

III - 1

EL DISEÑO DE LOS ACUMULADORES DE PIEDRA

por

Luis Saravia y Elvio Alanís

Departamento de Ciencias Exactas
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177
4400 Salta
Argentina

RESUMEN

En este trabajo se analizan procedimientos de diseño de un acumulador construido con piedras, que procuran cumplir con un doble objetivo: el uso de procedimientos de uso sencillo y rápido; la introducción de pautas de diseño que tengan en cuenta los aspectos económicos del problema. El primer objetivo se cumple introduciendo hipótesis simplificativas para las condiciones de trabajo y utilizando gráficas para expresar las relaciones físicas no susceptibles de ser tratadas por vía analítica. Dentro de ciertas restricciones en los valores de los parámetros de diseño se aconseja el uso de una aproximación analítica para dichas relaciones, lo que simplifica mucho la resolución del problema. En cuanto al segundo objetivo, debe recalcar que las especificaciones técnicas a cumplir por el acumulador no determinan completamente todos los parámetros físicos relacionados con su construcción y funcionamiento. Por tanto, se procura agregar pautas adicionales de diseño que a la vez que especifican completamente el sistema, permiten tener en cuenta los aspectos económicos del problema, tanto en lo que tiene que ver con el costo inicial como con los gastos de funcionamiento.

1.- Introducción.

Los acumuladores de calor construidos con piedras han sido utilizados en diversos sistemas relacionados con el aprovechamiento de la energía solar, tales como sistemas de calentamiento habitacional (1,2), enfriamiento habitacional (1,3), secado de madera (4), etc.

En este trabajo se analizan procedimientos de diseño del acumulador, gráficos y analíticos, que tienen en cuenta un doble objetivo: 1) poner énfasis en procedimientos de uso sencillo y rápido, // 2) introducir en los procedimientos pautas de diseño que tengan en cuenta los aspectos económicos del problema.

En lo que se refiere al primer objetivo, el diseño de estos acumuladores se ve complicado por el hecho de que la distribución de temperatura como función del tiempo y distancia dentro del acumulador, es calculable únicamente por vía numérica. El estudio detallado del comportamiento del acumulador como parte de un sistema más complejo, como puede ser, a título de ejemplo, uno de calentamiento habitacional, puede hacerse por vía computacional (5). Con tal procedimiento se podrán evaluar el funcionamiento del sistema con todo detalle, pudiéndose tener en cuenta diversos factores, tales como, por ejemplo, la variación diaria y anual de las condiciones de radiación y ambientales, los distintos tipos de ciclos de funcionamiento, etc. No obstante, en ciertas circunstancias resulta conveniente disponer de procedimientos de diseño de tipo gráfico o analítico que, aunque no pretendan obtener un diseño afinado, sean de sencilla y rápida aplicación.

En cuanto al segundo objetivo, es de indicar que las especificaciones técnicas que debe cumplir un acumulador no determinan completamente todos los parámetros físicos relacionados con su construcción y funcionamiento. Por tal razón, deben agregarse pautas adicionales de diseño que permitan especificar totalmente el sistema. Es importante llevar a cabo esa especificación a través de la fijación de ciertos factores numéricos directamente relacionados con el aspecto económico del problema, tanto en lo que tiene que ver con su costo como a gastos de funcionamiento.

2.- Planteo del problema.

El problema que se presenta es el diseño de un acumulador de //

piedras que estando a una temperatura inicial uniforme t_{p0} , sea capaz de acumular una cantidad de calor Q_0 en τ_0 horas, extraídas de un flujo de aire que entra a una temperatura constante t_{g0} . El proceso será de calentamiento si la temperatura del gas es mayor que la del lecho de piedras, o de enfriamiento en caso contrario.

Por diseño del sistema se entiende determinar las siguientes // magnitudes: volumen V y longitud L del acumulador, diámetro medio d de la piedra utilizada, y velocidad v del aire. El diámetro medio se define como el de una esfera cuyo volumen sea igual al volumen // medio de una piedra, obtenido a partir de una muestra grande de piedras.

La distribución de la temperatura t_g del aire, para distintas // longitudes x dentro del acumulador, y para distintos tiempos τ , ha sido evaluada numéricamente y expresada en forma gráfica (6), como relación entre tres números adimensionados. La temperatura t_g , expresada a través del número adimensionado

$$\alpha = \frac{t_g - t_{p0}}{t_{g0} - t_{p0}} \quad (1)$$

se da como función de x y τ expresados con dos números más:

$$\lambda = \frac{h}{c_g \cdot \rho_g \cdot v} \quad \theta = \frac{h}{c_p(1-f) \rho_p} \cdot \tau \quad (2)$$

c_p y c_g son los calores específicos de la piedra y el aire, ρ_p y ρ_g las densidades, f es el porcentaje de espacio vacío entre las piedras del acumulador, y h el coeficiente de transmisión térmica volumétrico entre la piedra y el aire que la circunda. Los valores de θ y λ correspondientes a τ_0 y L serán conocidos como θ_0 y λ_0 .

La cantidad de calor cedida al acumulador, Q_0 , al cabo de un // tiempo τ_0 puede calcularse a partir de la función $\alpha(\lambda_0, \theta_0)$. Si llamamos

$$Q_M = c_p \cdot \rho_p \cdot (1-f) \cdot V \cdot (t_{g0} - t_{p0}) \quad (3)$$

se tiene, con mucha aproximación:

$$Q_0 = Q_M \int_0^{\theta_0} \left(1 - \alpha(\theta, \lambda_0) \right) \frac{d\theta}{\lambda_0} \quad (4)$$

Q_M es la máxima cantidad de calor que puede aceptar el acumulador, si se esperase un tiempo infinito.

El coeficiente de transferencia h depende de las dimensiones de las piedras utilizadas y las condiciones de funcionamiento del sistema. Una expresión del tipo

$$h = a \left(\frac{\rho_g \cdot v}{d} \right)^b \quad (5)$$

ha sido obtenida experimentalmente (7, 8, 9), con piedras de distintos tipos. Los valores obtenidos para a y b se dan en la Tabla I.

Las unidades que se usan en lo que sigue para las magnitudes ya mencionadas, se dan en la Tabla II.

Se acaban de introducir todas las magnitudes físicas de interés en el proceso, así como las ecuaciones que lo gobiernan. De las magnitudes, 5 son conocidas por ser propiedades físicas medibles de la piedra o el aire: c_p , c_g , ρ_p , ρ_g , f . Otras 4 figuran como datos conocidos del problema: t_{g_0} , t_{p_0} , Q_0 , τ_0 . Quedan otras 7 que figuran como incógnitas: V , L , d , v , h , λ_0 y θ_0 . Por otro lado se tienen // 4 relaciones entre las magnitudes: las definiciones de λ_0 y θ_0 , la expresión de h y la ecuación de Q_0 como función de λ_0 y θ_0 . Ello // significa que existen 3 magnitudes que pueden ser elegidas libremente sin afectar el comportamiento que se requiere del sistema. De su elección dependerá el diseño final que se obtenga. De acuerdo a los objetivos establecidos en la introducción, en la sección siguiente se introducirán nuevos parámetros, que se encuentran relacionados / con los aspectos económicos del problema permitiendo tener en cuenta este aspecto en el diseño final.

A continuación se dará una forma más compacta de las ecuaciones introducidas, reuniendo en constantes únicas a las magnitudes cuyos valores son conocidos:

$$\theta_0 = m_\theta \cdot h \cdot \tau_0 \quad (6)$$

$$\lambda_0 = m_\lambda \frac{h \cdot L}{v} \quad (7)$$

$$h = m_h \cdot (v/d)^b \quad (8)$$

$$Q_M = m_M \cdot V \cdot (t_{g_0} - t_{p_0}) \quad (9)$$

$$Q_0 = Q_M \cdot f_a(\lambda_0, \theta_0) \quad (10)$$

La expresión de las constantes m introducidas se dan en la Tabla

III. La función f_a , que determina Q_0 , tiene la forma:

$$f_a(\lambda_0, \theta_0) = \int_0^{\theta_0} [1 - \alpha(\lambda_0, \theta)] \frac{d\theta}{\lambda_0} \quad (11)$$

Es calculable numéricamente y su dependencia se da en forma gráfica en las Fig. 1 y 2, las que se explican en detalle en la próxima sección.

En las secciones que siguen, las nociones que se introduzcan se van ilustradas con un ejemplo. Los valores elegidos para las magnitudes conocidas, así como los valores que se obtienen para las // constantes m , se dan en la Tabla IV. Los valores elegidos son los / más usuales para el tipo de aplicación solar.

3. Parámetros de diseño.

En esta sección se definirán dos nuevos parámetros, que son importantes cuando se discuten los aspectos económicos del problema.

Un acumulador dado es capaz de acumular una cantidad máxima de calor, lo que se consigue cuando el gas a temperatura t_{g_0} calienta toda la piedra a esa temperatura. Ese calor es el que se ha definido como Q_M . Esta posibilidad es teórica, ya que requiere esperar un tiempo infinito. En condiciones reales se acumulará una cantidad menor, Q_0 . Se dará el nombre de factor de aprovechamiento f_a a la relación

$$f_a = \frac{Q_0}{Q_M} \quad (12)$$

Este factor variará entre 0 y 1 y es uno de los parámetros de diseño importantes, ya que su valor determina el volumen del acumulador, influyendo directamente en el costo inicial del sistema. En efecto, / de acuerdo a la expresión (9), se tiene

$$f_a = \frac{Q_0}{m_M \cdot V \cdot (t_{g_0} - t_{p_0})} \quad (13)$$

dado que Q_0 y $(t_{g_0} - t_{p_0})$ se conocen, f_a determina V .

La dependencia de f_a con λ_0 y θ_0 se da en forma gráfica en la figura 1 y 2, siendo la segunda un detalle de la primera. La utilización de escalas logarítmicas en los ejes permite que cada una de // las curvas determinadas por f_a tome una forma prácticamente rectilínea, excepto para valores bajos de λ_0 . Este parámetro ha sido utilizado por Hansen (10) en relación con el diseño de regeneradores, u-

tilizando gráficas con escalas lineales.

En la misma gráfica se pueden incluir curvas determinadas por el valor del parámetro a , las que nos dan la temperatura de salida del gas en el acumulador.

Otro aspecto de interés económico en lo que tiene que ver con / los gastos de funcionamiento, es el consumo de potencia mecánica W necesaria para circular el aire a través del acumulador. La pérdida de carga por unidad de longitud está dada por

$$\frac{\Delta p}{L} = f_o \cdot c \cdot \frac{v^2}{d} \quad (14)$$

donde c es una constante dependiente de las unidades y propiedades del gas, y f_o una función del número de Reynolds, determinable experimentalmente. Close (1), ha publicado valores de f_o obtenidos por Dunkle a partir de diversos datos experimentales. La dependencia de la pérdida de carga con d y v , se da gráficamente en la Fig. 3. /// Ella se ha calculado con el gas a una temperatura $T_o = 298^\circ K$ y una presión $p_o = 760$ mm Hg. Para otras condiciones de temperatura, T_1 y presión, p_1 , se puede usar el mismo gráfico si se utilizan valores de velocidad y diámetro v_e y d_e que se calculan a partir de los valores reales mediante las expresiones:

$$v_e = \left(\frac{T_o}{T} \right)^{5/6} \cdot \left(\frac{p}{p_o} \right)^{2/3} \cdot v \quad (15)$$

$$d_e = \left(\frac{T_o}{T} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{p}{p_o} \right)^{1/3} \cdot d$$

Se definirá el factor de mérito f_m del acumulador como la relación entre el calor horario medio acumulado, Q_o/τ_o , y la potencia / mecánica consumida W :

$$f_m = \frac{1,16 \cdot Q_o}{\tau_o \cdot W} \quad (16)$$

W es calculable en función de la pérdida de carga Δp , obteniéndose:

$$f_m = m_w \frac{Q_o}{\tau_o \cdot v \cdot (\Delta p/L)} \quad (17)$$

El valor de la constante m_w también fue incluido en la Tabla III. La elección de f_m decide los gastos de funcionamiento del siste-

ma. Debe tenerse en cuenta que también habrá pérdidas de carga en los ductos de unión del acumulador al resto del sistema, que se / suman al consumo de potencia.

4.- Diseño gráfico.

Los tres parámetros a fijar con el fin de establecer el diseño de un sistema pueden variar de acuerdo a los fines buscados. A continuación describiremos como ejemplo uno de los casos más usuales, aquel en el que se fijan f_a , f_m y L . La elección de f_a y f_m está relacionada con el aspecto económico del problema. La fijación de L está relacionada con el hecho de que el acumulador debe ser ubicado en un edificio, lo que generalmente determina alguna de sus dimensiones.

El procedimiento de diseño a utilizar en este caso se ilustra en el diagrama I. La determinación del volumen V es inmediata. Para los otros parámetros el método es indirecto, debido a la necesidad de utilizar expresiones dadas en forma gráfica. Se comienza por elegir varias velocidades v , en forma tal que cubran el rango de valores finales. Dado un v , se utilizan sucesivamente las ecuaciones disponibles según se ilustra en el diagrama I, determinando los valores de $\Delta p/L$, d , h , λ_o y θ_o . Cada pareja (λ_o, θ_o) define un punto en el gráfico de la Fig. 1. Repitiendo el cálculo para los otros valores de v , se obtiene una curva cuyo corte con la línea definida en ese gráfico por f_a , determina los valores de trabajo de λ_o y θ_o . Con estos, se determinan los valores buscados de d y v de acuerdo a las distintas ecuaciones utilizadas en sucesión como se indica en el diagrama I.

A título de ejemplo, la Tabla V muestra los valores obtenidos en las distintas etapas de diseño de un acumulador capaz de guardar 10^5 cal en 8 horas, con una temperatura inicial de $20^\circ C$ y una temperatura del gas de $60^\circ C$. Se han elegido como parámetros de diseño a $f_a = 0,8$, $f_m = 1000$ y $L = 2$ m. En la Fig. 4 se muestran // los valores obtenidos para las distintas incógnitas cuando se varían los parámetros de diseño.

5.- Aproximación analítica.

Se puede apreciar en las Fig. 1 y 2 que las curvas que dan // $\ln \lambda_o$ como función de $\ln \theta$ a f_a constante, se aproximan mucho a // líneas rectas para valores de λ_o por encima de 30. Ello sucede //

porque en esta zona la contribución del término $a(\lambda_0, \theta)$ a la integral de la ecuación (11) es pequeña. Por otro lado, se comprueba a través de los cálculos realizados en la práctica, que esa es la zona donde se ubican los diseños usuales. Es de esperar que si se pueden aproximar las curvas del gráfico por una expresión lineal, los cálculos podrían simplificarse en mucho.

En lo que sigue se aproximará la función $\lambda_0(\theta_0, f_a)$ por una expresión del tipo:

$$\ln(\lambda_0) = a_0 \cdot \ln(\theta_0) + a_1 \cdot \ln(f_a) + a_2 \quad (18)$$

donde:

$$a_0 = 1,04 \quad ; \quad a_1 = -1,0 \quad \text{y} \quad a_2 = -0,23 \quad (19)$$

Se puede considerar que esta expresión es válida para valores de λ_0 comprendidos entre 30 y 100, y valores de f_a mayores de 0,5. En la zona central del intervalo las diferencias entre esa expresión y los valores obtenidos del gráfico son del orden del 1%, mientras que en las zonas extremas las diferencias llegan al 8% en algunos casos.

El uso de esta expresión simplifica en mucho el diseño del acumulador. En efecto, si se reemplazan las expresiones para λ_0 y θ_0 dadas por las ecuaciones (6) y (7), y se despeja v , que es la magnitud buscada, se tiene:

$$\ln v = (1-a_0) \ln h - a_1 \ln f_a + \ln L - a_0 \ln \tau + \ln m_1 - a_0 \ln m_2 - a_2 \quad (20)$$

Obsérvese que en el segundo término la única magnitud no conocida es h . Pero dado que $(1-a_0)$ es casi cero, las variaciones de h no producen cambio significativo, por lo que puede tomarse un valor constante, como ser 2000 en unidades métricas, sin cometer un error importante en v . En estas condiciones v queda determinado, ya que f_a , L y τ son conocidos. La expresión final, en el sistema métrico y para los valores ya utilizados de las constantes m , es:

$$\ln v = \ln f_a + \ln L - 1,04 \ln \tau - 0,838 \quad (21)$$

Una vez conocido v y calculado V a partir de las ecuaciones (9) y (10), se determina $\Delta p/L$ con la expresión (17) para f_m . Con $\Delta p/L$ y v , se obtiene directamente del gráfico de pérdidas de carga. Aunque así quedan determinadas todas las magnitudes buscadas,

es aconsejable calcular h con la expresión (8), y de ahí el valor de λ_0 a través de la ecuación (7). Esto permite verificar que λ_0 se encuentra dentro de los límites establecidos para la validez de la aproximación analítica, justificando su uso. Es de destacar que aunque el valor de λ_0 no esté dentro de ese intervalo, los resultados obtenidos pueden usarse como una primer aproximación en el cálculo gráfico, ya que la función $\lambda_0(\theta_0, f_a)$ sigue siendo bastante lineal, aún para valores de λ_0 comprendidos entre 10 y 100.

6.- Discusión.

En las secciones anteriores se ha planteado el problema de diseño de un acumulador y se han detallado los métodos de resolución que cumplen los objetivos definidos en la introducción. El primer método que se propuso permite el diseño en forma rápida a través de un conjunto de gráficos que son válidos en todos los casos. En un campo más restringido, que suele contener los casos más usuales, se introduce una aproximación analítica que permite un cálculo casi inmediato. Se ha procurado conectar los aspectos técnicos del diseño con las consideraciones económicas mediante la introducción de dos factores, f_m y f_a , directamente relacionados con el costo inicial y los gastos de funcionamiento del sistema.

El tipo de diseño que se estudia en detalle supone dados un conjunto de parámetros, f_m , f_a y L . Aunque esta elección suele ser la usual, en algunos casos pueden darse otras, lo que obliga a cambiar el método de resolución del problema. No obstante, debe señalarse que dichos casos dan lugar a procedimientos más sencillos que el aquí estudiado. Por ejemplo, si existiese interés en fijar la temperatura de salida de los gases en vez de la longitud L , se tendría a f_m , f_a y α . En este caso el diseño es inmediato, ya que f_a y α determinan directamente los valores de λ_0 y θ_0 .

La aproximación analítica tiene su justificación en el hecho de que en la zona que se utiliza, los valores de a en la fórmula (11) son pequeños frente a 1, haciendo que f_a dependa casi linealmente de λ_0 . Estas condiciones coinciden con las usuales de diseño debido a que lo más común es que se procuren obtener condiciones de trabajo en que a sea pequeño a la salida del acumulador. En el ejemplo que se presenta en la sección 4 se dan las condiciones en las que la aproximación es válida. Esto hace que la dependencia de los parámetros a calcular con los parámetros que se fi-

jan sea muy sencilla, tal cual se aprecia en la Fig. 4. Por ejemplo, la relación (21) nos dice que si se fija L y τ_0 , la dependencia de v con f_a tiene que ser lineal.

En la Tabla II se dan diversos coeficientes para la expresión que determina el valor del coeficiente de convección h , los que / han sido medidos con piedras de distintos tipos. En la región don de la aproximación analítica es válida, el conocimiento preciso / de esta expresión no es importante y de hecho solo se utiliza para verificar que las condiciones de cálculo son las válidas para el uso correcto de la aproximación. A medida que el punto de diseño se aleja de esa región, el valor de h toma importancia y se ha de realizar una selección de la expresión a utilizar en función / del tipo de piedra a usar.

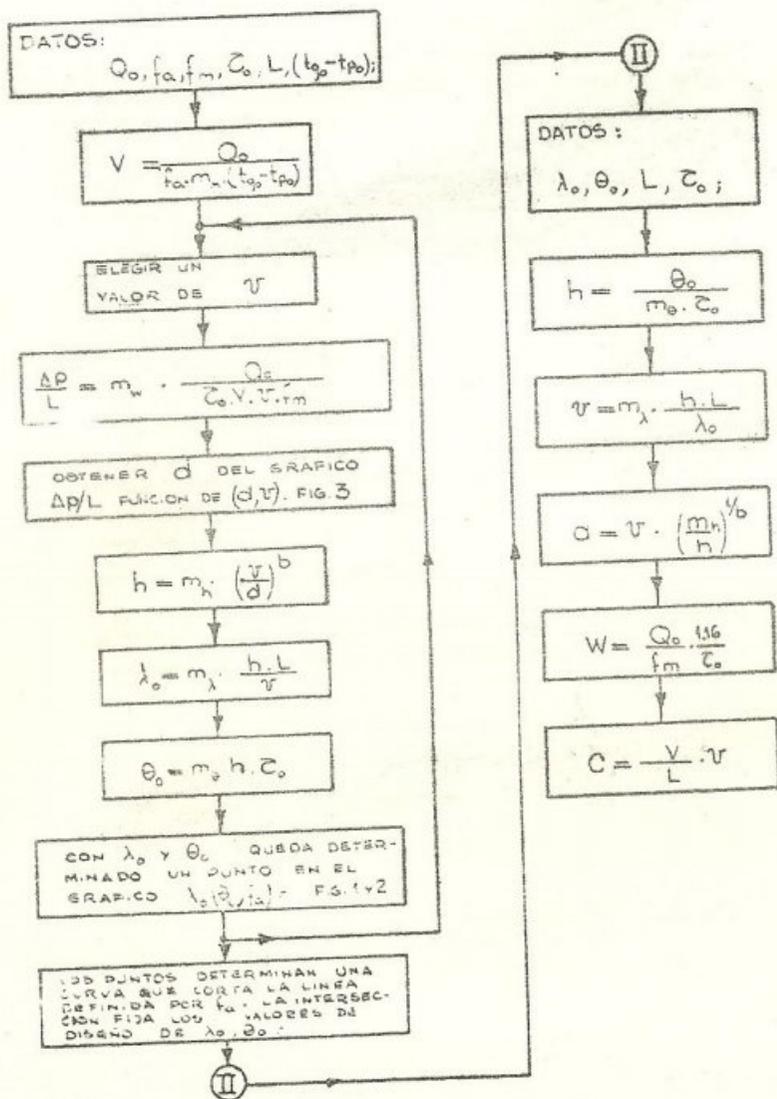
La hipótesis de constancia de la temperatura del aire a la entrada del acumulador se adopta procurando obtener una solución // sencilla al problema. En algunos casos, como ser aquel en el que el aire proviene directamente de un colector solar, habrá variaciones diarias y el presente criterio sólo tiene como intención / el de ser utilizado para un estudio inicial del problema, que deberá ser completado por un análisis más fino, necesariamente de / tipo computacional, cuando se intente precisar el diseño final.

Referencias.

- 1.- Close, D. J., Rock pile Thermal Storage for Comfort Air Conditioning, Mech. & Chem. Eng. Transactions, p. 11, May 65.
- 2.- Ward, J. C., Long term Performance of a Residential Solar Heating System, 1975 Int. Solar Energy Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, August 1975.
- 3.- Close, D. J., Design and performance of a Storage Air-Conditioning System, Mech. & Chem. Eng. Transactions, Australia, p. 45, May 68.
- 4.- Read, W. R. and Czech, J., Operating experience with a solar timber kiln, 1975 Int. Energy Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, August 1975.
- 5.- Balcomb, J. D. et al., Design Considerations of air-cooled collectors/rock Bin storage solar heating systems, 1975 Int. Solar Energy Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Aug. 1975.
- 6.- Schumann, T. E. W., J. Franklin Inst. 208, 405, 1928.
- 7.- Saunders, O. A. and Ford, H. J., Iron Steel Inst. (London) 1, 291, 1940.
- 8.- Lof, G. O. G. and Hawley, R. W., Unsteady - State Heat Transfer between Air and Loose Solids, Ind. & Eng. Chemistry, p. 1061, June 1948.
- 9.- Alanís, E. y Saravia, L., 62° Congreso de la Asociación Física Argentina, Rosario, Nov. 1975.
- 10.- Hausen, H., Z. angew. Math. Mech., 11, 105, 1931 y mención en Mc Adams, W., Heat Transmission, Mc Graw Hill, 3rd Edition, 1954, p. 296.

DIAGRAMA I

PROCEDIMIENTO GRAFICO DE DISEÑO DE UN ACUMULADOR DE PIEDRAS



T A B L A I

Autor	a		b	Tipo de piedras
	Métricas	Inglesas		
BAINDERS Y FORD	0.195	0.152	1	esféricas
ALANIS Y SARAVIA	0.41	0.32	0.91	redondeadas
LOFF Y HAWLEY	1.01	0.79	0.7	partidas

T A B L A III

DEFINICION DE LAS CONSTANTES m - Fórmulas (6), (7), (8), (9) y (17).

Unidades métricas	Unidades inglesas	Definida en fórmula
$m_b = 1/c_p \cdot \rho_p (1-f)$	Idem	6
$m_\lambda = 1/3600 \cdot c_g \cdot \rho_g$	$m_\lambda = 1/60 \cdot c_g \cdot \rho_g$	7
$m_h = a(3,6 \cdot 10^5 \rho_g)^b$	$m_h = a(720 \rho_g)^b$	8
$m_M = \frac{i}{m_b} = c_p \cdot \rho_p (1-f)$ (calor específico volu métrico del lecho)	Idem	9
$m_W = 0.0119$	$m_W = 2.49$	17

T A B L A I I

Símbolo	Nombres	Unidades	
		Métricas	Inglésas
τ	variable tiempo	horas	horas
τ_0	periodo de calentamiento	horas	horas
x	distancia a lo largo del lecho	m	ft
L	longitud del acumulador	m	ft
d	diámetro medio de piedras	cm	inch
V	volumen del acumulador	m ³	ft ³
v	velocidad del aire dentro del acumulador	m/s	ft/mín
t_{Po}	temperatura de piedras en $\tau = 0$	°C	°F
t_g	temperatura del aire en (τ, x)	°C	°F
t_{g0}	temperatura del aire en $x = 0$ (entrada)	°C	°F
Q_{∞}	calor acumulable a tiempo infinito	Kcal	Btu
Q_0	calor acumulable en el tiempo τ_0	Kcal	Btu
c_g	calor específico del aire	Kcal/Kg °C	Btu/lb °F
c_p	calor específico de la piedra	Kcal/Kg °C	Btu/lb °F
ρ_g	densidad del aire	Kg/m ³	lb/ft ³
ρ_p	densidad de la piedra	Kg/m ³	lb/ft ³
n	coeficiente de transmisión térmica volumé- trico	Kcal/m ³ °C hr	Btu/ft ³ °F hr
$\Delta p/L$	pérdida de carga en el acumulador	cm H ₂ O/m watts	inch H ₂ O/ft HP
W	potencia mecánica	por 1/3600	por 1/60
λ	$= h \times c_g \times v$ distancia adimensional	1	1
θ	$= h \tau / c_p (1-f) \rho_p$ tiempo adimensional	1	1
α	$= (t_g - t_{Po}) / (t_{g0} - t_{Po})$ temperatura adi- mensionada	1	1

T A B L A I V

Valores de los parámetros físicos conocidos a utilizar en el ejemplo que se plantea y valores resultantes de las constantes m.

	Unidades métricas
c_p	0.23
c_g	0.24
ρ_p	2630
ρ_g	1.185
f	0.42
a	1.01
b	0.7
m_0	0.00273
m_λ	0.000977
m_M	366.6
m_h	626.58

T A B L A V

Valores de los parámetros en las sucesivas etapas de diseño gráfico de un acumu-
lador (Unidades Métricas).

Datos: $Q_0 = 10^5$; $\tau_0 = 8$; $t_{g0} = 60$; $t_{Po} = 20$; $f_a = 0.8$; $f_m = 1000$; $L = 2$.
Se obtiene: $v = 8.5$

Eligiendo v:

v	$\Delta p/L$	d	h	λ_0	θ_0
0.15	0.116	0.065	1133	15.0	24.7
0.10	0.174	0.022	1821	36.2	39.7
0.05	0.348	0.008	2275	90.7	49.6

Punto de diseño por corte de curvas: $\lambda_0 = 55$; $\theta_0 = 47$

Se obtiene: $h = 2154$; $v = 0.078$; $d = 0.0134$

LEYENDAS DE LAS FIGURAS

FIGURA 1: Muestra la dependencia del parámetro λ_0 con θ_0 , para distintos valores del factor de aprovechamiento f_a y del parámetro α , Las escalas en ambos ejes son logarítmicas.

FIGURA 2: Muestra en detalle una región de la figura 1.

FIGURA 3: Muestra la dependencia de la pérdida de carga por unidad de longitud, $\Delta p/L$, en un acumulador como función de la velocidad del aire, v , en el aparato y del diámetro, d , de las piedras utilizadas.

FIGURA 4: Muestra la variación de las distintas magnitudes físicas del acumulador, volúmen V , diámetro de piedras d , velocidad del aire v , y consumo de aire C , con los tres parámetros de diseño: factor de aprovechamiento f_a , de mérito f_m , y longitud del acumulador L .

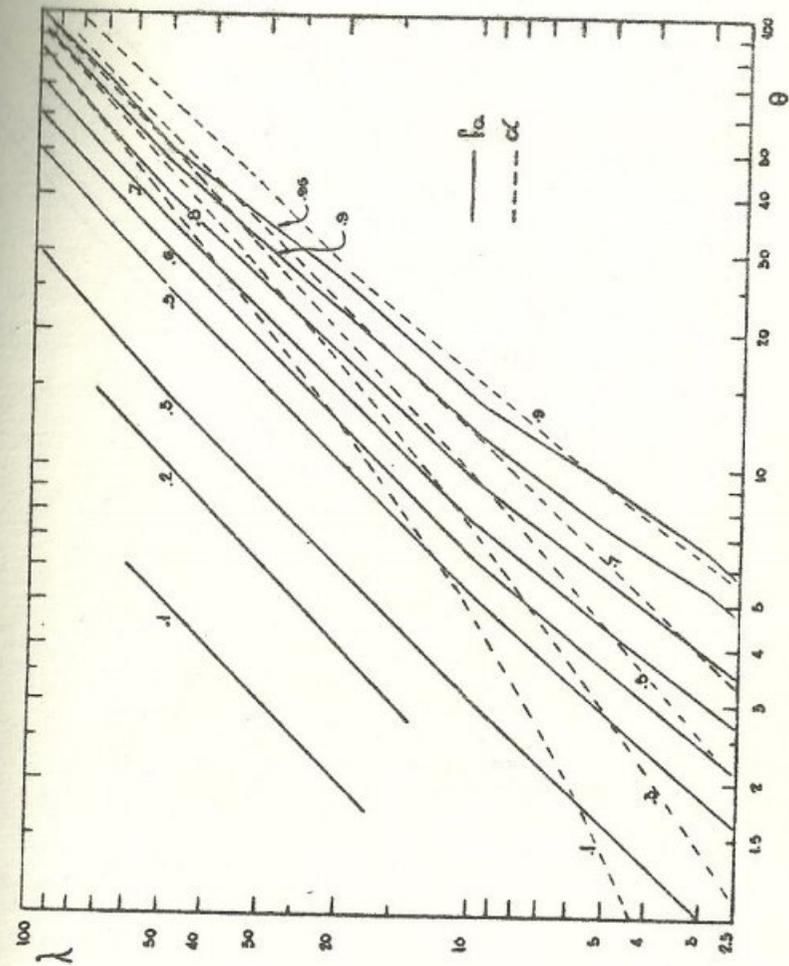


Fig. 1

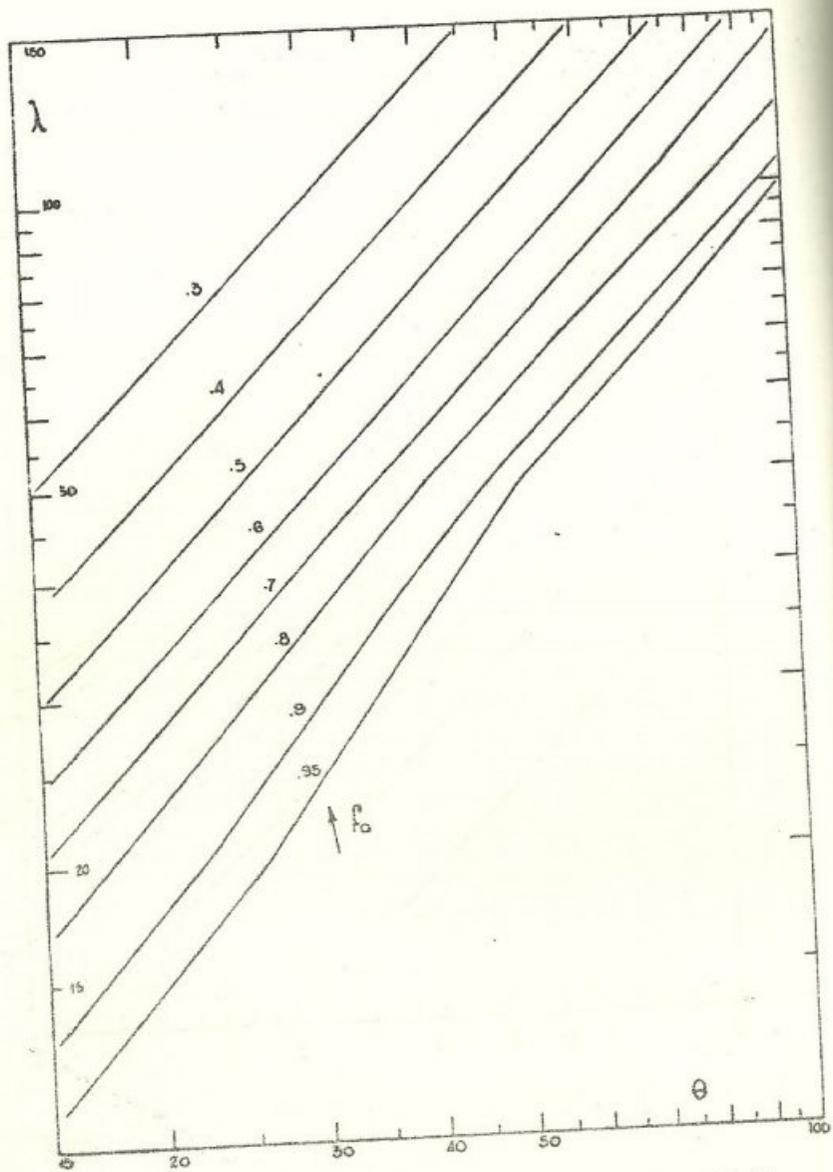


Fig. 2

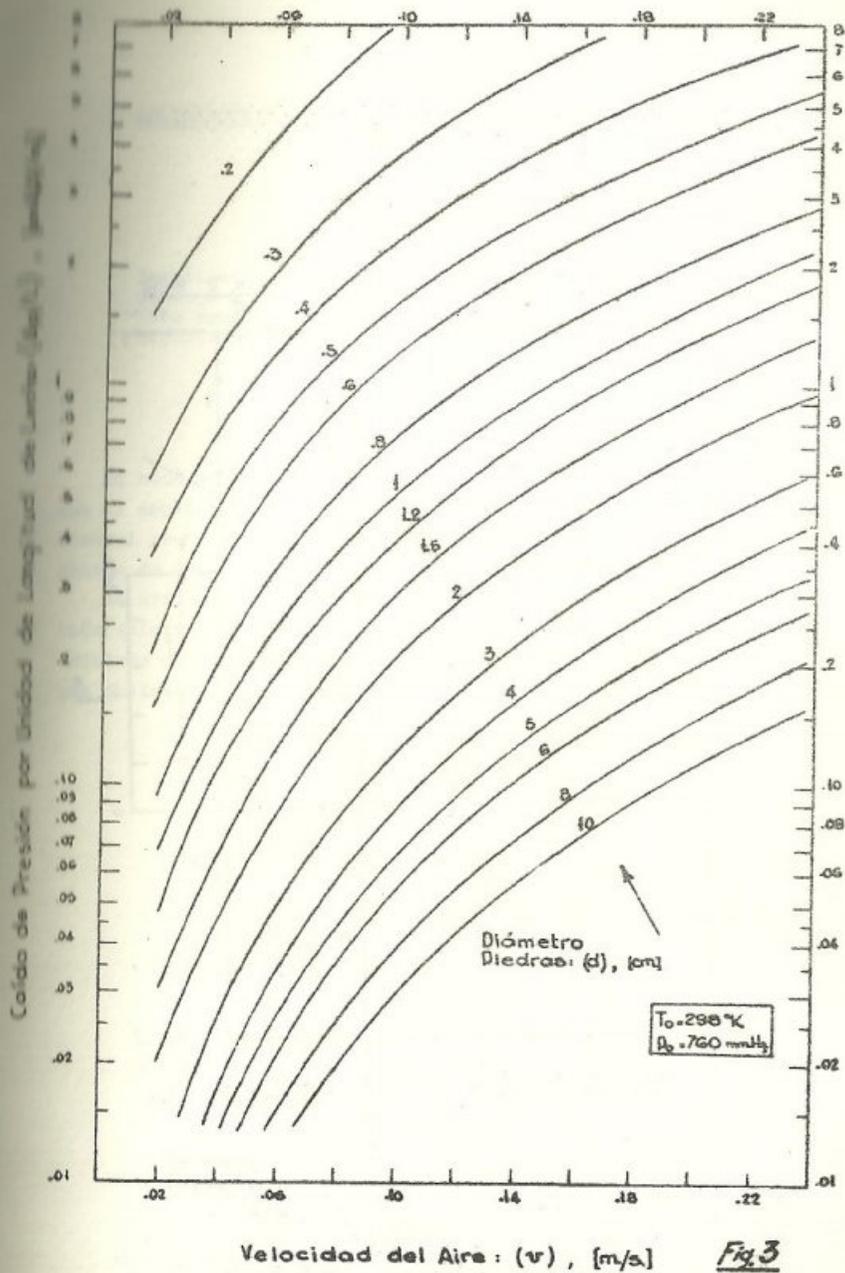


Fig. 3

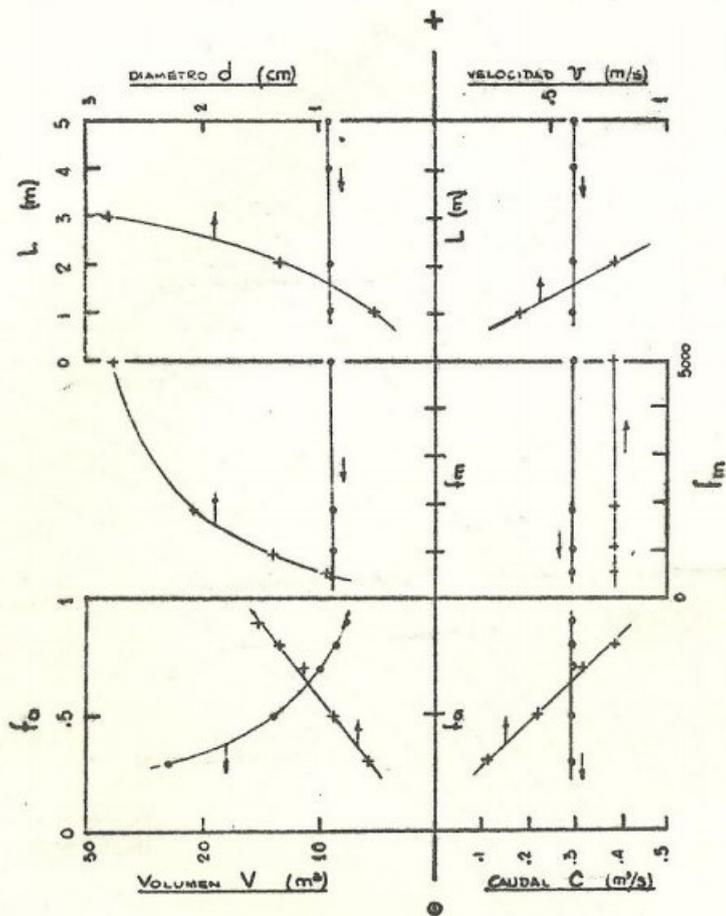


FIG. 4