicial de temperaturas del sólido. Si bien al comenzar la operación podemos suponer una distribución de temperaturas constante, ésto no se cumple una vez que el acumulador está en funcionamiento y, al comenzar cada ciclo, es necesario emplear el último perfil de temperaturas obtenido en el ciclo anterior y evaluar la integral numéricamente.

Para  $T_s(x_0, t)$  el problema es similar debiéndose tener la temperatura de entrada del gas como función del tiempo,  $S(t)$ . Este dato es provisto por el sistema solar conectado al acumulador, usualmente un colector. Dado que su funcionamiento está condicionado por la radiación solar incidente, la cual se mide a intervalos determinados, se impondrá que la radiación, y por lo tanto  $S(t)$ , es constante en cada intervalo. Si este intervalo es  $(t_1, t_2)$ ,  $T_s(x_0, t)$  en él valdrá:

$$T_s(x_0, t) = T_s(x_0, t_1)e^{-\alpha(t-t_1)} + T_g(x_0, t_1)(1 - e^{-\alpha(t-t_1)})$$

Es usual que los valores de radiación y, por lo tanto de  $T_g(x_0, t)$ , sean medidos de hora en hora.

### 3.- Esquema numérico.

El sistema descrito se resuelve aplicando un esquema de diferencias finitas según el método mejorado de Euler, que emplea el promedio de las pendientes entre puntos adyacentes.

La longitud  $L$  del lecho se divide en  $M$  intervalos iguales  $\Delta x$ , mientras que el lapso  $t_2 - t_1$  durante el cual  $T_g(x_0, t)$  permanece constante se divide en  $N$  intervalos  $\Delta t$ . A partir del instante  $t_1$ , el programa calcula los valores de  $T_s$  y  $T_g$  para los  $M$  puntos en cada uno de los  $N$  instantes. Al llegar a  $t_2$ ,

se adopta un nuevo valor de  $T_g(x, t)$  y se reinicia el proceso tantas veces como sea necesario. Al terminar, se guarda en cinta magnética el último perfil de temperaturas del lecho de piedras, para ser usado en un nuevo y eventual ciclo.

#### 4.-Aplicación.

Con el fin de comprobar la bondad del método descrito en la sección anterior, se aplica primeramente al caso en que la temperatura del aire a la entrada del lecho,  $T_g(x, t)$ , es constante y la temperatura del lecho al comienzo de la operación es uniforme. Los resultados obtenidos se comparan en la figura 1 con los obtenidos por Schumann, donde se grafican en función de variables adimensionadas definidas en Tabla I. La concordancia es excelente, excepto en la zona correspondiente a la entrada del lecho en los instantes iniciales. Esto es de esperarse dado que en esa zona la temperatura del aire a la entrada presenta una discontinuidad y el error de cálculo en el esquema en diferencias finitas es apreciable, influyendo en los primeros pasos del cálculo.

En segundo lugar, se aplica al caso en que el aire a la entrada tiene una temperatura variable con el tiempo. Para ello se toma como base del cálculo, los datos experimentales obtenidos de un acumulador de  $0,2 \text{ m}^3$  de volumen que fué utilizado en la determinación del coeficiente de transferencia  $h$ .

En la figura 2 se muestra la temperatura inicial del lecho,  $T_s(x, 0)$ , y la temperatura del aire a la entrada en función del tiempo,  $T_g(x, t)$ , para un ciclo completo calentamiento-enfriamiento. En la Tabla II, se dan los valores de los distintos parámetros correspondientes a dicha experiencia, que fueron utilizados para el cálculo. La figura 3 muestra las curvas experimentales y las obtenidas mediante el cálculo.

De la comparación de las curvas experimentales con las calculadas, se puede apreciar que si bien el comportamiento general es coincidente, existen algunas diferencias. En primer lugar, las pendientes de las curvas reales son menores que las correspondientes a las calculadas, y en segundo lugar, los valores máximos de temperaturas alcanzadas en la experiencia, son menores que los calculados. Estas discrepancias pueden de

berse, en principio, a dos factores: 1) el valor del coeficiente  $h$ , correspondiente a la experiencia sea menor que el utilizado en el cálculo. 2) a las pérdidas térmicas en el lecho, que no son tenidas en cuenta en el esquema numérico empleado. Para comprobar la influencia del coeficiente  $h$ , se realiza otro cálculo con un valor menor. Los resultados se muestran en la figura 4 para la primera fase del calentamiento, y se observa que si bien las pendientes se aproximan más, aparece un notable desfase en el tiempo. Esto sugiere que las discrepancias se deben principalmente a las pérdidas térmicas.

### 5.-Acumuladores de simetría cilíndrica y esférica.

En la figura 5 se esquematiza el flujo de aire en el acumulador ya estudiado, junto a otros dos en el que el flujo se realiza en forma radial, con simetría cilíndrica y esférica respectivamente. Estos tipos de flujos resultan de interés en relación con aplicaciones que se explicarán en la próxima sección.

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor pasan a tener coeficientes dependientes de la distancia radial  $r$ , debido a dos causas. En primer lugar, el elemento en que se plantean tiene un volumen dependiente de  $r$ . En segundo lugar, la velocidad del gas depende de  $r$ , y por lo tanto existe la misma dependencia para  $h$ . Las ecuaciones resultantes en cada caso, se dan en la Tabla III. Se aprecia que el sistema de ecuaciones a resolver tiene una forma general que comprende los tres casos:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^q} (T_g - T_s) \qquad \frac{\partial T_g}{\partial r} = \frac{\beta}{r^{q-p}} (T_s - T_g)$$

donde los valores de  $q$  y  $p$  se dan en la tabla para cada caso. La resolución numérica detallada en la sección anterior se puede extender al caso general sin problemas.

### 6.-Aplicación en un sistema con flujo radial.

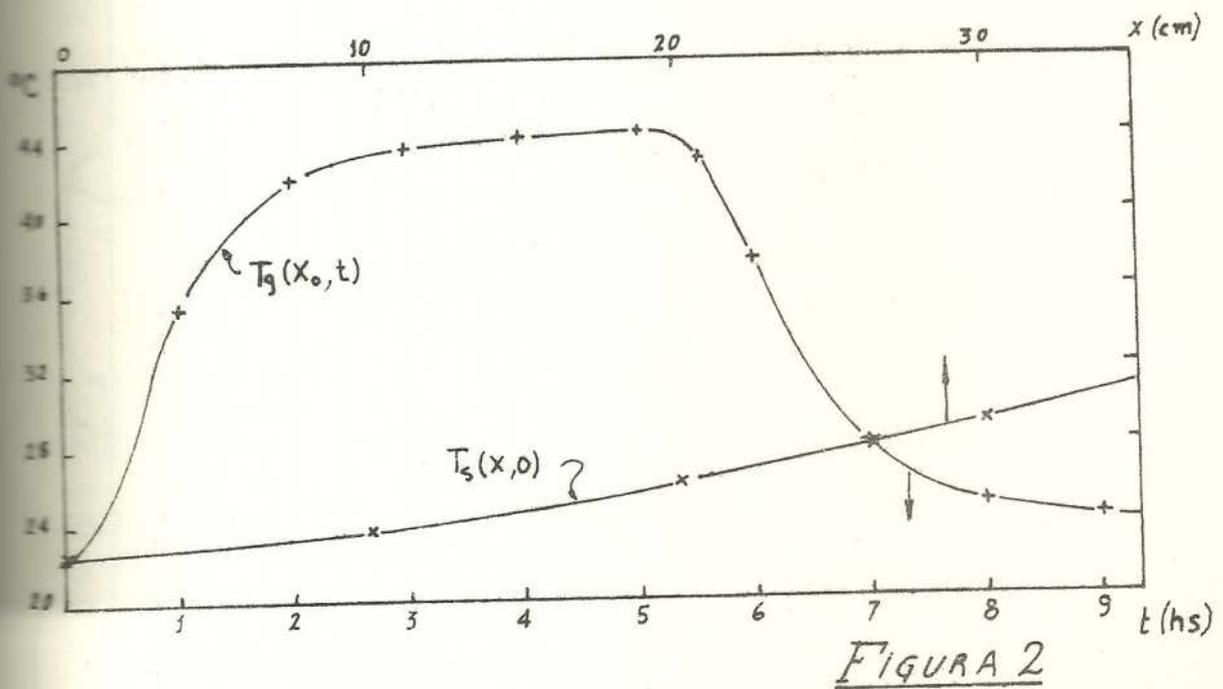
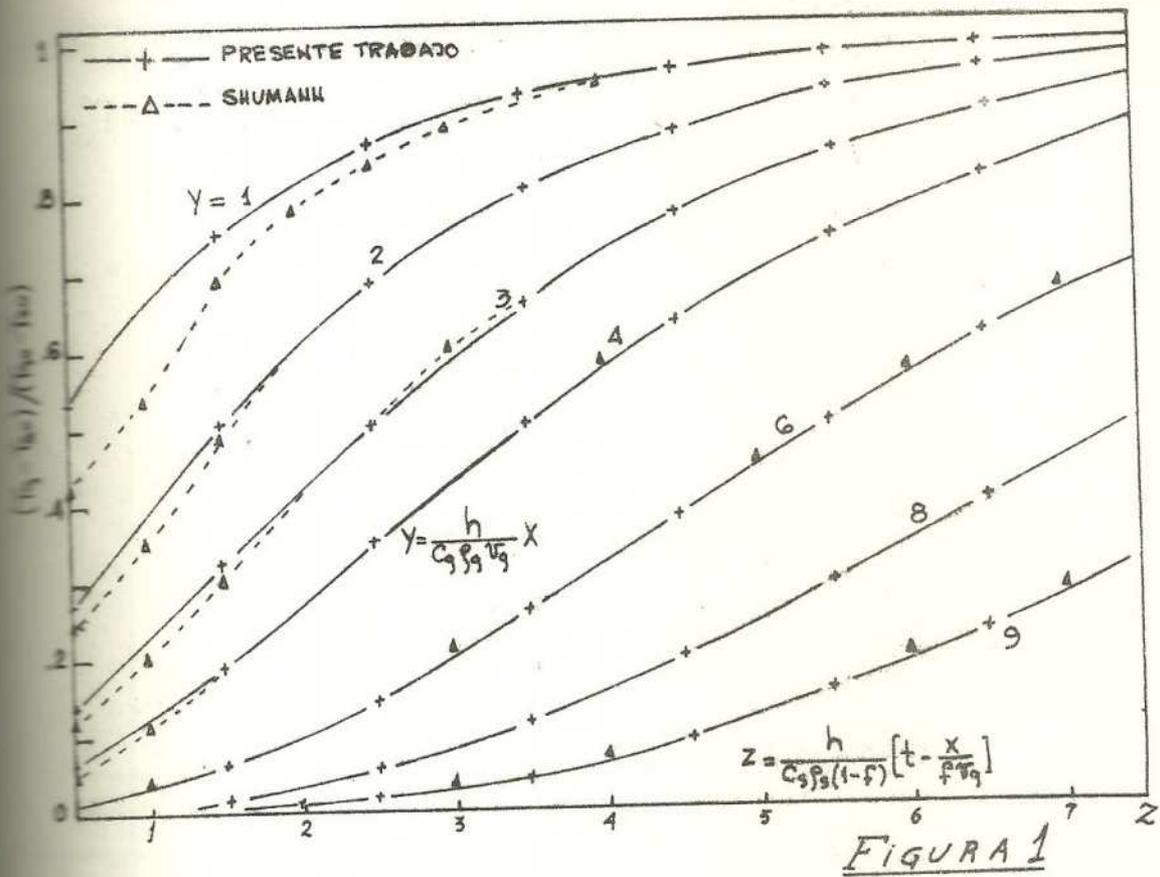
Los acumuladores de piedras podrían ser utilizados en la conservación temporaria de frutas, cuando estas son almacenadas.

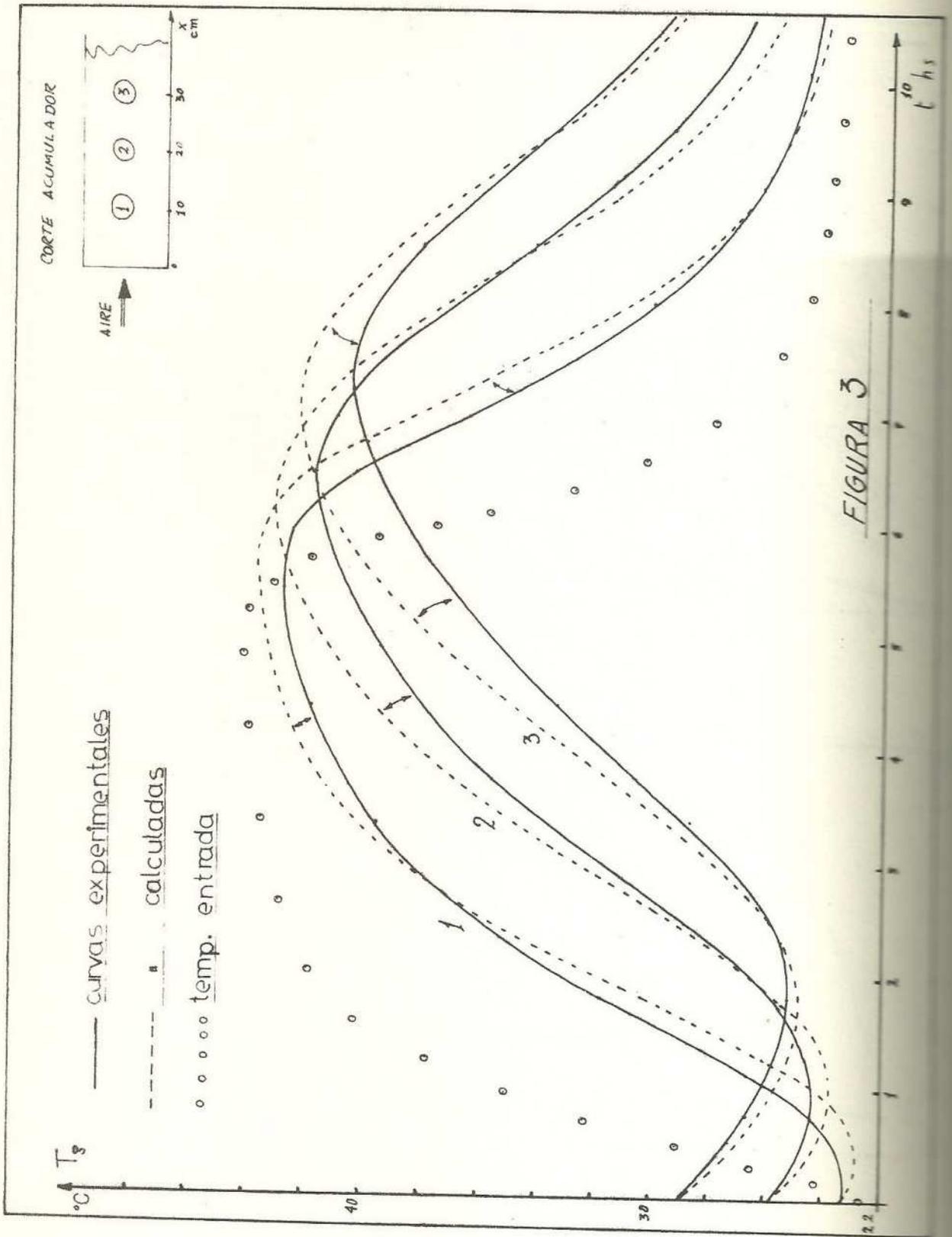
Las por plazos cortos en galpones donde suelen estar sometidas a temperaturas excesivas en los días calurosos y de mucha irradiación solar. Un esquema general del sistema se muestra en corte en la figura 6. Los cajones del producto se estiban alrededor de un lecho de piedras, en el cual mediante un ventilador se establece un flujo de aire del tipo ilustrado en la figura 5b. Durante la noche, el aire nocturno relativamente frío, pasa por el acumulador y los cajones, bajando su temperatura hasta la exterior. Durante el día, se sopla en igual dirección, con lo cual el aire externo se enfría en el lecho y al salir al exterior, mantiene la temperatura de la superficie del conjunto a una temperatura adecuada.

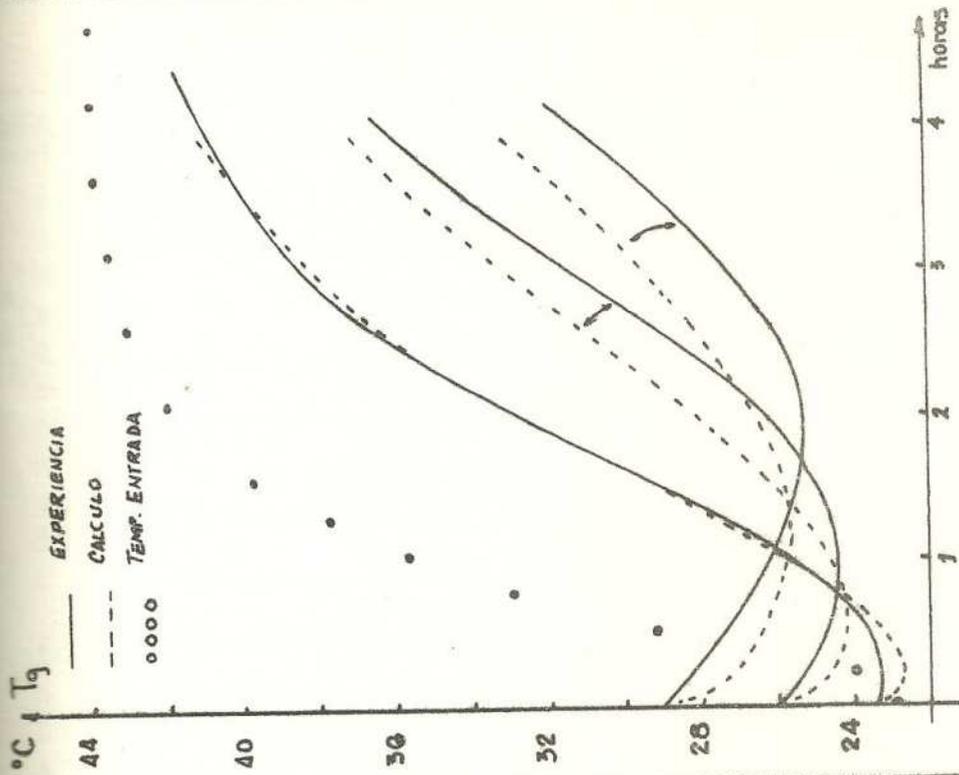
El diseño del acumulador deberá tener en cuenta dos aspectos: administrar durante el día la cantidad de aire frío necesaria para mantener la superficie fresca y a la vez que el aire a la salida del lecho se mantenga por debajo de la máxima temperatura admisible para el producto. El proceso superficial puede ser muy aliviado en sus requerimientos, si se coloca una capa de aislante térmico. Dado los tipos usuales de estiba, el sistema se comportará como un acumulador de simetría aproximadamente cilíndrica, compuesto de dos materiales, piedras en el interior y frutas en el exterior, por lo que el diseño exigirá cálculos basados en los programas desarrollados en la sección anterior. Actualmente se está trabajando en el dimensionamiento de este tipo de sistemas.

## REFERENCIAS

- 1)-Löf G.O.G., Ward J.C. "Long Term (18 years) Performance of a Residential Solar Heating System"- Solar Energy, Vol.18. N° 4, p.p. 301-1976.-
- 2)-Read et al.-"Use of R.B.R. System in South Australia Schools"- Aust. Refrig. Air Cond. and Heating- 26 ,p.p. 20-27, 1972.-
- 3)-Read,W.R., Czech J.-"Operating Experience With a Solar Timber Kiln"- Int.Solar Energy Congress- Los Angeles, California- Julio 1975.-
- 4)-Morrison D.J., Abdel Khalik, S.I.-"Performance of a Solar Heating System Utilizing Phase Change Energy Storage" Actas del Congreso ISES- Sección Americana,Canada 1976.-
- 5)-Rohsenow W.M., Hartnett J.P., ed. "Handbook of Heat Transfer"- McGraw Hill- 18.69-18.73- 1973.-
- 6)-Saravia L., Alanis E.-"El Diseño de los Acumuladores de Piedras"- Actas 2° Reunión de Trabajo ASADES- Salta 1976.

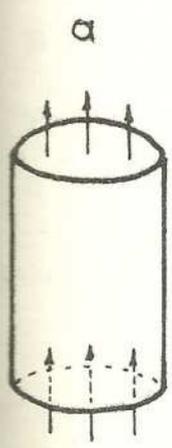




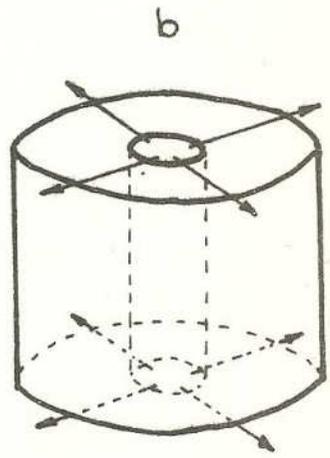


**FIGURA 4**

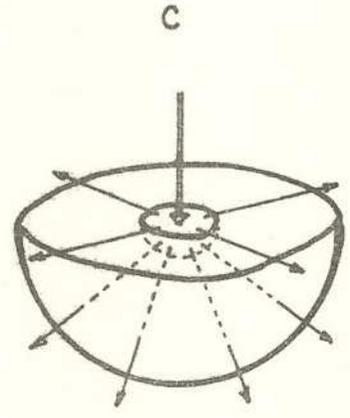
cálculo efectuado con un  $h$  igual a la mitad del utilizado en FIG 3



FLUJO AXIAL



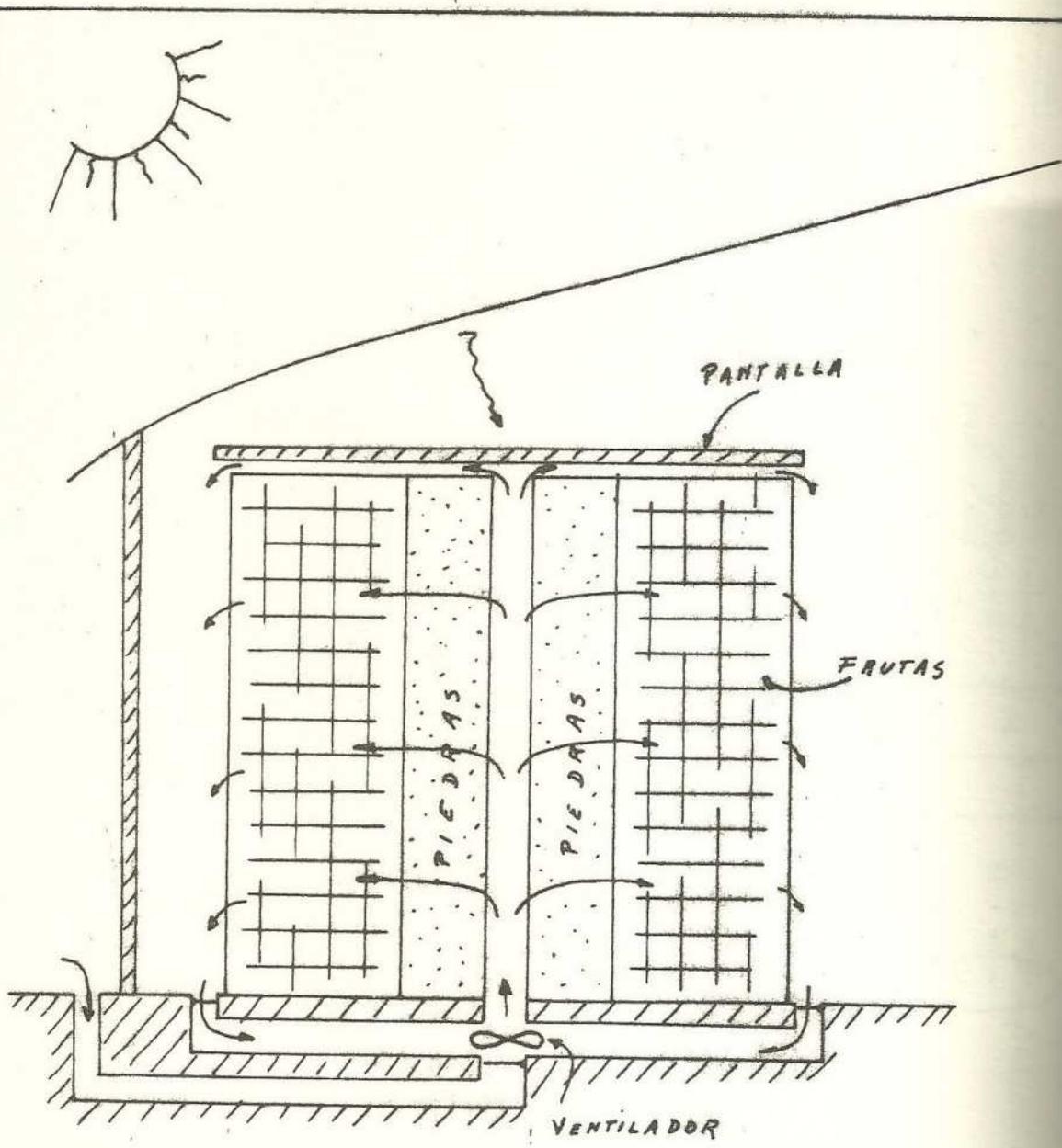
b) SIMETRIA CILINDRICA



c) SIMETRIA ESFERICA

FLUJO RADIAL

**FIGURA 5**



SE MUESTRA EL FUNCIONAMIENTO DIURNO - DE NOCHE SE CIRCULA AIRE EXTERIOR CAMBIANDO LA POSICION DE LAS COMPUERTAS - LA FIGURA ES ILUSTRATIVA Y NO A ESCALA -

FIGURA 6

TABLA I

SIMBOLO	DEFINICION	UNIDAD
x	distancia a lo largo del lecho	m
t	tiempo	h
$T_s(x,t)$	temperatura del sólido en x,t.	°C
$T_g(x,t)$	temperatura del gas en x,t.	°C
$c_s$	calor específico del sólido	Kcal/Kg°C
$c_g$	calor específico del gas	Kcal/Kg°C
$\rho_s$	densidad del sólido	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	densidad del gas	Kg/m <sup>3</sup>
$v_g$	velocidad del aire en el lecho	m/h
$\dot{m}_g$	caudal	Kg/h
h	coeficiente de transferencia convectivo volumétrico.	Kcal/h m <sup>3</sup> °C
f	fracción de vacíos	----
d	diámetro de piedras	m
L	longitud total del lecho	m
A	sección transversal del lecho	m <sup>2</sup>
$x_0$	posición del borde del lecho	m
$\alpha$	$h(c_s \rho_s (1-f))^{-1}$	h <sup>-1</sup>
$\beta$	$h(c_g \rho_g v_g)^{-1}$	m <sup>-1</sup>
$\gamma$	$\beta x$	----
z	$\alpha(t-x/v_g f)$	----

TABLA II

PARALETRO	VALOR
$c_s$	.21
$c_g$	.24
$\rho_s$	2645
$\rho_g$	1.03
$v_g$	1346
$\dot{m}$	316
h	964.8
f	.42
d	.027
L	.5
$x_0$	.096
$\alpha$	3
$\beta$	29

TABLA III

SISTEMA GENERAL DE ECUACIONES

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^q} (T_g - T_s)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial r} = \frac{\beta}{r^{q-p}} (T_s - T_g)$$

SIMETRIA

LINEAL	CILINDRICA	ESFERICA
$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha (T_g - T_s)$ $\frac{\partial T_g}{\partial r} = \beta (T_s - T_g)$ $q = 0$ $p = 0$ $h = a \left( \frac{v_g}{d} \right)^b = C$	$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^b} (T_g - T_s)$ $\frac{\partial T_g}{\partial r} = \frac{\beta}{r^{b-1}} (T_s - T_g)$ $q = b$ $p = 1$ $h = a \left( \frac{v_g}{d} \right)^b = \frac{C}{r^b}$	$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^{2b}} (T_g - T_s)$ $\frac{\partial T_g}{\partial r} = \frac{\beta}{r^{2(b-1)}} (T_s - T_g)$ $q = 2b$ $p = 2$ $h = a \left( \frac{v_g}{d} \right)^b = \frac{C}{r^{2b}}$