

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA



EVALUACION EXPERIMENTAL DE UN APARATO
PARA DETERMINAR CONDUCTIVIDADES TERMICAS
INSTALADO EN EL LABORATORIO DE INGENIERIA
QUIMICA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:

FLAVIO AMERICO LAGOS GALVAN

1 9 8 3



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

	Página
Introducción	1
Abreviaturas usadas en el Capítulo I	3
Capítulo I. Transferencia de calor por conducción	
a) en placas	5
b) en cilindros	6
c) en esferas	7
d) en cuerpos irregulares	9
e) en resistencias en serie	9
Abreviaturas usadas en el Capítulo II	11
Capítulo II . Conductividad Térmica	13
a) Conductividad Térmica de gases	19
b) Conductividad Térmica de líquidos	27
c) Conductividad Térmica de sólidos	22
Difusividad Térmica	25
Capítulo III. Aislantes	26
Clasificaciones de los materiales aislantes	27
Criterios de selección de aislamientos	31
Colocación de aislantes	32
Determinación del espesor óptimo de aislante	43
Capítulo IV. Descripción del equipo .	49
Secuencia de modificaciones hechas al equipo y trabajo desarrollado	50
Capítulo V. Descripción Experimental	54
Modo de operar el equipo	54
Observaciones	55
Datos	57
Capítulo VI.	
Ejemplo	59
Planteamiento	59
Resultados	65

	Página
Capítulo VII.	
Conclusiones	66
Recomendaciones	67
APENDICES :	
" A " Termómetros	69
" B " Determinación de la calidad del vapor del Laboratorio de Ingeniería Química	72
Calorímetro Isentálpico	72
Calorímetro de Barcol	73
" C " Proposición de una práctica para determinar conductividad térmica en materiales aislantes	75
i) Objetivo	75
ii) Fundamentos teóricos	75
iii) Descripción del equipo	77
Técnica de Operación	80
Observaciones y Recomendaciones	81
Bibliografía	83
Questionario	83
BIBLIOGRAFIA	86

Los aislantes térmicos son de gran importancia a nivel industrial por razones como :

- a) Seguridad .
- b) Administración de energía .

A continuación se aplican brevemente estos aspectos:

- a) Seguridad .

En las instalaciones industriales, donde se manejan flujos o corrientes de proceso que sufren diferentes cambios (en su composición, su entalpia o su momentum), se presenta una gran cantidad de tuberías y recipientes a temperaturas mayores a las soportables por el ser humano, que se encuentran al alcance de éste, representando riesgos directos para el mismo. Se considera que la temperatura que se tenga en un área de trabajo expuesta al hombre deberá estar en el rango comprendido entre los 54.4 y 71.1 °C (130 - 160 °F) para prevenir daño por cualquier contacto eventual por parte del personal. (R1)

- b) Administración de energía .

En un proceso industrial, para obtener productos a partir de materias primas es necesario - entre otras actividades - llevar a cabo cambios térmicos sobre las corrientes de proceso. Para disponer de la energía para esos cambios, se requiere usar combustibles derivados del petróleo en las instalaciones industriales, generando energía calorífica por combustión de los mismos. Hace todavía algunos años, los precios de los combustibles eran bajos, pero a partir del embarco petrolero de 1973 (conflicto árabe-israelí), los precios se han incrementado - considerablemente en todo el mundo, lo que ha traído la consiguiente elevación de costos de la energía necesaria para un proceso industrial.

Por esta razón, se ha hecho necesario implementar progra-

mas de ahorro y administración de energía en instalaciones industriales.

Para disminuir los gastos de energía, se procedió a hacer en primer instancia, un análisis técnico-económico de las instalaciones industriales, reduciendo en primer término, la energía disipada al medio ambiente, por medio de aislamientos térmicos adecuados .

A principios de 1983, la situación antes descrita ha cambiado mucho, puesto que los precios del petróleo actualmente se encuentran a la baja. Esto lo han logrado los países consumidores debido a las políticas aplicadas en la administración de energía, donde una de las medidas aplicadas fué la de instalar los aislantes adecuados, con el consiguiente ahorro de energía. Con esto se comprueba la importancia de estos materiales en cuanto a su impacto en el ahorro de energía requerida en las instalaciones industriales.

LISTA DE ABREVIATURAS USADAS EN EL CAPÍTULO I

- A : Area de flujo de calor
 t : tiempo
 q : flux térmico
 q_x : componente del flux térmico en la dirección positiva de x
 x : dirección de flujo de calor
 T : temperatura
 ΔT : incremento finito de temperatura
 Δx : distancia ó separación (finita) entre los puntos
 Q : calor transferido
 Q_x : calor transferido en la dirección x
 k_i : conductividad térmica del aislante i
 k_m : conductividad térmica media
 A_m : área de flujo de calor media
 l : largo de un tubo ó cilindro
 D : diámetro de un tubo ó cilindro
 r : radio de un cilindro ó una esfera
 A_1, A_2 : áreas interior y exterior (de aislante)
 r_1, r_2 : radios interno y externo (de aislante)
 Δx_i : espesor de una capa de aislante i

CAPITULO I
TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION .

CONDUCCION.

Definición.- Es el mecanismo de transferencia en el que el calor fluye a través de la masa de un cierto material, desde una región o zona de alta temperatura a otra de baja temperatura y que provoca interacciones entre las moléculas que componen la sustancia dada (sólidos).

La ley fundamental que describe la conducción del calor y se basa en observaciones experimentales, fué propuesta por Joseph Fourier, por lo que recibe el nombre de este físico--matemático francés.

En los sistemas en los que se involucra flujo, como en el caso del flujo de calor, flujo de fluidos o flujo eléctrico, se ha observado que la cantidad de flujo es directamente proporcional a un potencial o gradiente director e inversamente proporcional a las resistencias aplicadas al sistema :

$$\text{Flujo} \propto \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}}$$

La Ley de Fourier postula que la cantidad de calor que pasa a través de un área A por unidad de tiempo t, en la dirección positiva de x (llamado flux, q_x), es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas en la dirección del flujo de calor (potencial o gradiente director, ΔT) e inversamente proporcional a la distancia que separe los puntos considerados (Δx), expresándose esto matemáticamente :

$$q_x = \frac{Q_x}{A t}$$

$$q_x \propto - \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

El signo menos (-) se introduce puesto que se debe asegurar que q_x sea una cantidad positiva, ya que $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ es negativo, debido a que la temperatura disminuye con la distancia.

Para tener la igualdad se introduce una constante de proporcionalidad k , con lo cual se tiene :

$$\text{para el flux térmico , } q_x = - k \frac{\Delta T}{\Delta x} A \quad (1)$$

calor transferido por unidad de tiempo :

$$\frac{Q}{t} = - k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1a)$$

Tomando como base un tiempo t se tiene :

$$Q = - k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

A continuación se presenta la aplicación de la Ley de Fourier a diversas geometrías .

a) En placas. Para esta geometría se tiene la forma unidimensional de la Ley de Fourier .

$$\frac{Q}{A} \int_0^x dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$$

Integrando se tiene :

$$\frac{Q}{A} x = k (T_1 - T_2)$$

$$\frac{Q}{A} x = k \Delta T$$

Por simplicidad, la Ley de Fourier se postula de la forma siguiente :

$$Q = \frac{k_m A_m (T_1 - T_2)}{x} = \frac{k_m A_m \Delta T}{x} \quad (3)$$

donde el subíndice m se refiere a los valores medios de k y A .

b) En cilindros.

1. Tubos cilíndricos largos ($l/D \gg 1$)

Al observar una tubería aislada (cuerpo cilíndrico), notaremos que el calor fluye en forma radial y el área de flujo de calor aumenta con el radio (ver Figura 1).

Al considerar el área de flujo de calor se tiene :

$$A = 2\pi l x$$

Sustituyendo el área en la ec. (2) se tiene :

$$Q = - 2\pi l x k \frac{dT}{dx}$$

separando y reagrupando variables se llega a :

$$\frac{Q}{2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{x} = - k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

y al integrar :

$$\frac{Q}{2\pi l} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = k (T_1 - T_2)$$

Rearreglando nos da la ecuación :

$$Q = \frac{k 2\pi l (T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (4)$$

Resulta interesante hacer notar de ésta ecuación que como sólo aparece la relación de los radios, la velocidad de transmisión de calor por conducción, por unidad de longitud, es independiente del tamaño absoluto del cilindro.

Si la relación (r_2 / r_1) no está de 2, se puede tomar la media aritmética en la ec. (4) o se puede considerar la media logarítmica y el resultado será el dentro del -

del resultado obtenido con la ec. (4) para la forma cilíndrica.

ii.. Tubos cilíndricos cortos con los extremos aislados.

Para tubos cilíndricos aislados de poca longitud l, con diámetro exterior D, cubiertos totalmente, incluyendo los extremos con un aislamiento de espesor uniforme x, Nickerson y Businberre (R2) resolvieron el problema. Para (l/D) variando entre 0.30 e infinito, demostraron que la relación de A_m (área media) al área total interior A_1 es una función de las dos relaciones (D/l) y (x/D) como se ve en la figura 2 .

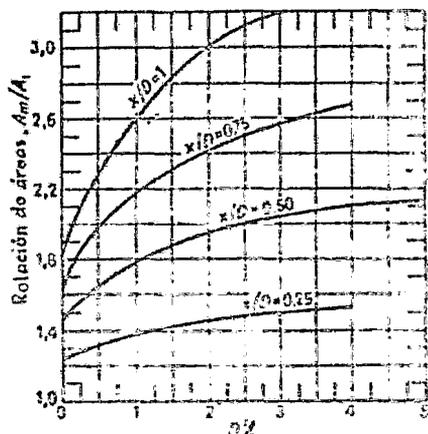


Figura 2. Gráfica para encontrar la relación A_m / A_1 para el caso de los cilindros cortos - con los extremos aislados .

Para utilizar esta gráfica es necesario conocer los valores de las relaciones (D/l) y (x/D), así como calcular el valor de A_1 , área interior total, incluyendo las bases. Con el dato de (D/l) se localiza la entrada sobre el eje de las abscisas, hasta hacerla coincidir con la curva correspondiente para (x/D) dado. Después se lee en el eje de las ordenadas, obteniéndose el valor correspondiente para -- (A_m/A_1), de donde se despeja el valor de A_m que se va a -- sustituir en la ec. (3).

c) En esferas .

El área para una esfera está dada por : $A = 4\pi x^2$.

Sustituyendo esto en la forma diferencial de la ec. (2) se tiene :

$$\frac{Q}{4\pi x^2} = -k \frac{dT}{dx}$$

Al integrar se deben considerar los límites r_1 y r_2 , radios interno y externo del aislante :

$$\frac{Q}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{x^2} = -k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

Integrando y reordenando esto se llega a :

$$Q = \frac{4\pi k r_1 r_2 (T_1 - T_2)}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

d) En cuerpos irregulares.

Debido a que la integración de la ec (2) para este caso se puede complicar demasiado, a veces se utiliza como aproximación satisfactoria la media aritmética de las superficies interna y externa (de aislamiento) en la ec (3).

e) En resistencias en serie .

En la práctica, los dispositivos destinados al intercambio de calor entre corrientes de proceso ó al manejo de dichas corrientes, son recubiertos o forrados de materiales tales que el calor que se transfiere al medio ambiente que los rodea, sea el mínimo posible . Para tal efecto, se colocan varias capas de materiales aislantes una sobre la otra (en forma radial) .

En la Figura 3, se habla de una pared compuesta porque se tienen varias capas de materiales aislantes distintos, de espesor $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3,$ con conductividades térmicas medias k_1, k_2, k_3 que están en contacto una con la otra, - siendo A el área (de contacto) transversal que es normal al flujo de calor.

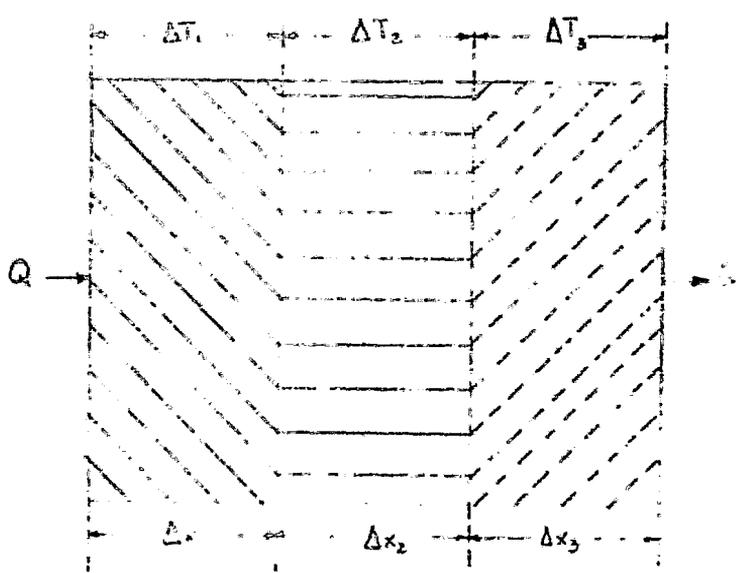


Figura 3. Pared compuesta .

Si ΔT_{tot} es el gradiente de temperatura a través de toda la pared compuesta , se tendrá :

$$\Delta T_{\text{tot}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

Una vez alcanzado el REGIMEN PERMANENTE, no habrá acumulación de calor, por lo que para las diferentes capas se tendrá :

$$\frac{Q_1}{t} = k_1 A \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} \quad ; \quad \frac{Q_2}{t} = k_2 A \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2}$$

$$\frac{Q_3}{t} = k_3 A \frac{\Delta T_3}{\Delta x_3}$$

De estas ecuaciones, considerando un intervalo de tiempo o fijando una base para t se tendrá :

$$Q_1 = k_1 A \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} \quad ; \quad Q_2 = k_2 A \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2}$$

$$Q_3 = k_3 A \frac{\Delta T_3}{\Delta x_3}$$

de aquí se tiene :

$$\Delta T_1 = Q_1 \frac{\Delta x_1}{A k_1} \quad ; \quad \Delta T_2 = Q_2 \frac{\Delta x_2}{A k_2} \quad ; \quad \Delta T_3 = Q_3 \frac{\Delta x_3}{A k_3}$$

A REGIMEN PERMANENTE, el calor (Q) que atraviesa las paredes es constante (no se tiene acumulación) :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

con lo cual se tiene :

$$\Delta T_{\text{tot}} = Q \left(\frac{\Delta x_1}{A k_1} + \frac{\Delta x_2}{A k_2} + \frac{\Delta x_3}{A k_3} \right)$$

Despejando Q resulta :

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{tot}}}{\frac{\Delta x_1}{A k_1} + \frac{\Delta x_2}{A k_2} + \frac{\Delta x_3}{A k_3}}$$

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{tot}}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T_{\text{tot}}}{R_{\text{tot}}}$$

donde R_i indica una resistencia individual y R_{tot} indica la resistencia total, que es la suma de las individuales.

LISTA DE ABREVIATURAS USADAS EN EL CAPITULO II

- Q_x : calor transferido en la dirección x
 A : área normal al flujo de calor
 t : tiempo
 q_x : componente del flux térmico en la dirección x
 k : conductividad térmica
 ΔT : diferencia finita de temperatura
 Δx : separación finita entre dos puntos
 M : masa (dimensión)
 L : longitud (dimensión)
 θ : tiempo (dimensión)
 T : temperatura (dimensión)
 d : diámetro molecular
 χ : constante de Boltzmann
 m : masa por molécula de medio gaseoso
 σ, Ω_k : parámetros de Lennard-Jones
 M : peso molecular
 k_r : conductividad térmica reducida
 k_c : conductividad térmica en el punto crítico
 T_r, P_r : temperatura y presión reducidas
 μ : viscosidad
 $\overline{C_p}$: capacidad calorífica molar a presión constante

$\overline{C_v}$: capacidad calorífica molar a volumen constante

x_i : fracción molar del componente i

C : capacidad calorífica molecular

v_s : velocidad sónica para un fluido dado

k^* : función de conductividad térmica reducida

k^0 : conductividad térmica a presión atmosférica y una temperatura dada

ρ : densidad

$\widehat{C_p}$: capacidad calorífica a presión constante por unidad de masa

α : difusividad térmica

En el breve análisis para el mecanismo de conducción de calor hecho en la sección de generalidades, se llegó a la ecuación (1) , que es la Ecuación de Fourier :

$$\frac{Q_x}{A t} = q_x = - k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde q_x se conoce como el Flux. Térmico en la dirección x .Se introdujo en esta ecuación la constante de proporcionalidad k , que es la CONDUCTIVIDAD TÉRMICA del material de que se trate. De la ecuación de Fourier se tiene :

$$k = \frac{Q \Delta x}{A t \Delta T}$$

de aquí podemos deducir las dimensiones y unidades de k :

$$k : \frac{M L^2 L}{\theta^2 L^2 \theta T} = \frac{M L}{\theta^3 T}$$

En el sistema Internacional de Unidades se tiene :

$$k : \frac{\text{Joule m}}{\text{seg m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} = \frac{\text{Watt}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

y en el sistema FPS se tendrá :

$$k : \frac{\text{BTU}}{\text{ft seg } ^\circ\text{F}}$$

estas unidades concuerdan con las mencionadas antes.

La ecuación (1) también se puede escribir como :

$$\frac{Q}{t} = - k A \frac{dT}{dx}$$

si podemos separar variables y evaluar dx , se tendrá :

$$\frac{Q}{t} = - \frac{k A}{L} \Delta T \quad (5)$$

donde el término $\frac{k A}{L}$ se denomina CONDUCTANZA TÉRMICA y su recíproco es la RESISTENCIA (6) .

Expresando el flujo de calor en función de la RESISTENCIA (R) se tiene :

$$\frac{Q}{t} = - \frac{\Delta T}{R}$$

a). Conductividad térmica de gases. (A BAJA DENSIDAD)

En los gases, la conductividad térmica aumenta con la temperatura. Esto se debe al aumento en la excitación de las moléculas de gas a temperaturas elevadas, con lo que aumenta la frecuencia de contacto entre ellas, incrementándose también su interacción.

Se han calculado valores teóricos de conductividad térmica de gases monoatómicos diluidos a partir de la ecuación siguiente, para lo cual se considera la molécula de gas como una esfera rígida. La ecuación es :

$$k = \frac{1}{\pi^{3/2} d^2} \sqrt{\frac{\lambda^3 T}{m}} \quad (7)$$

donde :

d = diámetro molecular

λ = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta

m = masa por molécula de medio gaseoso

Esta ecuación nos indica que k es una función de $T^{0.5}$ y es independiente de la presión. Esta ecuación nos da una aproximación aceptable y ha sido probada con buenos resultados con valores de hasta aproximadamente 10 atm. para la mayoría de los gases.

Una ecuación que es más precisa para calcular la conductividad térmica es la de Chapman-Enskog :

$$k = \frac{1.9891 \times 10^{-4} \sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \quad (8)$$

donde :

σ, Ω_k = parámetros de Lennard-Jones

M = peso molecular

T = temperatura absoluta

-- Gases Poliatómicos a baja densidad. (R 4).

Para los gases poliatómicos se deben considerar las energías rotacional y vibracional, además de la energía cinética de traslación del centro de masa. Al chocar las moléculas entre sí, intercambian estas formas de energía.

Para gases poliatómicos a baja densidad, Eucken desarrolló la fórmula :

$$(9) \quad k = \left(\bar{C}_p + \frac{5}{4} \frac{R}{M} \right) \mu \quad \begin{array}{l} \text{Gases} \\ \text{Poliatómicos} \end{array}$$

donde :

\bar{C}_p : capacidad calorífica molar a presión constante

R : constante de los gases

M : peso molecular

μ : viscosidad

En ésta última ecuación se incluye la fórmula monoatómica, donde $\bar{C}_p = \frac{5}{2} \left(\frac{R}{M} \right)$:

$$(10) \quad k = \frac{15}{4} \left(\frac{R}{M} \right) \mu = \frac{5}{2} \bar{C}_p \mu \quad \begin{array}{l} \text{Gases} \\ \text{Monoatómicos} \end{array}$$

-- Mezclas de gases a baja densidad.

La conductividad térmica de mezclas de gases a baja densidad se puede estimar por medio de la ecuación :

$$k_{\text{mezcla}} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i k_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}} \quad (11)$$

donde :

x_i : fracciones molares

k_i : conductividades térmicas de los componentes puros

$$\bar{E}_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \frac{M_j^{1/4}}{M_i} \right]^2$$

Los valores considerados de μ y k son valores a baja densidad a la temperatura dada. Si no se tienen datos de viscosidad disponibles, pueden ser estimados de k y \bar{C}_p por medio de la ecuación (9). Al hacer comparaciones con datos experimentales, se han encontrado una desviación promedio de aproximadamente 4 % para mezclas de gases poliatómicos no polares, como CH_4 , O_2 , N_2 , C_2H_2 y CO (ver R4).

b). Conductividad Térmica de líquidos. (R 4).

Bridgman propuso una teoría de transporte para líquidos puros en la cual se supone que las moléculas están arregladas en una estructura cúbica con un espaciamiento de centro a centro de cada cara dado por: $(\bar{V}/N)^{1/3}$, donde \bar{V}/N es el volumen ocupado por cada molécula. Además, supuso que la energía se transfería de un plano al siguiente a velocidad sónica v_s para el fluido dado .

Bridgman llegó a la ecuación :

$$k = 2.30 \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3} C v_s$$

que presenta buena concordancia con datos experimentales para líquidos poliatómicos, aunque el coeficiente 2.30 presenta - todavía mayor concordancia, con lo que la ecuación queda :

$$k = 2.30 \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3} C v_s \quad (12 a)$$

donde :

C : capacidad calorífica molecular

La velocidad del sonido de baja frecuencia v_s está dada por :

$$v_s = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T}$$

$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T$ se obtiene de mediciones de compresibilidad isotérmica ó de una ecuación de estado.

$\frac{C_p}{C_v}$ es casi igual a la unidad para líquidos, excepto cerca del punto crítico.

Dependencia de La Temperatura y La Presión de La Conductividad Térmica en Gases y Líquidos .

A continuación se presenta una gráfica de Conductividad Térmica Reducida (k_r), Figura 5, que es el cociente de la Conductividad Térmica a las condiciones dadas entre el valor de esa propiedad en el punto crítico :

$$k_r = \frac{k}{k_c}$$

En la gráfica mencionada, se presenta k_r en función de la temperatura y la presión reducidas (T_r, P_r). También se observa que la conductividad térmica de un gas se aproxima a una función límite de la temperatura a presiones bajas. Para la mayoría de los gases, ese límite se alcanza a una atmósfera de presión. Las conductividades térmicas de gases a baja densidad aumentan con la temperatura, mientras que -- las conductividades térmicas de la mayoría de los líquidos -- disminuyen al aumentar la temperatura. Para los líquidos esta correlación es menos confiable que en la región de los gases.

Como es muy raro contar con datos experimentales de conductividad térmica en el punto crítico (k_c), para tener este dato se tienen dos caminos a seguir :

i. Conocida la Conductividad Térmica (k) a condiciones de Temperatura y presión de preferencia cercanas a las condiciones a las que se va a predecir k , se puede leer k_r de la Figura 5 y calcular $k_c = k / k_r$.

ii. Se puede hacer una primera estimación de un valor en la región de baja densidad con la ayuda de ecuaciones como - las comprendidas entre la (7) y la (11), según el caso que corresponda.

Presentamos a continuación una tabla de valores de k_c - obtenidos de la manera descrita en i. (Tabla 1).

Tabla 1
Conductividad Térmica Crítica de diferentes
sustancias .(R 4).

Sustancia	k_c ($\text{cal cm}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \times 10^6$)
Gases nobles:	
Neón	70.2
Argón	71.0
Kriptón	40.4
Xenón	40.2
Sustancias poliatómicas:	
Aire	90.4
Nitrógeno	80.1
Oxígeno	100.5
CO ₂	132.0
CO	61.5
NO	118.2
N ₂ O	131.0
SO ₂	94.6
Br ₂	97.0
Hidrocarburos :	
CH ₄	132.0

Tabla I (Continuación)

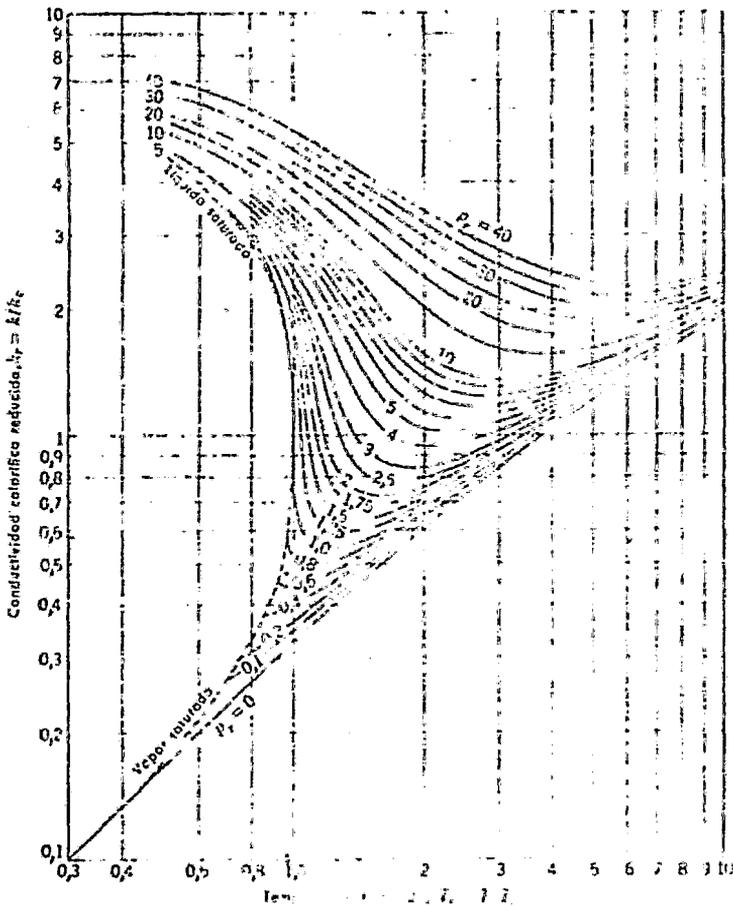
Hidrocarburos :

$$k_c \text{ (cal seg}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \text{) } \times 10^6$$



203.0

Figura 5. Gráfica de Conductividad Térmica Reducida (k_T) en función de la Temperatura y Presión Reducidas (T_r , P_r).



En la siguiente gráfica (Figura 6), se presenta la --
 Función de Conductividad Térmica Reducida (k^*), que es el
 cociente entre la conductividad térmica a las condiciones de
 temperatura y presión dadas y el valor para esa propiedad a
 presión atmosférica y la misma temperatura :

$$k^* = \frac{k}{k^0}$$

Esta gráfica es más útil que la anterior, puesto que es
 más difícil, en la mayoría de los casos, conocer k_c que k^0 -
 (Conductividad térmica a presión atmosférica y a la tempera-
 tura dada). Los valores obtenidos de estas gráficas para -
 gases poliatómicos, deberán considerarse sólo como aproxima-
 ciones, ya que tanto esta gráfica como la anterior son para
 gases monoatómicos .

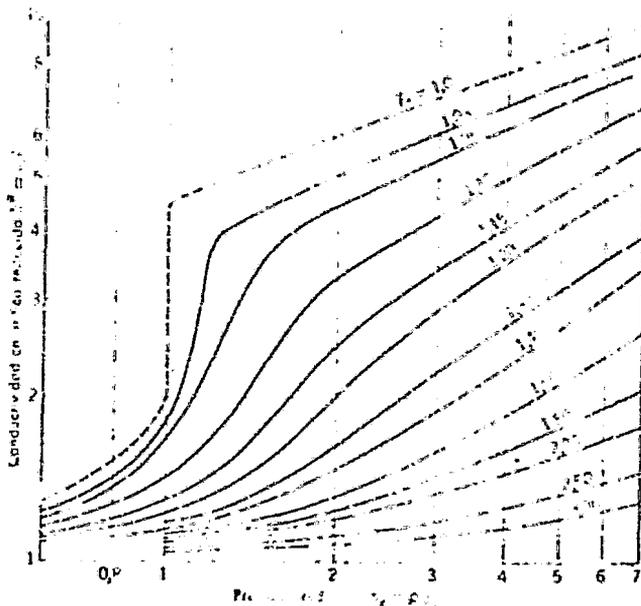


Figura 6. Gráfica de la Función de Conductividad
 Térmica Reducida(k^*) en función de la
 Temperatura y Presión Reducidas (T_r , P_r)

c. Conductividad Térmica de sólidos.

La conductividad térmica de los materiales sólidos depende de factores como el tamaño de poros, la fracción hueca, el fluido contenido en los poros, etc. La naturaleza de estos factores hace muy difícil la predicción de la conductividad térmica en estos materiales.

Para metales puros, la conductividad térmica k y la conductividad eléctrica k_e están relacionadas, aproximadamente por :

$$\frac{k}{k_e T} = L = \text{constante} \quad (13)$$

que es la Ecuación de Wiedemann, Franz y Lorenz.

El Número de Lorenz, L , es aproximadamente entre $22 - 29 \times 10^{-9} \text{ Volt}^2 (\text{°K})^{-2}$ para metales puros a 0°C y cambia poco para temperaturas superiores a 0°C , siendo característicos los incrementos de $10 - 30 \%$ por cada 1000°C . A temperaturas muy bajas (-269.4°C para el Mercurio) los metales se vuelven superconductores de la electricidad, pero no del calor, con lo cual L varía fuertemente en la región de superconducción. Esta ecuación es de utilidad limitada para aleaciones, puesto que L varía con la composición.

En la Tabla 2 se presentan valores de Conductividad Térmica para líquidos y sólidos. Se debe mencionar en forma especial el caso de la madera, en la que el valor de k para el roble difiere sustancialmente por un factor de 2, para las direcciones paralela y normal al hilo de la madera. Es por esto que la madera es un buen ejemplo de un MATERIAL ANISOTROPO, que es aquel cuyas propiedades cambian en las diferentes direcciones. Un medio cuyas propiedades no cambian según la dirección se llama ISOTROPO.

Tabla 2

DATOS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA
LIQUIDOS Y SOLIDOS (R5 ; R6).

Material	68°F	k		(otros)
		hr	ft °F	
<u>Metales:</u>				
Aluminio	132	132	133	
Cobre	223	219	213	
Oro	165	170	172	
Hierro	42.3	39.0	31.5	
Plomo	20.3	19.3	17.2	
Magnesio	99.5	96.8	91.4	
Niquel	53.7	47.7	30.9	
Estañó	36	34	-	
Zinc	61	63	58	
<u>Aleaciones</u>				
Latón	61.8	73.9	85.3	
Constantan(o) (60% Cu, 40% Ni)	13.1	15.4	--	
Acero inoxidable	9.4	10.0	13	
<u>Materiales estructurales y de construcción</u>				
Asfalto	0.43	--	--	
Concreto	--	0.67	--	
Ladrillo común	0.40	--	--	
Corcho	0.025	--	--	
Tierra de diato- máceas, en polvo	0.03	--	--	
<u>Materiales Aislantes</u>				
Asbastro corrugado (4 pliegues por in.)	--	--	--	0.05(100)
	--	--	--	0.055(200)
	--	--	--	0.059(300)
Fieltro (20 laminaciones por plg)	--	--	--	0.045(100)
	--	--	--	0.055(200)
	--	--	--	0.063(300)

Tabla 2 (Continuación)

Material	Temperatura ($^{\circ}F$)	k
<u>Materiales Aislantes</u>		
Tabla de asbes- to-cemento	68	0.43
Corcho molido	50	0.025
Fieltro de lana	20	0.05
Lana de vidrio (1.5 lb/pie ³)	75	0.022
Lana mineral (10 lb/pie ³)	90	0.023
Lana mineral poco comprimi- da.	300	0.039
	500	0.050
Magnesia 85 %	100	0.039
	200	0.041
	300	0.043
	400	0.046
Virutas de madera	75	0.034

Nota.- Los números encerrados entre paréntesis corresponden a temperaturas en $^{\circ}F$, para los datos de la página anterior. Los datos de k de la presente hoja están en las mismas unidades que los de la anterior.

D I F U S I V I D A D T É R M I C A

Este es un término que se usa y encuentra frecuentemente en la literatura relacionada con la transferencia de calor .

La Ley de Fourier también se escribe :

$$q_x = - \alpha \frac{d}{dx} (\rho \hat{C}_p T)$$

donde :

$\rho \hat{C}_p$ permanece constante

$$\alpha = \text{Difusividad Térmica del sistema} = \frac{k}{\rho C_p}$$

Las unidades de α son cm^2/seg ó ft^2/hr .

Esta constante nos permite conocer la cantidad de calor que se difunde a través de un medio dado. Cuando se expon una mezcla a un gradiente de temperatura, se va a tener una separación parcial de los componentes de la mezcla, debido a este principio.

En los sólidos, la difusión térmica es extremadamente lenta, como los procesos difusionales en sólidos, siendo éste el motivo por el cual no se vislumbra una aplicación de éstos procesos a la separación de mezclas sólidas.

Los experimentos realizados para la separación de mezclas líquidas y gaseosas por difusión térmica se han efectuado tanto en equipos formados por una sola etapa, como en otros constituidos por varias etapas sucesivas, o sea, columnas o cascadas.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se llevó a cabo la separación de isótopos de uranio a partir de una mezcla líquida empleando 2100 columnas de difusión térmica de 15 m. de altura cada una en Oak Ridge, Estados Unidos .

En la actualidad se usan cascadas para el enriquecimiento de Kr^{85} y O^{17} y para la separación de los isótopos del Helio, Neón, Argón, Cri.ón, Xenón y Carbón .

C A P I T U L O I I I

A I S L A N T E S

Un material aislante es aquel que presenta una conductividad térmica baja. Los materiales aislantes muestran una dependencia con la densidad ejemplificada - en la gráfica siguiente, Figura 7 (R 5).

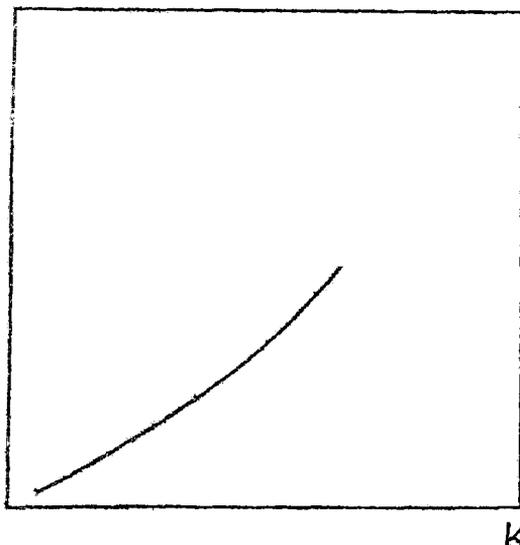


Figura 7. Relación entre la conductividad térmica (k) y la densidad (ρ) de materiales aislantes .

La dependencia observada se debe al hecho de que los materiales aislantes de menor densidad tienen una mayor fracción hueca, donde hay gases ocluidos (aire, nitrógeno , --- oxígeno, etc.) que tienen una conductividad térmica aún menor que el resto del material, por lo que el calor transferido va disminuyendo a lo largo de la dirección de flujo de calor. A continuación se presentan datos para la perlita expandida, conteniendo nitrógeno en sus intersticios, tabla 3.

Tabla No. 3

Datos para perlita expandida con nitrógeno intersticial (Ver Referencia 6) .

Densidad ($\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$)	$k \times 10^4$ ($\frac{\text{BTU}}{\text{hr ft } ^\circ\text{R}}$)
3.7	107
6.2	192
8.1	188
8.7	202

Analizando los datos anteriores podemos pensar en que al tener un aislante bueno, dicho material será muy frágil. Sin embargo, un aislante requiere de un soporte mecánico, con aglutinantes que le den consistencia, Como ya se mencionó anteriormente en este capítulo, en los aislantes se presentan pequeñas celdas con algún gas y los aglutinantes permitirán impartirles una cierta resistencia a pruebas mecánicas, aunque también en muchos casos el aglutinante es el que va a determinar y limitar la aplicación del aislante.

Cuando se tienen aplicaciones con temperaturas superiores a los 1 000 °C, se habla de MATERIALES REFRACTARIOS , que deben ser estables a altas temperaturas, así como resistentes a la escoriación, abrasión, deformación, de alto punto de fusión y baja conductividad térmica. Por las características mencionadas, estos materiales son más densos y su conductividad térmica no es tan baja como en el caso de los anteriores .

CLASIFICACIONES DE LOS MATERIALES AISLANTES

A continuación se presentan las clasificaciones de los aislantes :

- i.) según el servicio de que se trate
- ii.) según sus características físicas

CLASIFICACION SEGUN EL SERVICIO.

Los materiales aislantes se clasifican de la manera siguiente, dependiendo del servicio; se dan además, los rangos aproximados de temperatura .

Aislamientos	}	Materiales de alta temperatura (de 50°C hacia arriba)
		Materiales de baja temperatura (de 00°C a $- 20^{\circ}\text{C}$)
		Materiales criogénicos (de $- 20^{\circ}\text{C}$ hacia abajo)

CLASIFICACION SEGUN SUS CARACTERISTICAS FISICAS.

De acuerdo a sus características físicas, los materiales aislantes pueden clasificarse como sigue:

Materiales Aislantes	}	a) Granulares	}	Silicato de calcio
				Vermiculita exfoliada
				tierras diatomáceas con silicato de sodio .
		b) Fibrosos	}	Fibra de vidrio
				Lana mineral
c) Espumosos	}	Poliestireno		
		Poliuretano		
d) Monolíticos	}	Cementos de unión y acabados		
		Masticos		
e) Reflectivos		Superficies pulidas metálicas		

a) Granulares.- Se presentan en placas o preformados rígidos, para lo cual necesitan algún aglutinante o fibras de refuerzo.

Silicato de calcio. Tiene como fibras de refuerzo asbesto amozite, es de estructura porosa e insoluble en agua. Tiene buena resistencia química y a la compresión. Su densidad promedio es de 1.5 g/cm^3 y es el aislante -

granular más empleado.

Verniculita exfoliada.- Se usa mezclada en la proporción adecuada con aglutinante bajo la forma de cemento refractario aislante seco o en pasta.

Tierras diatomáceas con silicato de sodio.- Es soluble en agua, pero se usa para preparar cemento refractario - aislante, mezclándolo con un aglutinante resistente - al calor y al agua.

b) Fibrosos.- Se pueden fabricar rígidos, semirígidos y flexibles, siendo su limitante principal la temperatura de operación, ya que los materiales aglutinantes empleados se queman a temperaturas mayores a las que especifican los fabricantes. Algunos de ellos y sus características principales son :

Fibra de vidrio.- Se obtiene a partir de arena fundida, teniéndose gran variedad de productos dependiendo del uso a que se destine.

Lana mineral.- Se obtiene a partir de escoria metálica fundida. Se presenta como colchonetas armadas, placas y a granel .

c) Espumosos.- Son materiales producto de una reacción química con freones (fluorocarbonos) o CO_2 como espumador y monómero de estireno como inhibidor. Ejemplos de ellos son el poliestireno y el poliuretano, siendo más usado éste último .

Para el aislamiento de tanques se ha encontrado el poliuretano especialmente útil y barato, puesto que el trabajo puede fácilmente ser realizado en campo, con la consiguiente reducción de costos. Sus características, como por ejemplo la conductividad térmica, lo hacen inmejorable.

d) Monolíticos.- Se presentan en forma de cementos y mortares que se usan para sellar uniones y en partes difíciles de aislar, así como también forman el acabado de los sistemas de aislamiento. El fabricante, por lo general, recomienda sus propios monolíticos.

e) Reflectivos.- Son aislantes muy novedosos, actualmente utilizados sólo en reactores nucleares y cohetes espaciales. -

Los aislantes reflectivos consisten de enflautados de diferentes diseños, de láminas pulidas que reflejan el calor, con lo que se obtienen conductividades térmicas muy bajas.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE AISLANTES

Se debe considerar las necesidades y características de los equipos e instalaciones por aislar para escoger el aislante adecuado. Se buscará tener la máxima eficiencia con el mínimo costo posible.

Para lograr tener una operación eficiente con la coste --
guiente economía, se deberá tener los aislamientos en la pro-
porción adecuada, lo que implica un diseño adecuado.

Para hacer esto se requiere un arduo trabajo de optimiza-
ción, en el que se deben analizar los siguientes factores :

- 1) Propiedades físicas.
 - a) Conductividad térmica
 - b) Densidad
 - c) Resistencia a la compresión, a la tensión e impacto
 - d) Dureza
 - e) Combustibilidad y resistencia al fuego
 - f) Estabilidad dimensional
 - g) Temperatura límite de trabajo
- 2) Propiedades Químicas.
 - a) Composición Química
 - b) Reacciones Químicas
 - c) Naturaleza Corrosiva
- 3) Características de Instalación.
 - a) Toxicidad (desprendimiento de gases)
 - b) Acción sobre la piel
 - c) Forma de manejo, almacenaje y colocación
 - d) Saber si favorece la proliferación de microorganismos
- 4) Características Económicas.
 - a) Costo inicial
 - b) Costo de mano de obra
 - c) Costo de mantenimiento
 - d) Vida útil promedio
 - e) Eficiencia de aislamiento

Colocación de aislantes .

Se procederá según el servicio sea de alta o de baja temperatura. (E5).

Las fases ó pasos a seguir en cada caso son :

I. SERVICIOS CALIENTES .

- | | |
|-----------------------------|-----------------|
| a) Preliminares | 1.- Tubería |
| b) Instalación del Aislante | 2.- Equipo |
| c). Instalación del acabado | 1.- Metálico |
| | 2.- No metálico |

II. SERVICIOS FRIOS .

- | | |
|------------------------------------|-----------------|
| a). Preliminares | |
| b) Instalación del aislante. | 1.- Tubería |
| | 2.- Equipo |
| c) Instalación de barrera de vapor | |
| | 1.- Metálico |
| d) Instalación de acabado | 2.- No metálico |

En AMBOS CASOS (SERVICIOS CALIENTES O FRIOS), los pasos Preliminares son los mismos :

PRELIMINARES

- 1.- Verificar que las tuberías o los equipos estén debidamente instalados y probados.
- 2.- Efectuar la limpieza de la superficie por aislar, ya sea mecánica (chorro de arena, cepillo, etc.) ó química (con solventes o removedores).
- 3.- Aplicar pintura anticorrosiva .

I. Servicios Calientes.

b.1. Instalación de aislante en tubería.

En el mercado, los fabricantes presentan un tipo de aislamiento preformado (medias cañas ó preformados de 4 ó 6 -- secciones), siendo éstos adecuados para diámetros de hasta

12 pulgadas. Además, las medias cañas se recomiendan para tuberías delgadas y los preformados poliseccionados para las tuberías más gruesas. Las secciones de preformados tienen 90 cm. de longitud.

Tuberías horizontales.- Se colocan los preformados a presión sobre la tubería, cuatrapiando las uniones entre las secciones del aislante, como se muestra en la Figura 8, sujetando las secciones por medio de cinchos de flajo o alambre con las puntas clavadas sobre el aislante, como se indica en la Figura 9 .

Tuberías verticales.- Se ponen soportes, si la tubería no tiene relevado de esfuerzos, éstos se pueden puntear con soldadura; de lo contrario, se tiene que sujetar con aprietes para preformado .

Venas de vapor.- Cuando las líneas lleven venas de vapor, ya sea rectas o como serpiente, el diámetro interior del preformado se considerará el formado por el conjunto línea-vena de vapor, colocando un relleno algodonoso RW - 4200, como se muestra en la figura 10 . En caso de tener un aislante flexible se apretará con cinchos, como se muestra en la Figura 11 .

Juntas de expansión.- Cuando el metal de la línea o tubería se calienta, éste se estira, con lo que ocasiona rompimiento del aislante, por discontinuidad del material. Esto puede evitarse dejando una separación de 2 pulgadas cada 2 ó 3 metros con temperaturas de 260°C (500°F) y cada 5 ó 6 metros a temperaturas alrededor de 140°C (300°F). Esa separación se rellena con fibra algodonosa RW-4200 que sirve como muelle en las expansiones o contracciones de la tubería.

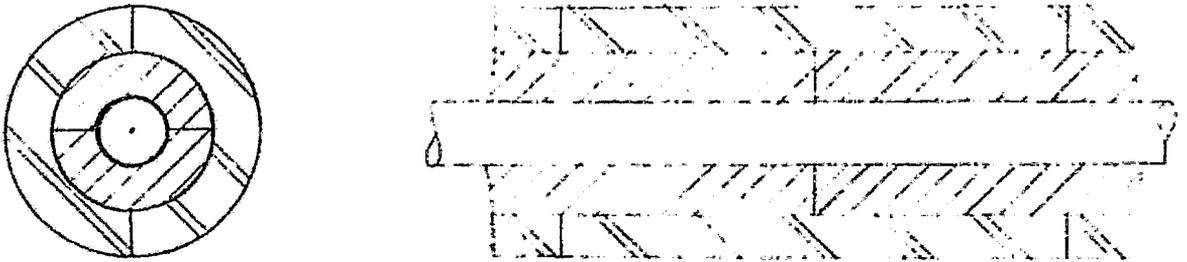


Figura 8. Cuatrapeo de secciones de aislante sobre una tubería .

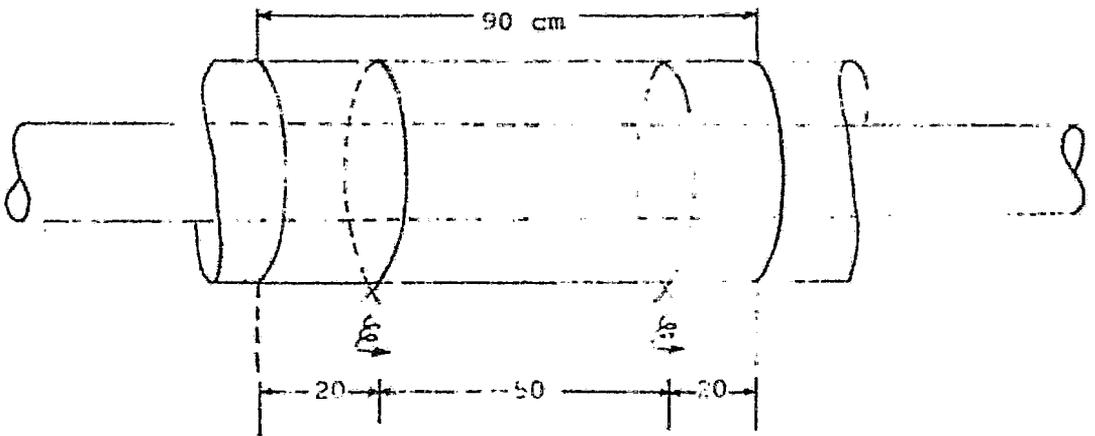


Figura 9 . Separación de cirnos de sujeción de secciones de aislamiento térmico.

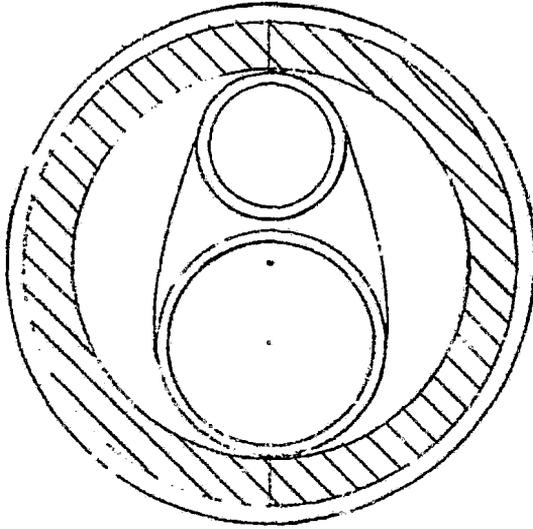


Figura 10. Aislamiento en una línea con vena de vapor usando medias cañas.

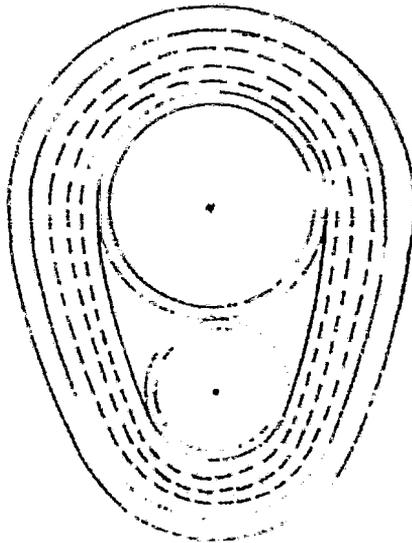


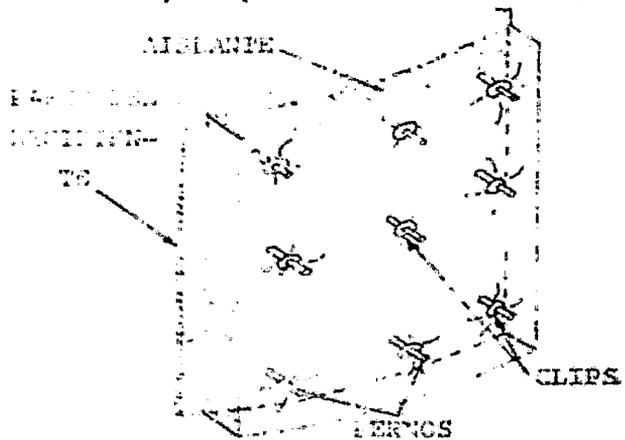
Figura 11. Aislamiento de una línea con vena de vapor usando un aislante flexible.

Codos y accesorios.- Se puede usar pedazos pequeños de preformado, ya sea seccionado o ajustado para dar la forma requerida. Otra opción consiste - en el empleo de fibra algodonosa o colchoneta, armada con malla de mallinero y con costuras - de alambre de calibre 16 .

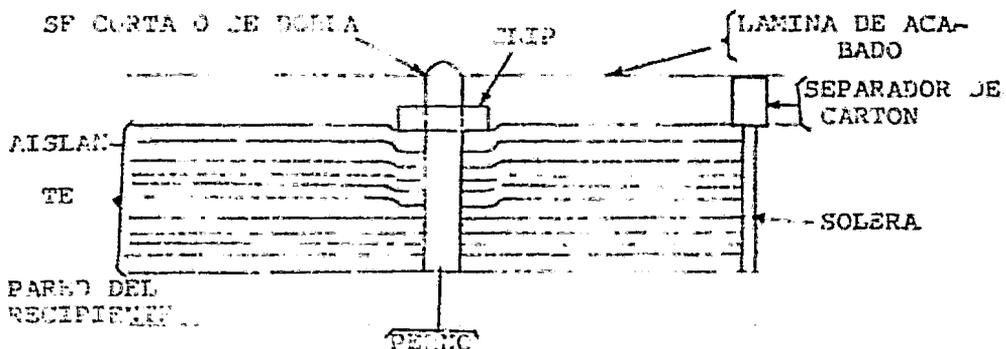
2. b2. Instalación en equipo .

Si el equipo tiene un rango de esfuerzos y con temperaturas de operación de hasta 300°C , se puede usar colchonetas o placas preformadas,

para lo cual se van a soldar pernos a la red del equipo (se recomienda 6 pernos - por m^2 , R5) y se colgará el aislamiento sobre los pernos, con clips a presión en las juntas, como se ilustra en la Figura 13 . También se recomienda rechaflar los bloques, con objeto de romper la continuidad y evitar puntos calientes.



a) Instalación de un metro cuadrado de aislamiento de un recipiente



b) Corte del aislamiento de un recipiente o equipo.

Figura 13. Suspensión fija de aislamiento en recipientes.

Cuando se tienen temperaturas mayores de 260°C o cuando el equipo tiene relevado de esfuerzos, se deberá hacer una instalación de suspensión flotante (ver Fig. 13), llamada JAULA DE PERICO , que se instala como sigue :

- 1.- Se hace un aro de diámetro un poco mayor que el recipiente a aislar con alamborón y una cámara de bicicleta .
- 2.- Empezando por la parte superior se coloca el aro en el recipiente y estirando la cámara se coloca la primera placa de aislante, efectuando la misma operación hasta cubrir el desarrollo del recipiente (si es fibra de vidrio, la unión se hace presionando una placa -- con otra, cuando es otro aislante se necesita un material adherente para evitar puntas frías) ; el aislante se junta fuertemente al recipiente -- con flejes o cinchos, permitiendo desplazar el aro para aislar la sección siguiente. Los flejes se colocan uno cada 30 cm. (aprox. 1 pie) de longitud .
- 3.- Para aislar las tapas es necesario instalar en cada extremo del recipiente unos arillos de alamborón de manera que sobre ellos se puedan tensar los flejes que sujetan -- las placas de aislante a la tapa. Final--

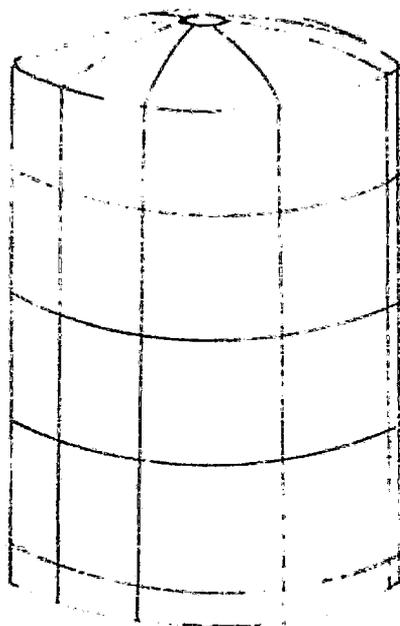


Figura 13.- Sistema de suspensión flotante o Jaula de Perico.

mente se ponen flejes entre los anillos de alambroñ para darle un armado total a la instalación.

Tanto en tuberías como en recipientes, todos los soportes y patas son puntas de fuga de calor, por lo que es necesario aislarlos. Para las TUBERIAS se aísla 2 pulgadas a partir de la superficie de aislamiento (para altas temperaturas) y en RECIPIENTES 2, 3 ó más pulgadas, dependiendo de la diferencia de temperatura con el medio ambiente .

INSTALACION DEL ACABADO EN SERVICIOS CALIENTES

--- Acabados Metálicos .

Los acabados metálicos cubren las funciones de protección de la intemperie y al esfuerzo mecánico, además de darle una apariencia agradable al área de trabajo. Se puede emplear lámina de Aluminic, galvanizada o de acero inoxidable del calibre adecuado (ver Referencias 7, R7). La lámina se corta al desarrollo de la superficie del aislamiento más 2 - pulgadas para traslape; se sujetan con flejes o pijas del mismo material de la chaqueta para evitar corrosión galvánica. Los remaches no son recomendables, por caros y porque al tener que darle mantenimiento al equipo se tiene que romper la lámina.

Cuando el aislante es en forma de colchoneta (aislantes flexibles), se emplea un separador entre el soporte del aislante y el acabado para dejar independiente el acabado de la estructura del aislante, lo que se puede lograr con cemento monolítico ó cartón asfáltico de película seca de 1/4 ó 1/3 de pulgada de espesor (como se muestra en la Fig. 12 h).

El calibre de las láminas de acabado normalmente varía entre 26 y 30, aunque a veces también se usa el calibre 24.

--- Acabados No Metálicos .

Este tipo de acabado tiene menor presentación que el anterior y consiste generalmente de un mastic de tipo permea-

ble, de tal forma que permita la eliminación de la humedad contenida en el interior del aislante cuando el equipo se ponga en operación y la temperatura se eleve .

II.. Servicios Frios .

II b. Instalación de aislamiento en tuberías y recipientes a baja temperatura .

Se siguen los mismos lineamientos para la instalación del aislamiento, que en el caso de los servicios calientes, salvo que no se usa en este caso el sistema de pernos, siendo más recomendable el sistema flotante. Algunas otras recomendaciones son :

- No dejar el aislamiento de un día para otro expuesto a la intemperie. Esto se consigue instalando la BARRERA DE VAPOR simultáneamente y sellando la parte que no se unió con un trazo de dicha barrera.
- Se deben considerar la temperatura de la superficie exterior y la humedad del ambiente (por medio de la temperatura de rocío) para prever condensaciones de la humedad ambiental sobre la superficie, que ocasiona problemas de corrosión o encharcamiento.
- Contemplar y evaluar la posibilidad de emplear algún otro aislante para baja temperatura, como el poliestireno o los poliuretanos. Estos materiales presentan grandes ventajas, puesto que son materiales que pueden ser preparados y aplicados fácil y rápidamente (por esprayado) en campo . Ver Referencia R8 .
- Las superficies de paredes de ladrillo requieren usualmente un repellado con cemento-mortero Portland , con acabado fino.
- Dependiendo del adhesivo a usar, puede requerirse una capa de primer, que se aplicará ya sea con pistola de aire o con brocha .

EL C. BARRERA DE VAPOR .

Es una película que se coloca sobre el aislamiento de baja temperatura para proteger el aislante, tanto de condiciones ambientales, como de esfuerzos mecánicos del interior y el exterior del mismo . Debe reunir dos características básicas indispensables :

- a). Permeancia menor de 2.5 pulgadas de permeancia (pulgadas-perm) .

Esta propiedad se determina por medio de la prueba - ASTM E96 - 53 T . Una pulgada de permeancia es igual a un -- grano (0.06480 gramos) por hora que pasa a través de un -- pie cuadrado, con un espesor de una pulgada,, bajo una presión parcial de vapor de 1 pulgada de mercurio .

- b). Continuidad o hermetismo.

Esta propiedad es muy importante, puesta que un orificio es suficiente para que la humedad penetre y después se destruya el aislamiento, debido a los cambios de fase del agua que penetra .

Hay barreras de vapor prefabricadas y otras elaboradas en campo. Un tipo de barreras de vapor para tuberías prefabricadas, está formado por papel asfalto y hojas de aluminio, por lo que se debe tener cuidado de sellar las uniones para dar el hermetismo que se requiere .

Cuando la barrera de vapor se aplica con mastic en campo, (emulsión asfalto-aromática) se puede aplicar con liana o por aspersión,, como se muestra en la Figura 14.

Si la aplicación de la barrera de vapor no fué hecha convenientemente y se presentan poros u orificios en ella misma, esto será suficiente para destruir el aislante, puesto que - por ahí entrará humedad al aislante, el agua se condensará ó se congelará (si el servicio es criogénico), ocupando las cavidades del poro del aislante, en vez del aire u otro gas, con lo cual se modifica sustancialmente la conductividad térmica del aislante, perdiendo su carácter de aislante. En la

nueva interfase agua-aire (medio ambiente) que se forme, - se someterá el aislante a esfuerzos mecánicos de corte originados por el aumento de presión en el interior del aislante, por el cambio de fase de la humedad ocluida .

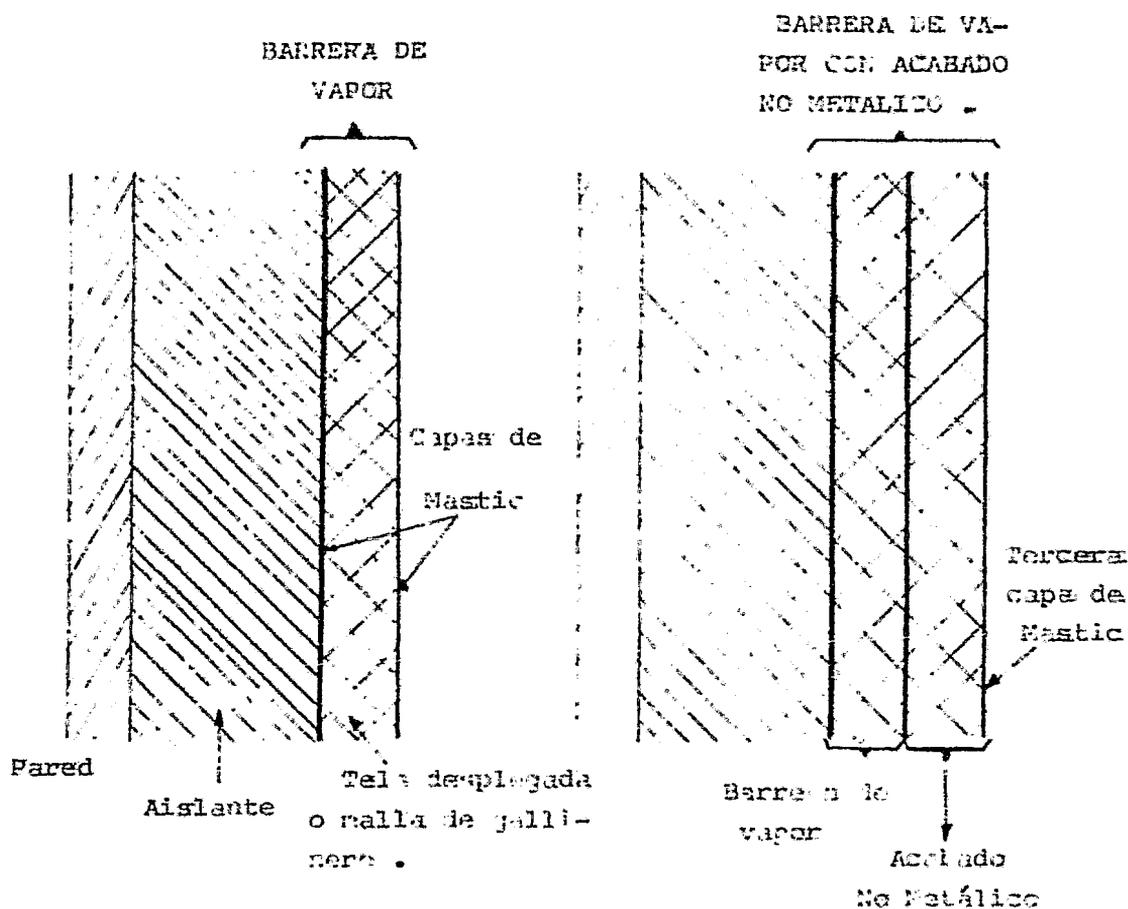


Figura 14. Barreras de vapor aplicadas en campo .

II.d.1. Acabado Metálico para bajas temperaturas.

Para estos acabados se tienen las mismas características y es aplicable lo mencionado bajo el título correspondiente en SERVICIOS CALIENTES .

II.d.2. Acabado No Metálico para bajas temperaturas.

Cuando ya se tiene definido el tipo de acabado que se va a aplicar y este es No Metálico, sobre la misma barrera de vapor se coloca una malla de gallinero adicional y otra capa de mastico de acabado, todo se aprecia en la Figura 14 o bien se aplica aislantastic sobre cristaflex ó glass-fak adicional como acabado .

A continuación se presenta un cuadro de tipos de acabados (R5).

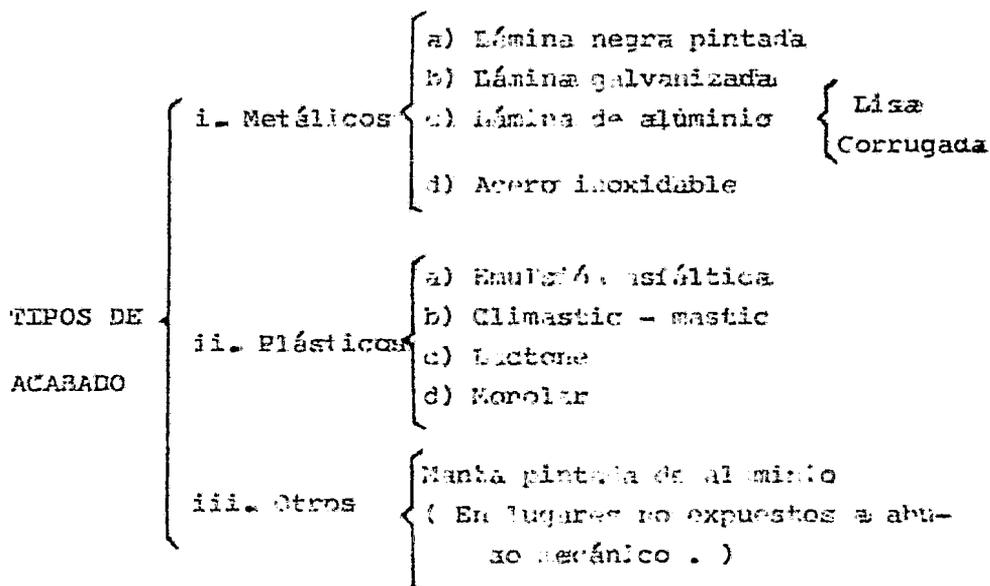


Tabla 4. Tipos de acabados para aislamientos .

Se observa que cuando el espesor del aislante aumenta, el costo de las pérdidas de calor disminuye, mientras el costo del aislamiento se incrementa, como se muestra en la Figura No. 15, donde se representan las diferentes curvas. El punto donde se tiene el mínimo para el costo total nos da el espesor óptimo del aislante.

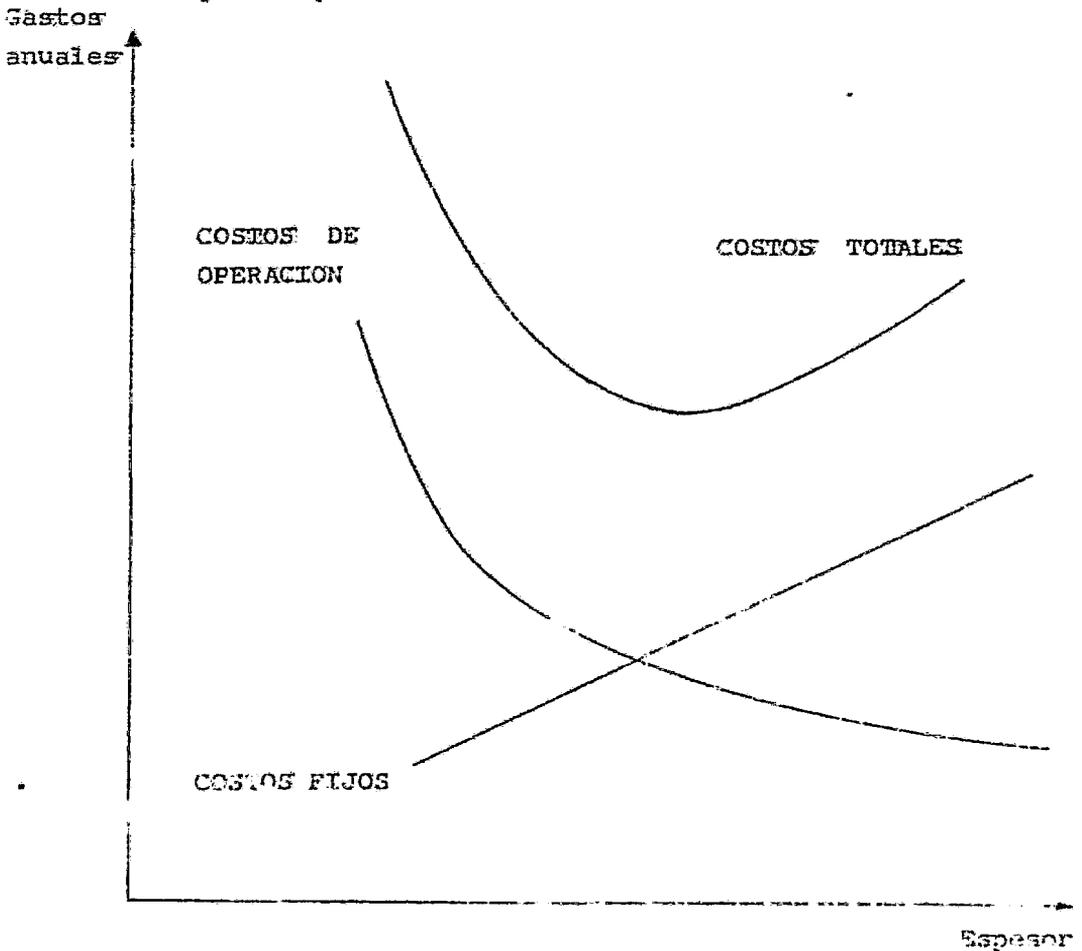


Figura 15. Determinación del espesor óptimo de aislante.

A continuación se explican las curvas que se representan en el gráfico.

sentadas y cómo obtenerlas en la práctica.

- i) Costos Fijos.- A medida que la capa o capas de aislante sean de mayor espesor, la inversión que sea necesario hacer se incrementará. La tendencia de esta curva es ascendente (se incrementa al aumentar el espesor del aislamiento).
- ii) Costos de Operación.- Conforme aumenta el espesor del aislante para un equipo dado, la energía disipada al medio ambiente disminuirá y con ello el desembolso a realizar por concepto de la energía que se suministra; pero se encontrará que la curva tenderá a ser asintótica a un cierto valor, lo que significa que aunque aumentará mucho el espesor del aislante, se tendría una pequeña cantidad de energía disipada.
- iii) Costos Totales.- Es la curva resultante de sumar las dos anteriores y se observa que presenta un punto mínimo, que nos da el ESPESOR OPTIMO o ECONOMICO DE AISLANTE.

A lo antes mencionado hay que agregar aspectos económicos que son muy importantes como :

DETERMINACION DE COSTOS FIJOS Y DE OPERACION

COSTOS FIJOS .

Representan los desembolsos no repetitivos necesarios para obtener un bien o servicio, en este caso, el aislamiento; para conocerlos se usa la ecuación :

$$C. F. = P_a (1 + F) B$$

donde :

P_a = Inversión de adquisición del aislante. Es el precio que hay que pagar por él por unidad de espesor - considerado.

F = Factor que involucra los gastos de fletes, instalación, acabados y gastos indirectos como un porcentaje del costo del aislante. A continuación se detalla sobre la manera de obtener el valor de este factor.

F = Flete + M. de O. + M. Acab. + Imprev. + G. Ind.

Flete.- Puede tener gran variación dependiendo de la distancia entre el origen y destino del material y del medio de transporte. Considerando materiales mexicanos, se estima como valor seguro un 10% de Pa .

M. de O. - Corresponde a la mano de obra directa para instalar el sistema de aislamiento térmico. Un valor estimativo para este concepto puede ser un 20% de Pa .

M. Acab.- Se refiere a los materiales de acabado necesarios en el sistema. Este valor varía dependiendo de la superficie por aislar y del tipo de acabado que se desea aplicar. Un valor promedio del 40 % de Pa se considera satisfactorio para este renglón. Sin embargo, para un cálculo riguroso deberá considerarse cada caso.

Imprev.- Se va a considerar por concepto de IMPREVISIÓN un 5% de Pa. Este concepto pretende cubrir los posibles daños que el material sufre en su manejo y almacenaje .

G. Ind.- Son los gastos de mano de obra indirecta, como son la supervisión externa, viáticos, transporte de personal, etc. y sólo se consideran en grandes proyectos. Su valor es específico para cada caso.

E = Factor que involucra la amortización del capital (R) y el mantenimiento al equipo e línea aislada (M) .

$$E = R + M$$

M se considera un 1 % de la Inversión de Adquisición (Pa)

$$R = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-N}}$$

dónde :

r = interés capitalizable semestral o anualmente

n = número de períodos considerados para amortizar --
la inversión (semestres o años).

COSTOS DE OPERACION .

En este renglón se va a considerar el valor de la pérdida de calor que se tenga para cada espesor de aislante considerado. Al aumentar el espesor de aislante, se observa que el calor perdido disminuye. Esta disminución es rápida para las primeras capas de aislante y se hace asintótica puesto que hay una fracción pequeña de calor que pasa la capa de aislante.

Los COSTOS DE OPERACION se determinan a partir de la ecuación :

$$C. Op. = Q t_a N$$

para la cual tenemos :

Q = calor cedido por el sistema al medio ambiente
(MM BTU / hr) .

t_a = horas totales anuales de operación del equipo
por aislar (hr / año).

N = costo de la energía para una corriente de proceso (\$ / MM BTU aprovechados).

Para N se tiene :

$$N = A (1 + r')^n E_e$$

A = \$ / MM BTU liberados por el combustible

r' = % de incremento anual del costo de combustible (Ver Figura 17)

E_e = Factor de eficiencia del sistema

$$E_e = \frac{1}{\text{Eficiencia}}$$

A continuación se presenta la información necesaria para obtener los valores de A y la Eficiencia del sistema, aunque

para vapor, la eficiencia del sistema usado para generar el calor necesario para la(s) caldera(s) es de 0.85 . (R10)

Eficiencia Global, %

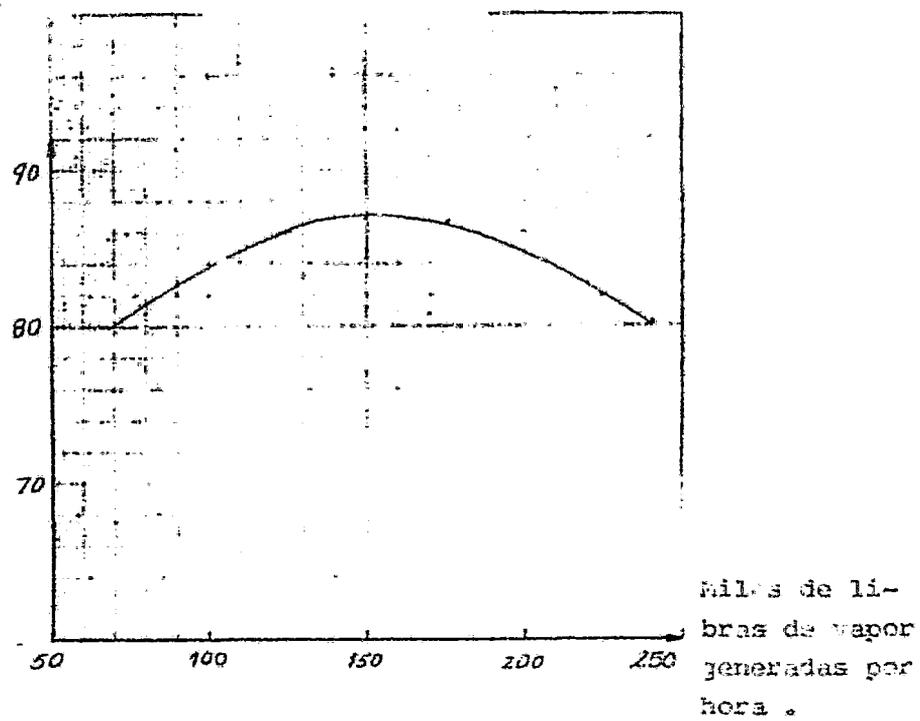
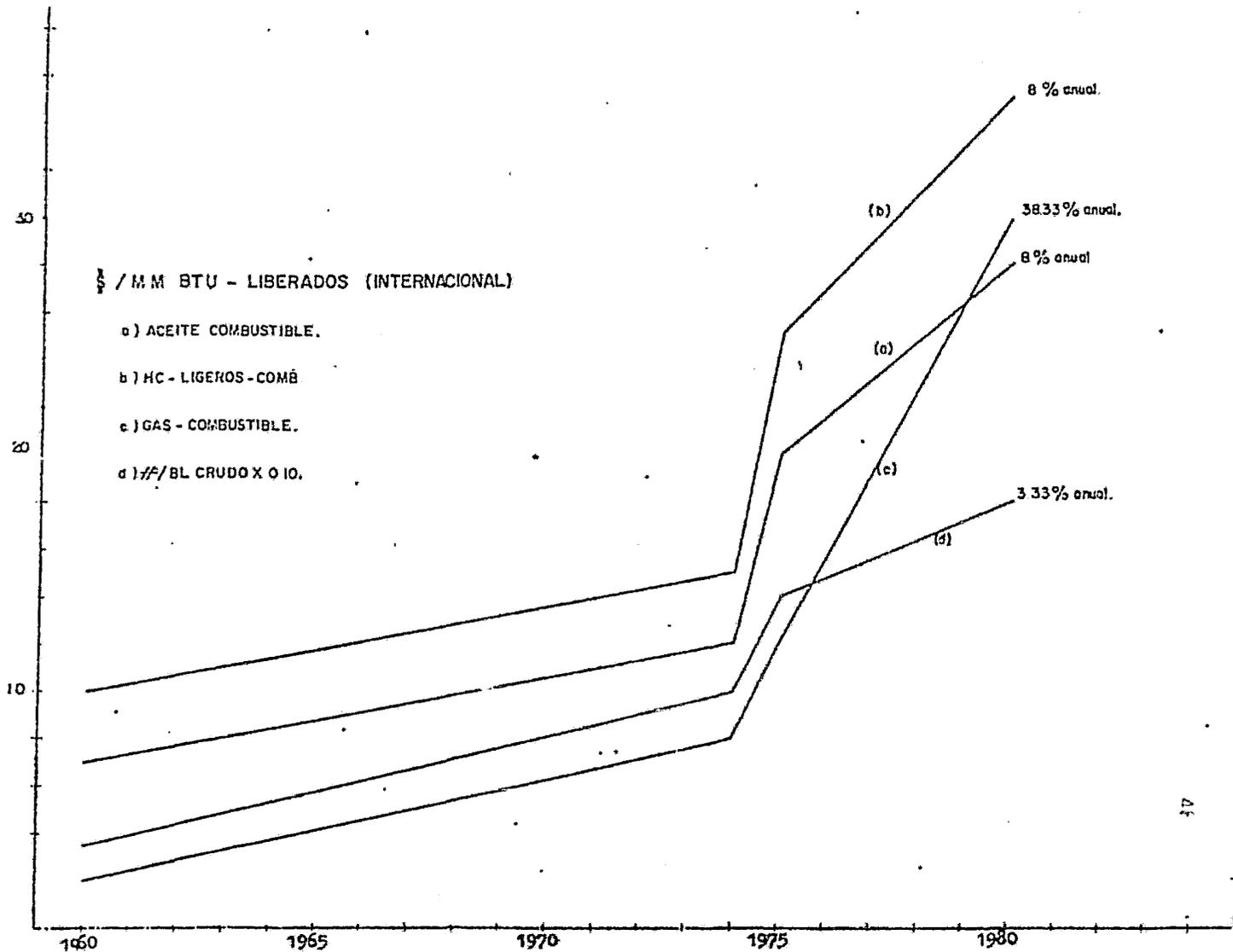


Figura 16.- Curva típica de eficiencia global para calderas (usando horno de carbón pulverizado).



CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para obtener conductividades térmicas (k) de aislantes se usó un aparato formado por :

- Tres tubos de 25 cm. de diámetro (diámetro nominal = 10 - pulgadas, cédula 10) y 27 cm. de longitud aislados, con entradas de vapor y agua de enfriamiento por la parte superior y salida con tubo recolector de condensados con vaso comunicante en la parte inferior .
- Los tubos están montados sobre una estructura hecha con fierro ángulo de 3.5" x 1/2" de ancho por 142.5 cm. de longitud y 99.0 cm. de altura .
- Para la detección y medición de la temperatura se cuenta - con dos puntos de termopar fierro-constantan insertados en el aislamiento de cada uno de los tubos antes mencionados y separados una distancia Δx . Uno de los termopares se encuentra junto a la pared del tubo y el otro en un punto más externo respecto al anterior .
- Los termopares están conectados a un selector de 12 puntos de termopar marca West y la temperatura en cada punto se conoce por medio de un indicador marca West con un rango de -- 0 - 200 °C y una precisión de 1 °C .

El tubo seleccionado para trabajar, designado con el número 3 , es el de la extrema derecha, visto el aparato de frente.

A este tubo se le añadió, como se advierte en la Figura 18, una válvula situada en la parte inferior, a la salida del tubo aislado, para poder controlar los condensados a considerar en un intervalo de tiempo dado . En la Figura 19 se presenta un dibujo más detallado del tubo recolector de condensados, - para el tubo usado.

SECUENCIA DE MODIFICACIONES HECHAS AL EQUIPO Y TRABAJO
DESARROLLADO .

1.- Como parte inicial de la tesis, se hizo un reconocimiento del equipo instalado (tubos aislados con recolectores de condensados y estructura) y se trató de recopilar la mayor información posible sobre el mismo. Se llevó a cabo la limpieza de las líneas y válvulas del equipo.

Simultáneamente se hizo el pedido de termopares e instrumentos necesarios para detectar la temperatura en el equipo.

2.- Se hizo la conexión de la línea de vapor, instalando las válvulas necesarias de admisión y purga.

3.- Se instaló el aislamiento necesario en las líneas de vapor y de agua de enfriamiento, en el caso de ésta última, por motivos de protección.

4.- Se hicieron pruebas con los termopares y el equipo de medición de temperatura. Se diseñó una caja para colocar este equipo.

5.- Se instalaron termómetros a la entrada del tubo aislado 3 y en la parte superior del tubo recolector de condensados.

6.- Se trató de recalibrar las escalas para la medición de los condensados recolectados, puesto que con las anteriores se tenían lecturas incorrectas, pero se encontró que esto no era práctico, por ser incómodas para hacer las lecturas y porque las escalas podían extraviarse.

7.- Se instalaron 2 termopares en el aislamiento del tubo 3, quedando separados una distancia de 25 mm.

8.- Se diseñó y se armó una estructura para colocar el selector de termopares y el indicador de temperatura, con la finalidad de dejar esos instrumentos fijos, evitando así su posible descalibración. Posteriormente se fijó esa estructura al marco de montaje de los tubos ya existente, quedando situada en el lado izquierdo.

9.- Se instalaron termopares en los tubos 1 y 2 .

51

10.- Se quitó una línea de recolección de condensados que unía las salidas de los tubos de recolección de los tres tubos aislados .

11.- Se comenzó a trabajar con el equipo para familiarizarse con él y preparar las corridas a efectuar. Se observó que las temperaturas en los termopares externo e interno de los tubos 1 y 2 estaban invertidas, puesto que para el punto interno la temperatura era apreciablemente MENOR que para el punto externo.

Para los tubos 1 y 2 se hizo lo siguiente :

11 a. Se procedió a cambiar los termopares de colocación y lo calizarlos en los puntos deseados. Para lograr una localización más precisa, se procedió a abrir en el aislamiento una " puerta " ó " mirilla ", con el fin de poder observar las - capas de aislamiento y los termopares con mayor detenimiento y detalle, ya que hasta ese momento no se conocían los materiales aislantes usados .

11 b. Se colocaron nuevamente los termopares, procediendo a taponar los orificios donde estaban colocados antes .

11 c. El termopar externo, en ambos casos, no se pudo colocar en la misma capa de aislante que el interno, sino que se colocó en la capa externa, separado unos 5 - 10 mm de la capa interna .

11 d. Se volvió a cubrir cada una de las " puertas " ó " mirillas " con el material adecuado que más se asemejara al original (en el caso de que éste se hubiera roto), para cubrir el tubo nuevamente con aislamiento.

12.- Se hizo una modificación en la línea de entrada de agua de enfriamiento, ya que originalmente entraba al equipo (por el tubo 1) junto con la línea de vapor .

13.- Se hizo una "cama" o soporte para los termopares externos de los tubos 1 y 2 , para fijarlos y que éstos no se movieran al colocar las " puertas " antes citadas, pero no se

pudo fijar el extremo del termopar, porque la " cama " ya -- mencionada no se pudo dejar adherida a la capa interna de aislamiento en dicho punto .

14.- Se comenzó a hacer corridas .

15.- Primero se hizo una corrida con los tres tubos simultáneamente, pero se pensó (y se comprobó con cálculos) en la importancia de la transferencia de calor por convección y radiación entre tubos contiguos, por lo que se pensó en hacer corridas usando sólo un tubo, o como máximo, usar los tubos 1 y 2 simultáneamente.

16.- Se hizo corridas con el tubo 3 y posteriormente con el 1 , pero se observó que en el caso del tubo 1, que tiene dos capas de aislamiento, no se obtenía un valor congruente de k. Se pensó que esto se debía a que se había considerado el vapor como saturado, no siéndolo en realidad. Esto obliga a hacer determinaciones de la calidad del vapor. Además, se tenía una variación considerable en el volumen de condensado recolectado por unidad de tiempo.

17.- Por la razón expuesta en el punto anterior, se pensó instalar una válvula a la salida del tubo aislado 3, limitándose el trabajo a dicho tubo, puesto que en el caso de los demás tubos, se presentan problemas con la uniformidad de los aislamientos y la medición precisa de la separación entre los termopares, por lo expuesto en el punto 13 .

18.- Como se observó la vaporización de agua proveniente de los aislamientos, se procedió a aplicar una capa de "Apco seal" para sellar los poros superficiales del aislamiento y hacer también la función de una " barrera de vapor ". También se revisó una válvula por la razón ya citada.

19.- Se instaló y se probó el tubo 3 con la válvula arriba mencionada, observándose mayor uniformidad en los datos obtenidos y, además, que es necesario efectuar dos veces el drenado del tubo recolector de condensados para tener una variación menor en las lecturas y datos más precisos .

20.- Se hicieron otras corridas, implementando la nueva técnica de drenado .

21.— Se repitieron las corridas dos veces, observándose ahora la uniformidad deseada respecto a las anteriores y demostrando su fácil reproducibilidad .

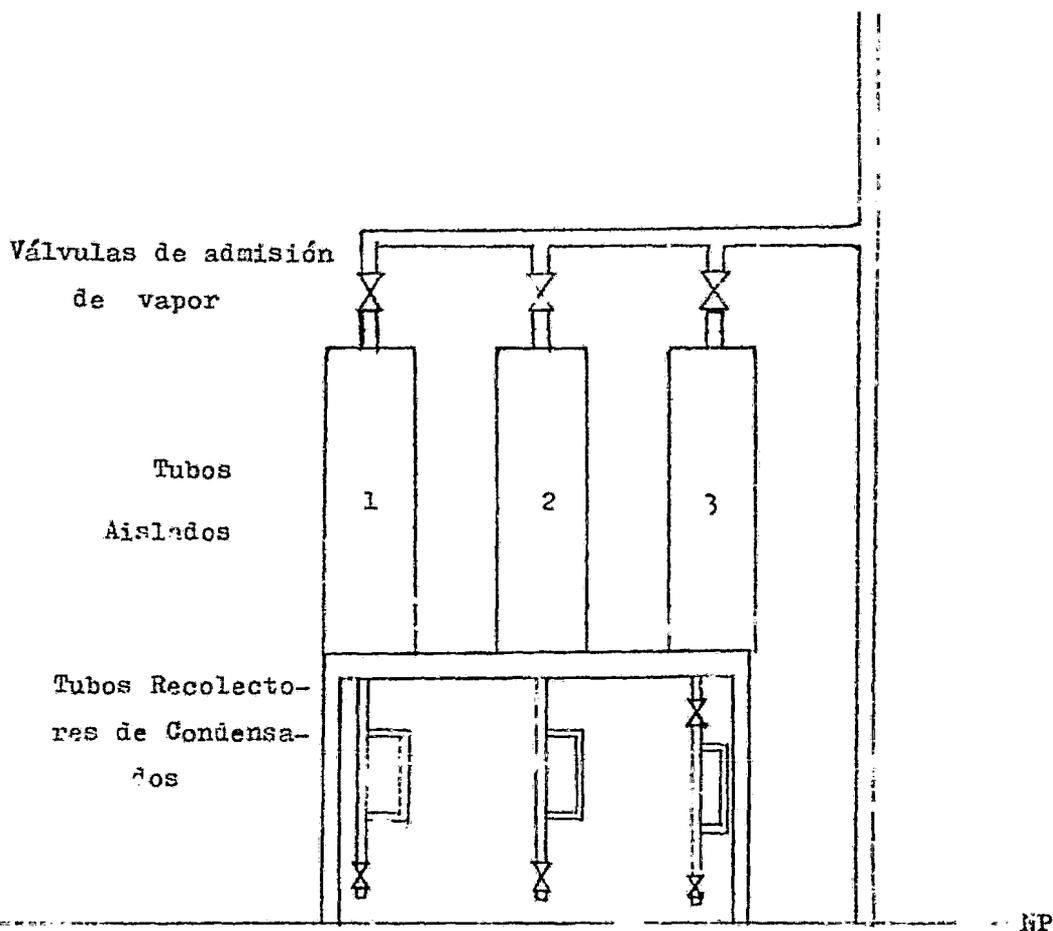


Fig. 18 . Esquema simplificado del equipo usado .

CAPÍTULO V
DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

- Modo de Operar el equipo .

- 1.- Se drena los condensados de la parte inferior, abriendo la válvula B (Fig. 19) y después se abre la válvula A para drenar el tubo 3 .
- 2.- Una vez drenado el tubo, se procede a cerrar la válvula A y se introduce vapor, abriendo la válvula de admisión al tubo 3.
- 3.- Se espera unos 20-25 minutos y luego se cierra la válvula B y se abre la A, después de unos 3 minutos, se abre B y se drena el tubo, repitiendo la operación marcada en el punto anterior y después de que se observe que no hay variación apreciable en la temperatura de los termopares, se podrá comenzar a operar y hacer la determinación de calidad del vapor (ver Apéndice "B").

Para hacer corridas :

- i. Drenar el tubo bien (*).
- ii. Colocar un recipiente adecuado (se sugiere un vaso de precipitados de 1000ml.) a la salida del tubo recolector de condensados, cerrar la válvula inferior B y echar a andar un cronómetro .
- iii. Se deberá tomar nota de la presión del vapor en ese momento (al iniciar la corrida).
- iu. Después de un tiempo adecuado, en el que el nivel de condensados observado en el vaso comunicante no se encuentre demasiado cerca del límite superior, recomendándose entre 3 y 10 minutos. Después de este tiempo, se cerrará la válvula A, procediendo a abrir la válvula B para recolectar los condensados (*). Se deberá medir inmediatamente la temperatura de los condensados en el recipiente donde se recolectan.

(*) = Ver "Técnica de recolección de condensados y drenado"

u. Se hará la lectura de la presión en el momento final y - las temperaturas en ambos termopares. También se determinará el volumen de condensados que se tenga.

Debido a que la recolección y medición correctas de los condensados son muy importantes, para llevarlas a cabo se recomienda la siguiente :

" Técnica de Recolección de Condensados y Drenado del tubo "

a) Recolección de condensados .

Cerrar válvula A

Recoger condensados (abrir B)

Cerrar válvula B

b) Para drenar el tubo :

1.- Abrir B hasta que salga todo el vapor y los condensados residuales.

2.- Cerrar B y abrir A. Esperar 30-60 segundos.

3.- Cerrar A y abrir B rápido.

4.- Cerrar B y abrir A.

5.- Abrir B y volver a cerrarla.

6.- Al cerrar B, echar a andar el cronómetro.

Observaciones :

- Es muy importante hacer determinaciones de la calidad del vapor usado, ya que este no es saturado.

- La determinación de k por el procedimiento aquí planteado implica la medición más precisa posible del calor transferido. En el caso presente, esto se realiza con la medición - que se tenga de los condensados, con lo que se pueden originar variaciones considerables. Como se mencionó en el capítulo anterior, se instaló una válvula adicional para poder hacer una lectura de condensados más precisa.

- También se implementó la "Técnica de Drenado y Recolección de Condensados". Con esto se observó una gran heterogeneidad con menor variación de datos y mayor facilidad de operación.

- Después de cerrar la Válvula A, se procede a reorientar los condensados en el vaso de precipitados, leyendo también la temperatura de dichos condensados. Posteriormente se hace la medición del volumen del condensado con una probeta.

- También se debe hacer notar la observación del hecho de que cuando la caldera arranca debido a una baja presión, el vapor que entra al tubo lleva una mayor proporción de agua, debido al arrastre de ésta, haciendo variar bastante las lecturas y originando errores muy grandes. Por esto se recomienda dar por terminada la corrida y/o repetirla, cuando se oiga que entra en operación la caldera.

- Se toma nota de la presión del vapor al comenzar y al terminar cada corrida y se consideró su promedio por ser éste el valor más representativo de la presión en el tubo durante la corrida.

- Para medir la temperatura en la superficie externa del aislamiento, se hizo un receptáculo con "MASKING TAPE", mismo que se llenó con espuma THERMERN 80 y en él se introdujo el termómetro.

- Como medida de precaución se recomienda usar guantes protectores.

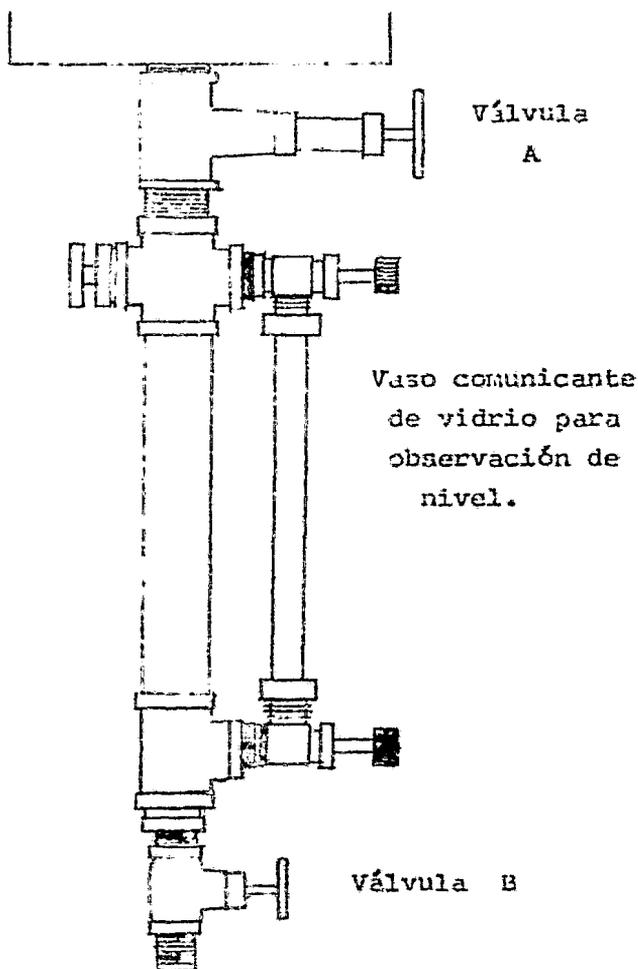


Figura 19 . Detalle del tubo recolector de condensados .
(Escala : 1 : 4)

D A T O S

No.	T _{int} °C	T _{ext} °C	V _{condens.} (ml)	T _{condens.} °C	tiempo (min)	P _{operación} (atm)
1	142	64	114	79	6.0	5.39
2	140	65	97	76	4.5	5.39
3	141	65	190.0	82	10.0	5.39
4	139	65	183.0	80	10.0	4.39
5	136	65	171.0	83.0	10.0	4.71
6	142.5	66	119.0	78	6.0	5.39
7	140	66	108.0	78	6.0	5.19
8	139	66	94.5	76	5.0	4.92
9	143	66	110	80	5.0	5.46
10	142	66	108	73	6.0	5.22
11	139	66	89	76	5.0	4.92

DATOS DEL CALORIMETRO ISOCALORICO

P ₁ (atm)	T ₂ (°C)
4.71	88.0
5.26	88.0
5.39	88.5
5.53	89.0
5.80	89.0

Observaciones.

Temperatura ambiente = 21.5 °C

Separación entre termopares = 25 mm. (Tubo 2)

Se usó el tubo No. 2 .

D A T O S

No.	T_{int} °C	T_{ext} °C	$V_{condens.}$ (ml)	$T_{condens.}$ °C	tiempo (min)	$P_{operación}$ (atm)
12	141	66.0	94	78	5.0	5.05
13	140	65.5	102.5	77	6.0	5.25
14	139	64.0	102.0	77	6.5	5.09
15	142	65.0	100.0	77	5.0	5.46
16	138	66.0	80.0	74	5.0	5.09
17	141	66.0	130.0	82	10.0	5.33
18	140.5	66.5	84.0	77	5.0	5.29

Datos del Calorímetro Isoentálpico :

$$P_1 = 5.26 \text{ atm. abs.}$$

$$T_2 = 38.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura ambiente = 21 °C

Temperatura en la superficie externa del aislante = 51 °C

Nomenclatura :

T_{int} = Temperatura interna (cerca de la pared del tubo)

T_{ext} = Temperatura externa

$V_{condens.}$ = Volumen de condensado

$T_{condens.}$ = Temperatura del condensado

C A P I T U L O V I

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos antes presentados, así como un ejemplo para ilustrar la obtención de los mismos .

EJEMPLO .

Para ilustrar los cálculos se tomarán los datos de la corrida número 10 .

Datos :

Temperatura en termopar interno = 142 °C

Temperatura en termopar externo = 66 °C

Volumen de condensados recolectado = 108 ml

Temperatura de los condensados = 72 °C

Temperatura del vapor (aprox.) = 150 °C = 300 °F

Temperatura ambiente = 21.5 °C = 70.7 °F

Planteamiento .

1.- Se obtuvo el calor perdido por el tubo recolector. Para esto se consideró como Temperatura de la superficie la temperatura logarítmica media entre la del vapor y la del condensado .

2.- Se calculó el calor que entra efectivamente al tubo y que hay que considerar para los cálculos presentes, esto es, restando el calor del condensado .

3.- Se calculó el porcentaje de pérdida de calor por el tubo recolector .

4.- Se obtuvo k (conductividad térmica) a partir de los datos dados y la ecuación (6) :

$$\frac{q}{t} = - \frac{k A}{\Delta x} \Delta T \quad (6)$$

Balance de calor :

$$Q_{\text{vapor entra}} = Q_{\text{tubo}} + Q_{\text{perdido}_{t.r.}} + Q_{\text{condensado}}$$

donde : t.r. = tubo recolector

i). Pérdidas de calor por el tubo recolector ($Q_{\text{perdido}_{t.r.}}$)

Base : 6 minutos (tiempo de la corrida)

$$T_{lm} = \frac{152 - 73}{\ln \frac{152}{73}} = 106.92 \text{ } ^\circ\text{C} = 224.45 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación se usará las correlaciones :

$$(14) \quad h_c = 0.29 \left(\frac{T}{L} \right)^{0.85} ; \quad T = T_{lm} - T_{amb.} \text{ (} ^\circ\text{F)}$$

$$h_r = \frac{\epsilon \cdot 0.173 \left[\left(\frac{T_{lm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 \right]}{T_{lm} - T_{amb}} \quad (15)$$

en ésta última ecuación se usan temperaturas dadas en $^{\circ}\text{R}$

$$h_t = h_c + h_r \quad (16)$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación, se consideró $\epsilon = 0.94$, de acuerdo a la tabla dada en la página 10 - 46 de la referencia (R6).

$$h_r = \frac{0.173 (0.94) [(6.845)^4 - (5.307)^4]}{684.5 - 531.7} =$$

$$h_r = 1.46 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft}^2 (^\circ\text{F})}$$

De (14) :

$$h_c = 0.29 \left(\frac{224.5 - 70.7}{3.182} \right)^{0.25} =$$

$$h_c = 0.76 \text{ BTU / hr ft}^2 (^\circ\text{F})$$

donde $L = 3.182 \text{ ft} = 97 \text{ cm}$ (longitud del aislamiento)

Con los resultados anteriores se tiene :

$$h_t = h_c + h_r = 2.22 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft}^2 (^\circ\text{F})}$$

$$h_t = 2.22 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft}^2 (^\circ\text{F})} \left(\frac{1.8 (^\circ\text{F})}{1 (^\circ\text{C})} \right) \left(\frac{0.252 \text{ kcal}}{1 \text{ BTU}} \right) \left(\frac{1 \text{ ft}}{0.305 \text{ m}} \right)^2 =$$

$$h_t = 10.83 \frac{\text{kcal}}{\text{hr m}^2 (^\circ\text{C})}$$

El área total del tubo recolector incluyendo el tubo de vidrio es de 0.14 m^2 , (ver Nota b. al final), con lo cual :

$$\begin{aligned} Q_{\text{perdido t.r.}} &= 10.83 \frac{\text{kcal}}{\text{hr m}^2 (^\circ\text{C})} (0.14 \text{ m}^2) (150 - 21.5) (^\circ\text{C}) = \\ &= 197.368 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

ii). Calor que entra al tubo (vía vapor).

El vapor del Laboratorio de Ingeniería Química no es saturado, razón por la cual se debe hacer la determinación de la calidad del mismo (ver Apéndice B). Se trabajó -- con vapor de 95 %, cuya entalpia es :

$$H_{95\%} = 0.95 H_{\text{vap. sat.}} + 0.05 H_{\text{liq. sat.}}$$

Para la presión de operación de 5.4 kg / cm^2 , se obtuvieron los datos siguientes de la Tabla 1.8 de la referencia (R 11).

$$H_{\text{vap. sat.}} = 456.00 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$h_{\text{lic. sat.}} = 154.27 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

de donde se obtuvo :

$$H_{95} \% = 0.95 (656.68) + 0.05 (154.27) = 631.53 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Se recogieron 108 ml. de condensado a 73°C . A esa temperatura, la densidad (ρ) es :

$$\rho_{\text{lic. } 73^{\circ}\text{C}} = 0.97606 \text{ g/ml}$$

esto nos da :

$$\text{Masa de condensado} = 108 \text{ ml} \left(0.97606 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right) = 105.41 \text{ g}$$

por lo que el calor que entró al sistema (en los 6 minutos de la corrida, tomados como base) es :

$$Q_{\text{ent.}} = 631.53 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} (0.10541 \text{ kg}) = 66.58 \text{ kcal}$$

- Cálculo del calor del condensado ($Q_{\text{condensado}}$)

$$Q_{\text{condensado}} = 0.10541 \text{ kg} \left(73 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = 7.69 \text{ kcal}$$

- Calor que entra al tubo (Q_{tubo}) .

$$Q_{\text{tubo}} = Q_{\text{ent. var.}} - (Q_{\text{condensado}} + Q_{\text{perdido}_{t.r.}})$$

Como se tomó como base $t = 6 \text{ min} = 0.10 \text{ hr}$:

$$Q_{\text{perdido}_{t.r.}} = 197.368 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} (0.10 \text{ hr}) = 19.73 \text{ kcal}$$

con esto tenemos :

$$Q_{\text{tubo}} = 66.58 - (7.69 + 19.73) = 39.16 \text{ kcal en 6 min}$$

$$Q_{\text{tubo}} = 6.53 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} = 391.6 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

iii)

$$\% \text{ de pérdida} = \frac{19.73}{66.58} \times 100 = 29.63$$

iu). Cálculo de k .

A partir de la ecuación (6) se obtuvo :

$$k = \frac{Q \Delta x}{t A \Delta T}$$

donde :

Δx = separación entre los termopares

ΔT = diferencia de temperatura entre los termopares

A = Área media del aislamiento

$\frac{Q}{t}$ = Calor transferido por el aislamiento por unidad de tiempo, en este caso, Q_{tubo} .

para esta corrida se tuvo :

$$\Delta x = 2.5 \text{ cm.}$$

$$\Delta T = 76 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A = 10\,089 \text{ cm}^2$$

$$\frac{Q}{t} = 391.62 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

con lo cual:

$$k = \frac{391.62 \text{ kcal} (2.5 \text{ cm})}{\text{hr} (10\,089 \text{ cm}^2) (76 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 1.28 \times 10^{-3} \frac{\text{kcal}}{\text{hr cm }^{\circ}\text{C}}$$

Notas :

a). El Área media del aislamiento se calculó siguiendo el procedimiento descrito en la sección ii. del inciso b) - del Capítulo I y con la ayuda de la Figura 2 .

i) Se procedió a encontrar los valores para las relaciones ($D/1$) y (x/D) y el área interior total A_1 .

$$x = 30 \text{ mm} = 3.0 \text{ cm} \quad D = 97.305 \text{ cm}$$

$$1 = 97 \text{ cm}$$

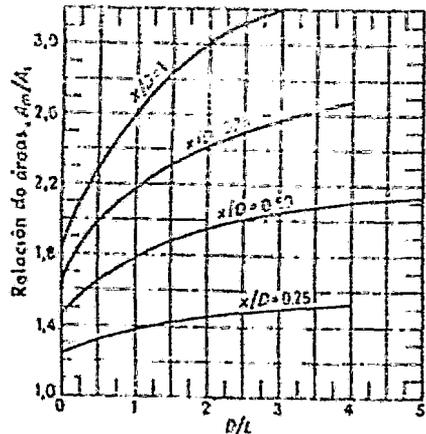
Con estos valores se tiene :

$$\frac{D}{l} = \frac{27.305}{97} = 0.281$$

$$\frac{x}{D} = \frac{3.0}{27.305} = 0.110$$

Con estos valores para las relaciones ya mencionadas, se usa la Fig. 2, aquí adjunta.

Con ellos se obtuvo un valor de $\frac{A_m}{A_1} = 1.08$.



Cálculo del área interna de aislante, A_1 :

$$\text{Área transversal} = A_t = 508.644 \text{ cm}^2$$

$$A_1 = \pi D l + 2 A_t = 3.142 (27.305 \text{ cm})(97 \text{ cm}) + 2 (508.644 \text{ cm}^2) = 8\,320.775 + 1\,017.288 = 9\,338.063$$

con la relación $\frac{A_m}{A_1} = 1.08$, se obtiene para el área media, A_m :

$$A_m = 10\,089 = 1.08 (9\,338.063)$$

$$A_m = 10\,089 \text{ cm}^2$$

b). Para calcular el área total del tubo recolector se consideró cada uno de los accesorios, a los cuales se les tomó su área extendida (de transferencia de calor). Así, se consideró el área del tubo de vidrio, de las válvulas, téj y demás accesorios.

Siguiendo la secuencia ~~antes~~ presentada en el EJEMPLO, usando los datos obtenidos (presentados en el Cap. V), se obtuvieron para k los siguientes

R E S U L T A D O S

Corrida No.	$k \cdot 10^3 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{hr } ^\circ\text{C cm}} \right)$
1	1.31
2	1.24
3	2.21
4	2.16
5	1.98
6	1.43
7	1.28
8	1.17
9	1.36
10	1.28
11	1.07
12	1.01
13	1.18
14	1.30
15	1.22
16	0.924
17	2.12
18	0.957
Valor promedio	1.400
Desviación estándar	0.419

CONCLUSIONES

El aparato evaluado puede emplearse para determinar conductividades térmicas (k) como se había planeado, si se llevan a cabo las indicaciones presentadas en los puntos 1) y 2) de las RECOMENDACIONES, siguiendo el procedimiento planteado aquí.

El valor de k (promedio) obtenido se observa que es menor que el del asbesto en el mismo rango de temperatura (R 6) :

T (°C)	k 10 ³ ($\frac{\text{kcal cm}}{\text{hr } ^\circ\text{C cm}^2}$)
100	1.65
200	1.78

También se observó que el valor obtenido experimentalmente para k (considerando el promedio) es mayor que el valor establecido como límite máximo de k para un cemento de aislamiento térmico de vermiculita expandida o exfoliada dado por el estándar C / 196-77 de la ASTM (R 12). Este cemento (del estándar) está compuesto predominantemente por vermiculita expandida o exfoliada y cemento resistente al calor. A continuación se indica el porcentaje de exceso de la k obtenida en el trabajo respecto a k_{max.} .

T (°C)	k _{max} ($\frac{\text{kcal cm}}{\text{hr } ^\circ\text{C cm}^2}$)	%
95	1.18	18.64
260	1.36	2.94

Se considera que el costo que representa la elaboración del material usado como aislante en este trabajo, así como el hecho de haber utilizado en gran proporción desechos de aislamientos usados, se presenta como alternativa útil y

práctica en el campo del mantenimiento correctivo (de emergencia) y puede tener también aplicación como aislante — " permanente ", evitando gastos mayores por un cambio de aislante.

El aislante que fué usado en este caso estaba constituido por vermiculita y cemento tipo Portland, predominantemente, con desechos de aislantes o aislamientos de magnesia, asbesto y otros, incorporados finamente a la mezcla, de tal manera -- que ésta fué lo más homogénea posible.

RECOMENDACIONES

1.- Hacer la instalación de nuevos aislamientos en los tubos 1 y 2, colocando termopares en la zona cuya conductividad térmica (k) interese medir, conociendo la separación entre ellos.

2.- Instalar válvulas a la salida de los tubos aislados (como la A de la Figura 19) para los tubos 2 y 3, puesto que esto es necesario para operar más correctamente .

3.- Hacer determinaciones de la calidad del vapor cuando se opere el equipo. (Ver el Apéndice B).

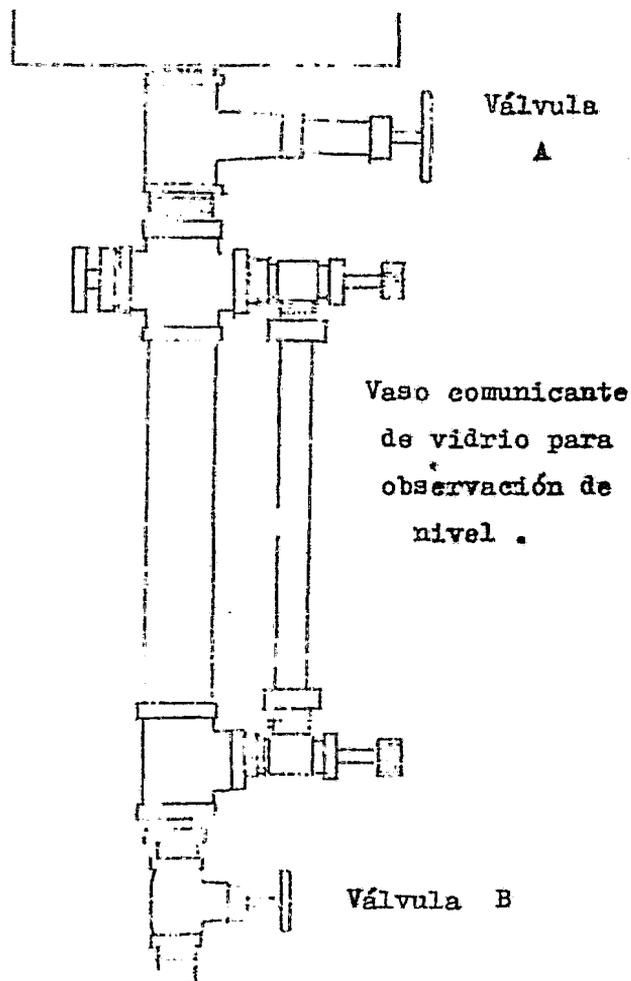
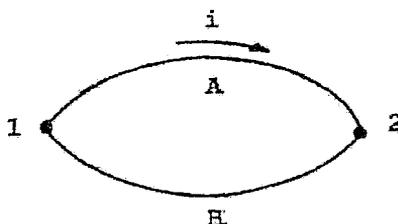


Figura 19. Detalle del tubo recolector de condensados .

TERMOPARES

A partir del descubrimiento hecho por Seebeck en 1821 de que fluye una corriente eléctrica en un circuito continuo de dos alambres de metales diferentes, si las dos uniones están a temperaturas diferentes. El termopar se puede representar como se muestra en la Figura .

A y B son los dos metales y 1 y 2 son las dos uniones del termopar, siendo 1 la unión caliente y 2 la unión fría. En el caso ilustrado, se dice que A es termoeléctricamente POSITIVO respecto al metal B .



Como la corriente que se tenga es función de la fuerza electromotriz (fem) y la resistencia que se tenga, el aparato de medición está construido de tal manera que se eliminan los efectos de resistencia del circuito, tomando en cuenta para ello una fem cuando i (la corriente) fuera CERO .

Las uniones frías se encuentran localizadas en los aparatos ó dispositivos de medición, por lo que se puede mantener ya sea la temperatura constante por medio de un baño con termostato, o bien, a temperatura ambiente y compensada (La temperatura ambiente) eléctricamente, de tal manera que parezca que las uniones frías se conservan a temperatura constante .

Actualmente se han logrado grandes avances en este campo, poniéndose termopares bastante precisos para hacer mediciones de temperatura en toberas de cohetes, gases de salida de motores, etc.

Cuando se instala termopares en materiales con baja conductividad térmica, como el talón, nylon y otros, se tal forma

ra que la razón entre la conductividad térmica del material en cuestión y la del conjunto del termopar, es significativamente menor que 1, se podría tener errores muy grandes, que pueden reducirse de la forma siguiente :

- 1.- Diseñar un termopar de conductividad térmica cercana a la del material en cuestión.
- 2.- Reducir el radio del alambre del termopar o aumentar la proporción (área superficial) / (área seccional) .
- 3.- Colocar el termopar y el alambre de extensión paralelos al plano de flujo de calor .

Además de estas recomendaciones especiales, algunas recomendaciones generales aplicables en todos los casos son :

- a) Usar los termopozos adecuados en cada sistema .

Los termopozos son tubos cerrados en uno de sus extremos, generalmente metálicos, donde se mete el termopar. Los termopozos se introducen hasta el punto donde interesa llevar a cabo la medición de la temperatura, evitando el contacto directo con el termopar, sirviendo por esto de protección.

- b) Procurar tener alambre de extensión apropiado para el termopar.

Es importante que el alambre de extensión, que va del termopar al instrumento de detección, sea el recomendado por el fabricante y además, que se tenga el mismo par de metales en ese alambre de extensión y en el termopar.

- c) Asegurarse de la continuidad del material en que se inserte el termopar.

Esto es importante para evitar variaciones en las mediciones, por discontinuidad en el material o poca precisión por la mala unión .

Los termopares más empleados en la industria para rangos de hasta 1370 °C son :

Termopar	Tipo	Rango de aplicación (°C)
Cobre / Constantan	T	- 17.75 a 412.75
Hierro / Constantan	J	-17.75 a 1 204.0
Cromo / Constantan	E	- 17.75 a 982.0
Cromel / Alumel	K	- 17.75 a 1 370

El Tipo del termopar se refiere a la denominación que reciben en el mercado.

Para temperaturas mayores se usan termopares como por ejemplo :

Termopar	Tipo
Platino con 13 % de Rodio / Platino	R
Platino con 10 % de Rodio / Platino	S
Tungsteno con 5 % de Renio / Tungsteno con 26 % de Renio	W -5
Tungsteno / Tungsteno con 26 % de Renio	W R

Las aplicaciones de los termopares mencionados incluyen :

- Medición de temperaturas superficiales
- Mediciones de transferencia de calor
- Moldeo e inyección de plásticos
- Producción de recipientes de vidrio
- Investigaciones de toberas y sistemas de ignición de cohetes y naves aéreas y espaciales .

APENDICE " B "

Determinación de la calidad del vapor del Laboratorio de Ingeniería Química .

Se puede proceder de cualquiera de las dos formas siguientes:

- a) Utilizando el calorímetro isoentálpico.
- b) Usando el calorímetro de barril.

a) Calorímetro Isoentálpico.

Se basa en la expansión isoentálpica de un gas en el interior de un tubo de expansión adiabática, desde una presión dada hasta la presión atmosférica. Este es uno de los procedimientos de determinación de la calidad del vapor aprobados por la ASME .

El calorímetro consiste de un tubo de expansión adiabática, una válvula de alimentación de vapor, un manómetro y un termómetro, como se indica en la Figura B - 1 .

Para obtener el dato de calidad de un vapor dado, se sigue el siguiente procedimiento :

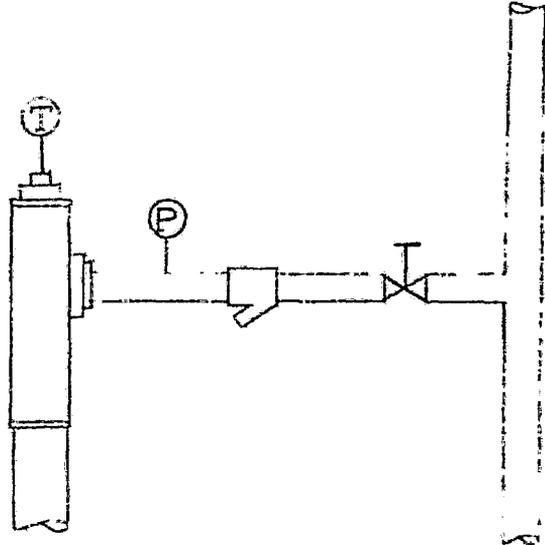


Figura B - 1. Calorímetro Isoentálpico .

- i) Se conocen la presión de descarga (atmosférica), así como la temperatura en ese punto (por medio del termómetro) y la presión de entrada (por el manómetro colocado antes del tubo de expansión).. Esta última presión se puede fijar con la válvula de alimentación del vapor, igualándola con aquella a la que se trabaje.

- ii) Como el proceso es isoentálpico, se localiza el punto dado por las condiciones de salida en un Diagrama de Mollier

y siguiendo la línea de entalpía constante correspondiente, se podrá localizar el punto de entrada. Haciendo el cálculo a partir de las entalpías se tiene :

$$x = \frac{H_c - h_f}{H_{fg}}$$

donde :

x = calidad del vapor

H_c = entalpía del vapor en el calorímetro

h_f = entalpía del líquido saturado

H_{fg} = entalpía del vapor seco (vapor saturado)

b) Calorímetro de barril .

Se basa en el intercambio de calor y mezclado del vapor al que se le determinará su calidad y una masa de agua - dada.

Este calorímetro consiste de un barril de madera al que se le mete una cantidad de agua conocida y posteriormente se le burbujea vapor de agua. Con esto, aumentará la entalpía y por consiguiente la temperatura del agua - contenida en el barril, debido al calor latente que cede el vapor de agua que se burbujea y se manifiesta como - calor sensible.

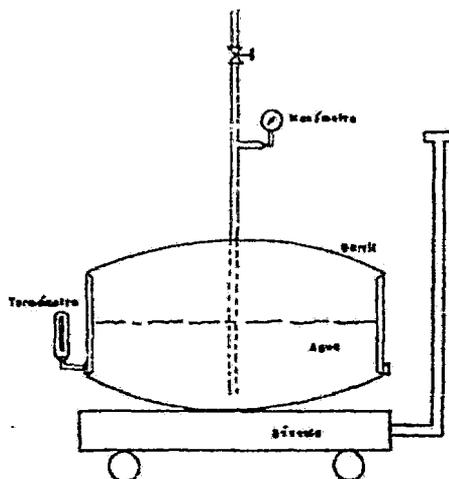


Figura B - 2. Calorímetro de barril.

Se hacen los balances de masa y energía correspondientes y se determina la calidad del vapor :

$$x = \frac{W_{av} C_p (T_2 - T_1) - W_v C_p (T_3 - T_1)}{W_v \lambda}$$

W_{av} = masa del agua con el vapor (al terminar)

C_p = calor específico del agua

T_1 = temperatura del agua fría (antes de burbujear vapor)

T_2 = temperatura del agua con el vapor en su seno (después de burbujearlo).

T_3 = temperatura del vapor

W_v = masa del vapor

λ = calor latente del vapor

" PROPOSICION DE UNA PRACTICA PARA DETERMINAR CONDUCTIVIDAD
 TERMICA DE MATERIALES AISLANTES " .

(PARA SU FUTURA IMPLEMENTACION EN EL LABORATORIO DE INGENIERIA
 ANTIGUA)

i). Objetivo :

Determinar la conductividad térmica (k) de diferentes materiales aislantes, mediante los balances de energía correspondientes .

ii). Fundamentos Teóricos .

La CONDUCCION es el mecanismo de transferencia de calor por el que éste se transmite a través de la masa de un material desde una zona de alta temperatura hacia otra de baja - temperatura.

La ley fundamental de la transferencia de calor por conducción es la Ley de Fourier :

$$\frac{q}{t} = Q = k \frac{A \Delta T}{\Delta x}$$

donde :

k = conductividad térmica del material en cuestión

t = tiempo

ΔT = diferencia de temperatura entre los puntos consi
derados.

Δx = separación entre los puntos considerados

La conductividad térmica (k) de un material nos da una idea de la facilidad con que ese material conduce calor. Los

materiales que tienen valores pequeños de k son llamados -- AISLANTES TERMICOS, mientras que aquellos que presentan valores grandes de k se conocen como CONDUCTORES TERMICOS, como -- por ejemplo el cobre, ya que el calor es conducido eficientemente por ellos.

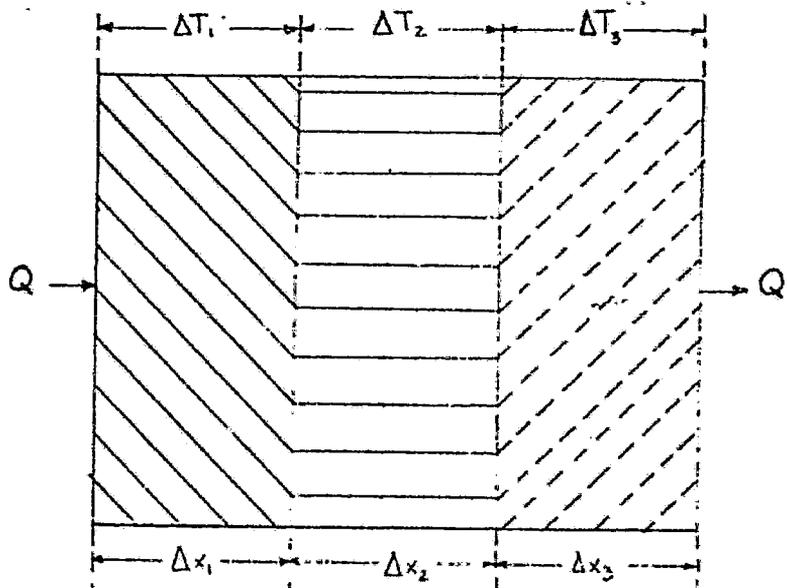
La Ley de Fourier se aplica a formas geométricas diversas, como placas, cilindros y esferas, con lo que se obtienen las ecuaciones siguientes :

Geometría plana :
$$Q = \frac{k_m A_m \Delta T}{\Delta x}$$

Geometría cilíndrica :
$$Q = \frac{2\pi k l \Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Geometría esférica :
$$Q = \frac{4\pi k r_1 r_2 \Delta T}{r_2 - r_1}$$

El interés práctico de los aislantes reside en el hecho de que estos materiales se usan para cubrir la superficie externa de equipos y tuberías (hechos por lo general de materiales que son conductores térmicos) y evitar con ello la pérdida de energía hacia el medio ambiente circundante. Para disminuir dichas pérdidas, frecuentemente se debe usar más -- de una capa de aislante, por lo que se habla de una pared -- compuesta por -- varias resisten -- cias en serie, -- como se ilustra en la Figura -- C - 1 .



Quando se ha alcanzado el régimen permanente, se tendrá que el calor que pasa por cada capa o RESISTENCIA EN SERIE - es el mismo :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Se tiene además :

$$Q_i = k_i A_i \frac{\Delta T_i}{\Delta x_i}$$

de donde :

$$\Delta T_i = Q_i \frac{\Delta x_i}{k_i A_i} ; \text{ asu\u00ed : } A_i = \text{cte} = A$$

La diferencia de temperatura entre los puntos extremos - est\u00e1 dada por :

$$T_{\text{Total}} = \sum \Delta T_i$$

como : $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$

se tiene :

$$T_{\text{Total}} = Q \left(\frac{\Delta x_1}{k_1 A} + \frac{\Delta x_2}{k_2 A} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A} \right) \quad (a)$$

Se observa que este sistema tiene mucha semejanza con un sistema el\u00e9ctrico de RESISTENCIAS EN SERIE .

iii) Descripci\u00f3n del equipo.

Se tienen tres tubos de 10 pulgadas de di\u00e1metro, c\u00e9dula 40 y de largo conocido, recubiertos con diferentes aislantes, como se muestra en la Figura C-2 .

La obtenci\u00f3n de k se hace a partir del c\u00e1lculo del calor que se transfiere desde el interior de cada tubo hasta el aire circundante (Q), a r\u00e9gimen permanente. Este calor est\u00e1 dado por el calor latente cedido por el vapor que entra al equipo, por lo que se deber\u00e1 recolectar los condensados y medir la temperatura en los puntos considerados para sustituir los valores en la ecuaci\u00f3n (a).

Para la detección y medición de la temperatura se cuenta con dos termopares fierro-constantan insertados en el aislamiento de cada uno de los tubos antes mencionados y separados una distancia Δx . Uno de los termopares se encuentra junto a la pared del tubo (en contacto con él en un punto) y el otro en un punto más externo respecto al interior.

Los termopares están conectados a un selector de 12 puntos marca West y la temperatura en cada punto se conoce por medio de un indicador West, con rango de 0 - 200 °C.

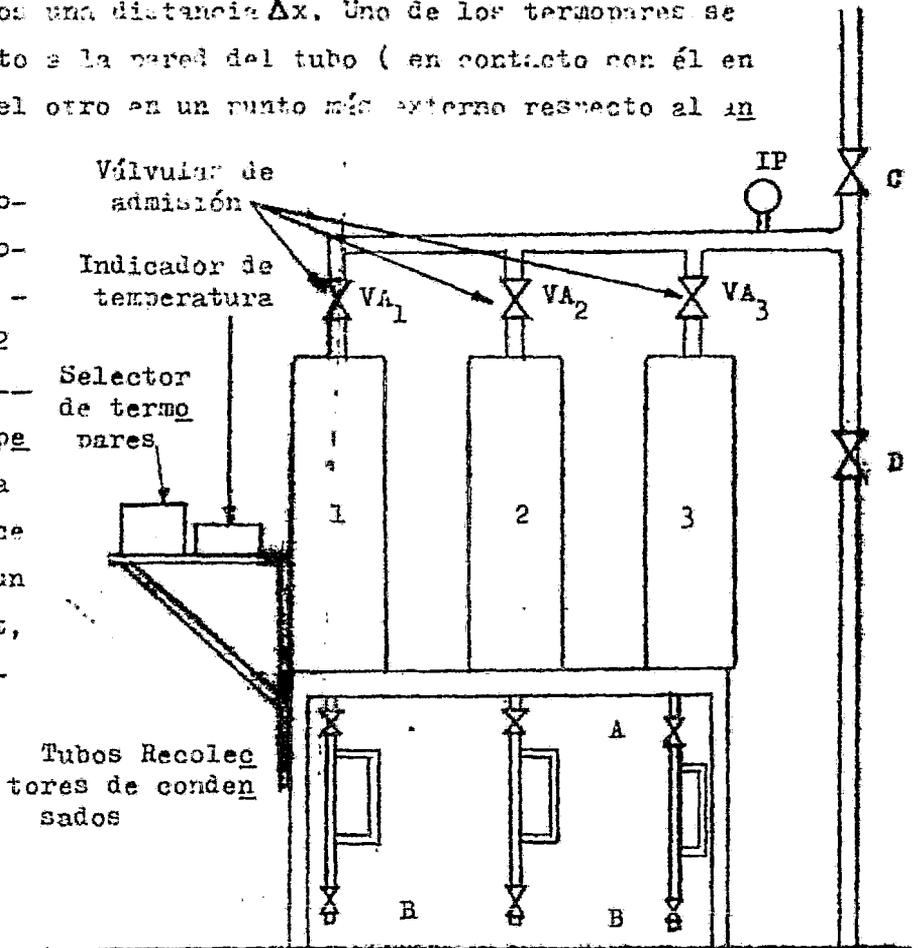


Figura C - 2. Equipo a usar en la práctica.

Recolector de condensados.

En la parte inferior de cada tubo se tiene una sección de recolección de condensados, que consta básicamente de un tubo con dos válvulas y un vaso comunicante de vidrio para observación de nivel.

Este tubo recolector se ilustra (con sus partes) en la Figura C - 3 .

Auxiliares.

- Se tiene una válvula de entrada de vapor al aparato y otra para drenar y " purgar " la línea (C,D, respectivamente, en la Figura C - 2).

- También se tiene un manómetro (IP) a la entrada al aparato.

- Para meter vapor a cada tubo y calentar éste último, se tiene una válvula de admisión de vapor a cada uno (VA, en la Figura C - 2).

- Se cuenta con una línea de agua de enfriamiento, con válvulas de entrada para cada tubo.

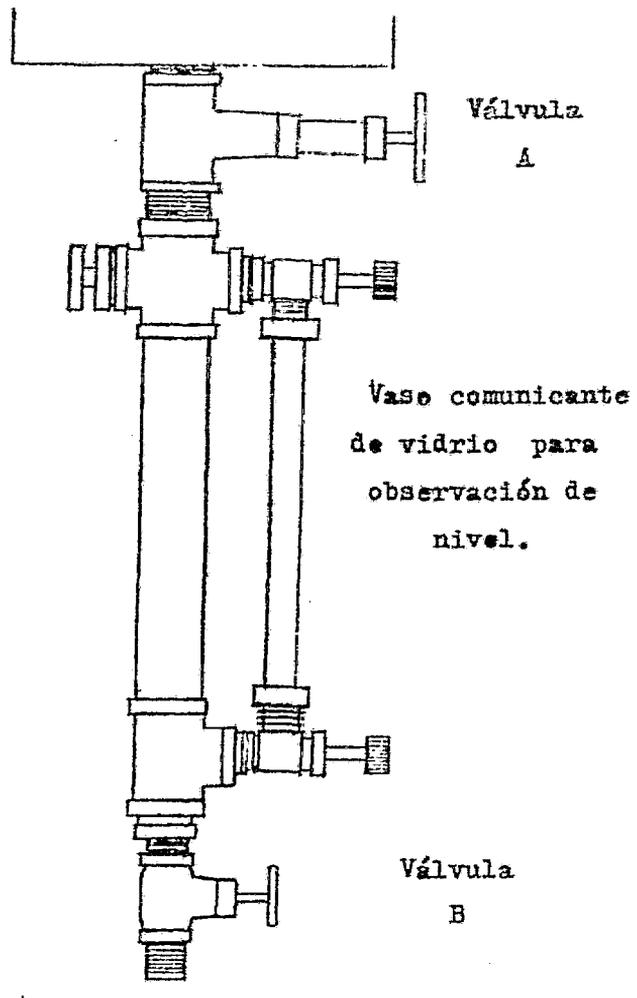


Figura C - 3. Detalle del tubo recolector.

Técnica de Operación.

Secuencia de pasos a seguir para cada tubo.

- 1.- Drenar los condensados, abriendo las válvulas B y A.
- 2.- Una vez drenado el tubo, se cierra la válvula A y se mete vapor, abriendo la válvula de admisión del tubo correspondiente .
- 3.- Se espera unos 20-25 minutos y luego se cierra la válvula B y se abre la A, después de unos 3 minutos, se abre B y se drena el tubo, repitiendo la operación marcada en el -- punto anterior y después de observar que no hay variación a preciable en la temperatura de los termopares, se podrá comenzar a operar.
- 4.- Hacer la determinación de la calidad del vapor.

CORRIDAS :

- 5.- Drenar el tubo de recolección de condensados correctamente (*) .
- 6.- Colocar un recipiente adecuado (se sugiere un vaso de -- precipitados de 1000 ml.) a la salida del tubo recolector, -- cerrar la válvula inferior B y echar a andar un cronómetro.
- 7.- Se debe tomar nota de la presión al comenzar la corrida.
- 8.- Después de un tiempo adecuado, evitando que el nivel de condensados en el vaso comunicante se encuentre demasiado cerca del límite superior. (se recomienda entre 3 y 10 minutos), se cierra la válvula A, procediendo a abrir la válvula B para recolectar los condensados (*).
- 9.- Se mide inmediatamente la temperatura de los condensados en el recipiente donde se recolectan.
- 10.- Leer la presión del vapor al final de la corrida, las -- temperaturas en cada termopar y el volumen de condensados que se tenga .

(*) = Ver " Técnica de recolección de condensados y dre-

nado del tubo recolector " .

" Técnica de recolección de condensados y Drenado del
Tubo recolector de condensados "

a) Recolección de condensados .

Cerrar la válvula A

Recoger condensados (abrir B)

Cerrar la válvula B

b) Para drenar el tubo recolector de condensados :

- i. Abrir B hasta que salga todo el vapor y los condensados residuales.
- ii. Cerrar B y abrir A. Esperar 30-60 segundos.
- iii. Cerrar A y abrir B rápido.
- iu. Cerrar B y abrir A.
- u. Abrir B y volver a cerrarla.
- ui. Al cerrar B, echar a andar el cronómetro.

Observaciones y Recomendaciones.

- Por precaución, usar guantes protectores .

- Cuando se oiga que la caldera entra en operación, se recomienda dar por terminada la corrida en ese momento o repetirla, puesto que el vapor arrastrará mucha agua, haciendo variar mucho los datos que se obtengan.

Cálculos .

Hacer el balance de energía aplicado al aparato.

Calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación, con la ayuda de correlaciones adecuadas.

Calcular el área del tubo recolector y las pérdidas de calor por el mismo.

Calcular k a partir de la ecuación (a).

Bibliografía

- Mc. Adams . Heat Transmission
3a. Ed. Mc. Graw Hill ; Nueva York 1964
- Ozisik, M. N., Basic Heat Transfer
Mc. Graw Hill ; Nueva York 1977
- Bird, Stewart, Lightfoot . Transport Phenomena
Wiley International ; Nueva York 1960
- Perry, Chilton . Chemical Engineers' Handbook
Mc. Graw Hill. 5a. Edición .

C U E S T I O N A R I O

- 1.- ¿Cuál es la ley fundamental de conducción de calor? Definir cada término y aplicarla a las geometrías plana, cilíndrica y esférica.
- 2.- ¿Cómo se sabe (en este caso) cuando se alcanza el régimen permanente ?
- 3.- Dé algunos ejemplos de valores de k para aislantes y para conductores térmicos.
- 4.- Dé valores típicos de k para buenos aislantes y menciónelos.
- 5.- Dé valores de k para gases.
- 6.- ¿Cómo se explica, de acuerdo a la estructura interna de los aislantes, su bajo valor de k ?
- 7.- ¿ Por qué es necesario hacer una determinación de la calidad del vapor ?
- 8.- ¿Qué quiere decir que la calidad de un vapor es de 80 % ?
- 9.- ¿Qué métodos conoce para la determinación de la calidad del vapor ?
- 10.-¿Cuál es el principio teórico de un calorímetro isoentálpico ?

- 11.- Haga y explique un balance de energía aplicado a un calorímetro de barril .
- 12.- ¿qué es la difusividad térmica ?
- 13.- ¿ Cuáles son los pasos a seguir para instalar un aislamiento ?
- 14.- ¿ Cómo se determina el valor económico de aislante para un equipo ?
- 15.- ¿Cuál es el fundamento de los termopares ?
- 16.- ¿ Cuáles son los termopares más usados ?
- 17.- Haga un balance de energía aplicado al equipo a operar en esta práctica .

Notas : (a los profesores)

- i) Se recomienda calentar el equipo antes de explicar la práctica a los alumnos.
- ii) Es necesario seguir las instrucciones dadas en la "Técnica de Recolección y Drenado", para tener buenos datos con los cuales trabajar .

DATOS OBTENIDOS EN LA PRACTICA :

" DETERMINACION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA "

Corrida (TUBO)	T_{int} (°C)	T_{ext} (°C)	$T_{condens.}$ (°C)	$V_{condens}$ (ml)	t (min)	$P_{operación}$ (atm.)

T_{int} = Temperatura en el termopar interno

T_{ext} = Temperatura en el termopar externo

$T_{condens.}$ = Temperatura del condensado

$V_{condens}$ = Volumen de condensado

$P_{operación}$ = Presión de operación (a partir de las presiones inicial y final tenidas en la operación)

DATOS ADICIONALES.

Temperatura ambiente = _____ °C

Calidad del vapor = _____ %

DATOS DE CALORIMETRO(S) :

B I B L I O G R A F I A

- (R 1) Harrison, G. R.; Hydrocarbon Processing
Vol. 60, No. 9, Sept. 1981 .
- (R 2) Mc. Adams
Heat Transmission
3a. Ed. Mc. Graw Hill Book Co. 1964
- (R 3) Osizik, M. N.
Basic Heat Transfer
Mc. Graw Hill, Nueva York 1977
- (R 4) Bird, R. B.; Steward, W.E.; Lightfoot, E.N.
Transport Phenomena
Wiley International Edition, Nueva York, 1960
- (R 5) V. Arroyo, R.
Aislantes Térmicos en plantas de proceso
Instituto Mexicano del Petróleo (apuntes)
Curso de actualización , México 1978 .
- (R 6) Perry , J.H. ; Chilton, C. H.
Chemical Engineers' Handbook
Mc. Graw Hill ; 5a. Edición , 1973 .
- (R 7) Folletos de Aislantes y Acabados
Compañías : DOW, ICI , Johns Manville, etc.
- (R 8) Uppal, K. B. ; Hydrocarbon Processing
Vol. 59, No. 4, Abril 1980 .

- (R 9) Rase, H. F. ; Barrow, M. H.
Project Engineering of Process Plants
Ed. Wiley ; Nueva York 1957 .
- (R 10) Severns, W. B. ; Decker, H. E. ; Miles, J. G.
Steam, Air and Gas Power
3a. Edición ; John Wiley ; Nueva York 1956
- (R 11) Ocon, S. J. ; Soja, M. I.
Problemas de Ingeniería Química
Tomo I ; 3a. Edición .
Editorial Aguilar, Madrid 1976
- (R 12) ASTM
Annual A.S.T.M. Standards
Parte 18 ; Filadelfia , E.U.A. , 1980 .
- (R 13) NAMMCO Corporation
Temperature Measurement Handbook 1979 - 80
- (R 14) Facultad de Química
Manual de Prácticas del Laboratorio de Momentum
y Calor ; Laboratorio de Ingeniería Química
México 1979 .
- (R 15) Stoever, H. J.
Transmisión del calor y sus aplicaciones
Ed. Librería del Colegio, Buenos Aires 1961 .
- (R 16) Welty , J. R .
Engineering Heat Transfer
Ed. Wiley & Sons ; Nueva York 1974 .