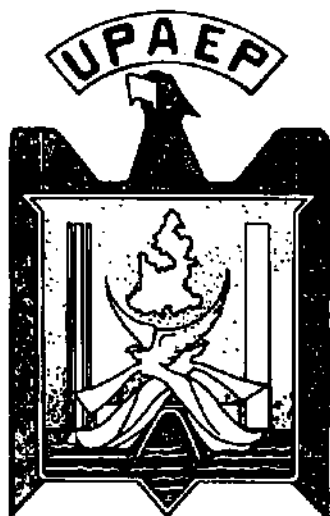




UPAEP
BIBLIOTECA CENTRAL
REFERENCIA



USO ÚNICAMENTE EN SALA.

**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE PUEBLA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO
PARA COMPARAR CONDUCTIVIDADES
TERMICAS DE MATERIALES AISLANTES
COMERCIALES PARA TUBERIAS.**

T E S I S

**PRESENTADA PARA OBTENER
EL TITULO DE**

INGENIERO QUIMICO

POR

MANUEL ALBERTO CARDENAS PANO

UPAEP
BIBLIOTECA CENTRAL
PUEBLA, PUE. RECIBIDO
18 ENE 1989
ADQUISICIONES



MAYO 1989



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, 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 de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

U N I V E R S I D A D P O P U L A R A U T O N O M A

D E L

E S T A D O D E P U E B L A

" D I S E Ñ O Y C O N S T R U C C I O N D E U N -
E Q U I P O P A R A C O M P A R A R C O N D U C T I -
V I D A D E S T E R M I C A S D E M A T E R I A L E S
A I S L A N T E S C O M E R C I A L E S P A R A T U -
B E R I A S "

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

POR:

62713

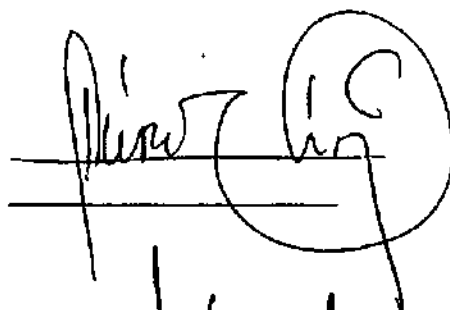
MANUEL ALBERTO CARDENAS PANO

ESTA TESIS FUE SUPERVISADA Y AUTORIZADA POR EL COMITE
DESIGNADO PARA EL CASO. POR LO CUAL, NO EXISTE NINGUN INCONVE-
NIENTE PARA QUE EL SR.:

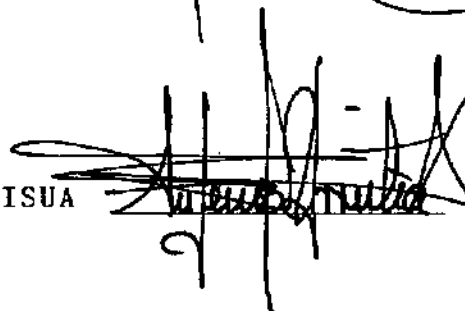
MANUEL ALBERTO CARDENAS PANO

PROMUEVA LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO QUIMICO.

ING. ADOLFO PEREZ DIAZ

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Adolfo Perez Diaz', written over two horizontal lines. To the right of the signature is a large, hand-drawn circle containing the letters 'IC'.

ING. EUGENIO URRUTIA ALBISUA

A complex, stylized handwritten signature in black ink, written over two horizontal lines. The signature is highly cursive and difficult to decipher.

PUEBLA, PUE., MAYO DE 1989

D E D I C A T O R I A S

EL PRESENTE TRABAJO ESTA DEDICADO A:

- * MIS PADRES, QUIENES ME HAN DADO EL CARIÑO Y APOYO NECESARIOS PARA FORJARME COMO PROFESIONISTA:

SR. ALONSO CARDENAS HERNANDEZ

SRA. CLEMENTINA PANO DE CARDENAS

- * MIS HERMANOS:

ALONSO, ERNESTO, CLEMENTINA Y ALEJANDRA.

- * A MI FAMILIA.

- * A MI ABUELITA: CARMEN.

- * A MI NOVIA: MARIA ELENA.

- * A NORMA. GERARDO, OSCAR, Y MAURICIO, CON QUIENES PASE - MOMENTOS AGRADABLES Y POR SU AMISTAD.

- * A TODOS Y CADA UNO DE MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS, QUE FUERON UNA AGRADABLE COMPAÑIA DENTRO Y FUERA DE LA UNIVERSIDAD.

A G R A D E C I M I E N T O S

* A LA UNIVERSIDAD POPULAR AUTONOMA DEL ESTADO DE PUEBLA
POR LA FORMACION INTEGRAL QUE ME DIO.

* AL GRUPO I.D.E.S.A., POR HABERME AYUDADO A REALIZAR -
MIS PRACTICAS PROFESIONALES, EN ESPECIAL A:

ING. HECTOR GRAFF GRAFF

ING. ALEJANDRO FRAGA A.

* AL ING. ADOLFO PEREZ DIAZ, POR SU APOYO EN LA ELABORA-
CION DEL PRESENTE TRABAJO.

* A AISLAMIENTOS PANAMERICANOS S.A., POR LA INFORMACION-
Y AYUDA PRESTADA.

* A TODAS Y CADA UNA DE LAS PERSONAS QUE CONTRIBUYERON -
DESINTERESADAMENTE EN LA REALIZACION DE ESTA TESIS.

C O N T E N I D O

	PAG.
PORTADA.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
CONTENIDO.....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS.....	vi
OBJETIVOS.....	1
INTRODUCCION.....	4
 I TRANSFERENCIA DE CALOR.....	 7
GENERALIDADES.....	8
1.1 CONDUCCION.....	9
1.2 CONVECCION.....	15
1.3 RADIACION.....	22
1.4 CONDUCTIVIDAD TERMICA.....	30
 II AISLAMIENTOS TERMICOS.....	 40
2.1 DEFINICION Y PROPIEDADES.....	41
2.2 TIPOS Y CLASIFICACION.....	42
2.2.1 ALTAS TEMPERATURAS.....	44
2.2.2 BAJAS TEMPERATURAS.....	51
2.3 USOS Y APLICACIONES.....	53
2.4 BENEFICIOS DEL AISLANTE TERMICO.....	55
2.5 SISTEMAS DE APLICACION.....	57

III	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....	59
IV	OPERACION DEL EQUIPO.....	63
V	PRUEBAS Y DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA.....	68
5.1	VITROFORM.....	69
5.2	PAMSIL.....	74
5.3	VERMICULITA.....	78
5.4	DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD - TERMICA DEL MATERIAL QUE CONSTITUYE- EL AISLAMIENTO.....	92
VI	ANALISIS ECONOMICO DE LAS PRUEBAS REALIZA-- DAS.....	114
6.1	CONDUCCION DE CALOR A TRAVES DE TUBE- RIAS.....	115
6.2	PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE TUBE -- RIAS.....	117
	CONCLUSIONES.....	137
	BIBLIOGRAFIA.....	139

INDICE DE FIGURAS

	PAG.
1.1 FLUJO DE CALOR A TRAVES DE UNA PARED.....	9
1.2 FLUJO DE CALOR UNIDIRECCIONAL.....	12
1.3 GRADIENTES DE TEMPERATURA EN CONVECCION FORZADA	16
1.4 CORRELACION PARA CONVECCION FORZADA Y NUMEROS - DE REYNOLDS BAJOS.....	20
1.5 CORRELACION PARA FLUIDOS QUE SE MUEVEN FORMANDO ANGULO RECTO CON BANCOS DE TUBOS.....	21
1.6 INTENSIDAD DE RADIACION MONOCROMATICA PARA UN - CUERPO CALIENTE A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	23
1.7 RADIACION ENTRE DOS PLACAS.....	26
1.8 RADIACION ENTRE DOS PLANOS PARALELOS.....	29
1.9 RADIACION ENTRE UN ELEMENTO Y UN PLANO PARALELO	29
1.10 RADIACION ENTRE PLANOS PERPENDICULARES.....	30
1.11 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS METALES.....	32
1.12 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS ALEACIONES.....	33
1.13 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE MATERIALES AISLANTES..	33
1.14 ANALOGO ELECTRICO.....	34
1.15 ESQUEMA DE UNA PARED COMPUESTA.....	38
3.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO.....	60 a
3.2 DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER.....	60 b
4.1 OPERACION DEL EQUIPO A 9 V, VOLTAJE ALTO.....	65 a
4.2 OPERACION DEL EQUIPO A 9 V, VOLTAJE BAJO.....	65 b

I N D I C E D E F I G U R A S

	PAG.
4.3 OPERACION DEL EQUIPO A 6 V, VOLTAJE ALTO.....	65 c
4.4 OPERACION DEL EQUIPO A 6 V, VOLTAJE BAJO.....	65 d
5.1 VITROFORM.....	69
5.2 SISTEMA DE INSTALACION DEL PAMSIL.....	77
6.1 FLUJO DE CALOR A TRAVES DE LA PARED DE UN TUBO.	115
6.2 PERDIDA DE CALOR DE UN TUBO AISLADO.....	117
6.3 VALORES DE ($f_c + f_r$) PARA CALCULO DE PERDIDA DE CALOR EN TUBERÍAS DE HIERRO SIN AISLAMIENTO....	119
6.4 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION Y RADIA-- CION DE TUBOS HORIZONTALES A TEMPERATURAS t , A- AIRE A 70°F.....	120
6.5 EL RADIO CRITICO.....	122

I N D I C E D E T A B L A S

	PAG.
1.1 RELACION DE h PARA N FILAS DE PROFUNDIDAD DE h- PARA 10 FILAS DE PROFUNDIDAD.....	21
1.2 VALORES DE F_A Y F_t	28
1.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DIVERSOS MATERIALES...	31
1.4 VALORES REPRESENTATIVOS DE LA CONDUCTIVIDAD -- TÉRMICA.....	36
2.1 TIPOS DE AISLANTES Y APLICACIONES.....	43
5.1 MEDIDAS DE VITROFORM PARA TUBERIAS DE COBRE....	71
5.2 PROPIEDADES DE LAS FORMAS DE SILICE Y DE LOS - MINERALES DE SILICATOS.....	81
5.3 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN - LA PRIMERA PRUEBA A 3.50 V Y 2.43 A.....	97
5.4 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN - LA SEGUNDA PRUEBA A 5.50 V Y 3.43 A.....	98
5.5 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN - LA TERCERA PRUEBA A 7.33 V Y 4.5 A.....	99
5.6 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA PRIME <u>R</u> A PRUEBA A 3.50 V Y 2.42 A.....	100
5.7 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA SEGU <u>N</u> DA PRUEBA A 5.40 V Y 3.50 A.....	101
5.8 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA TERCE <u>R</u> A PRUEBA A 7.5 V Y 4.6 A.....	102

I N D I C E D E T A B L A S

PÁG.

5.9	TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL VITROFORM EN LA - PRIMERA PRUEBA A 2.5 V Y 1.8 A.....	103
5.10	TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL VITROFORM EN LA - SEGUNDA PRUEBA A 3.50 V Y 2.42 A.....	104
5.11	CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERMICULITA EN LA - PRIMERA PRUEBA.....	105
5.12	CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERMICULITA EN LA - SEGUNDA PRUEBA.....	106
5.13	CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERMICULITA EN LA - TERCERA PRUEBA.....	107
5.14	CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL PAMSIL EN LA PRIMERA- PRUEBA.....	108
5.15	CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL PAMSIL EN LA SEGUNDA- PRUEBA.....	109
5.16	CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL PAMSIL EN LA TERCERA- PRUEBA.....	110
5.17	CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL VITROFORM EN LA PRIME <u>R</u> A PRUEBA.....	111
5.18	CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL VITROFORM EN LA SEGU <u>N</u> DA PRUEBA.....	112
5.19	TABULACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS - PRUEBAS.....	113
6.1	VALORES OBTENIDOS DEL ANALISIS ECONÓMICO.....	134
6.2	COSTO TOTAL DEL EQUIPO.....	135

O R J E T I V O S

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es construir un equipo para comparar la eficiencia de diversos aislamientos térmicos para tuberías, que se emplean comúnmente en la industria, tales como el-VITROFORM, PAMSIL y VERMICULITA.

El equipo consiste de un tubo de vidrio, en cuyo interior se coloca una resistencia, a través de la cual se hace pasar una corriente eléctrica. El calor suministrado por la resistencia pasa a través del tubo, calentando así el aislante que está colocado sobre él mismo. A partir, de la corriente eléctrica suministrada, se calcula el flujo de calor, y conociendo la diferencia de temperaturas, el radio, el espesor y la longitud del aislamiento, se podrá calcular la conductividad térmica de cada uno de los materiales ensayados. Estas pruebas se realizan simulando condiciones de operación normal, para una tubería de 3/4" cédula 40, que conduce vapor saturado desde 1 hasta 40 Kg/cm².

Los valores de la conductividad térmica determinados, tal vez no se ajusten a los datos del fabricante, porque existen limitaciones en la operación del equipo, debido a: pérdidas de flujo de calor; errores en la medición de la temperatura, por la variación de la temperatura ambiente; errores en la lectura de los medidores de tablero, por falta de exactitud; y espacios libres entre el material aislante y la superficie del tubo. Es por esto que, los valores obtenidos serán típicos.

Por otra parte, dado que este equipo será utilizado en la Escuela de Ingeniería Química, de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, los estudiantes de la misma podrán realizar estudios de investigación, que les ayudará a comprender mejor el fenómeno de la Transferencia de Calor. Además de que, se podrá conocer el comportamiento de los aislamientos térmicos, bajo cier

tas condiciones de operación. Por lo cual, será una aportación - de gran importancia para las industrias dedicadas a la manufactura de aislamientos térmicos, así como también a sus usuarios, ya que les ayudará a conocer ciertas características de estos materiales.

I N T R O D U C C I O N

INTRODUCCION

A través del desarrollo de la humanidad, el hombre ha buscado utilizar diversas formas de energía para su crecimiento económico, tecnológico y de bienestar. Habiéndose efectuado grandes cambios en la revolución industrial, los cuales han traído como consecuencia beneficios en la utilización de la misma, creando máquinas que cada vez presentan más exigencias en relación con el energético que las mueve.

En una perspectiva global, puede decirse que los combustibles fósiles, los hidrocarburos derivados del petróleo y del gas natural principalmente, y el carbón mineral en menor proporción, soportan la gran demanda de energía. Aproximadamente los hidrocarburos proporcionan el 69% de los requerimientos totales de energía del mundo, el carbón el 30.5% y los recursos geotérmicos y otros, contribuyen con apenas el 0.5% (20). Los pronósticos de los estudiosos en esta materia, indican que este panorama en un futuro próximo se agravará, pudiendo llegar la dependencia de los hidrocarburos hasta el 75%, no obstante crecerá la participación de la energía producida en los reactores nucleares. A largo plazo se preveé que el carbón reemplazará, con gran medida, al petróleo y que la principal fuente de energía será el átomo.

Como consecuencia lógica del consumo masivo de estos recursos no-renovables, se ha suscitado un fenómeno socio-económico que se conoce como "crisis de energéticos", que ha traído la insuficiencia en el abastecimiento contra una demanda que día a día crece desmesuradamente.

Considerando además que, el costo de la energía es usualmente un alto porcentaje del costo de fabricación, llegando en algunos casos hasta un 23% del costo total de operación de una indus-

tria. Entonces será necesario el aprovechamiento adecuado de los energéticos, eliminando las pérdidas, de tal modo que, se haga - posible utilizar nuestras reservas energéticas con mayor eficiencia (6).

Dentro del campo del uso adecuado de la energía térmica, a través de tuberías que conducen un fluido frío o caliente en su interior, se han encontrado materiales con ciertas características y propiedades (conductividad térmica, calor específico, densidad, temperatura de operación, etc.), que al ser instaladas como recubrimiento sobre éstas, ayudan a evitar grandes pérdidas de energía, hacia el medio ambiente. Estos materiales se conocen como aislantes térmicos, que se encuentran fácilmente disponibles en el mercado nacional, en diferentes composiciones y medidas, para varios usos dentro de la industria. Hoy en día, estos materiales pueden salvar del 10 al 20% del costo del combustible para producir energía térmica, por lo que su uso se ha incrementado de su tradicional 2% de los costos totales de la construcción de una planta a un rango del 4 al 8% (6). De aquí que, surge la importancia de reconocer y entender el comportamiento y propiedades de los diversos aislantes térmicos.

Es por esto que, el presente trabajo tiene como finalidad, la aportación de un equipo que sea utilizado para comparar el comportamiento de diferentes tipos de aislantes, en determinadas condiciones de operación; trayendo como consecuencia una selección más adecuada para su aplicación, de acuerdo a las propiedades específicas aquí determinadas.

C A P I T U L O I
" G E N E R A L I D A D E S "

GENERALIDADES

El calor es energía en tránsito debido a la diferencia de temperaturas. La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos, llamados fuente y receptor. El estudio de la termodinámica se ocupa de la conservación de energía, es decir, de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia (10). La ciencia de la transferencia de calor no solo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones especificadas.

Con la comprensión de la naturaleza del calor nuestro estudio de la transferencia de calor se facilitará grandemente. Para ello, comenzaremos con el estudio de información básica sobre unos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida y gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida, -- las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez. En la fase líquida, existe suficiente energía térmica para extender la distancia entre las moléculas adyacentes, de manera que se pierde rigidez. En la fase gaseosa, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

Para una misma sustancia en sus diferentes fases, sus varias propiedades térmicas tienen diferente orden de magnitud. Por ejemplo, el calor específico por unidad de masa es muy bajo para los sólidos, alto para los líquidos y, usualmente, de valores intermedios para los gases.

Ahora bien, existen tres métodos diferentes por los cuales se puede realizar la transferencia de calor, los cuales son:

CONDUCCION, CONVECCION Y RADIACION.

1.1 CONDUCCION

La conducción es el mecanismo por medio del cual el calor se transfiere de un material fijo mediante el movimiento de sus moléculas o átomos sin que exista mezcla (4). El primero en predecir este fenómeno fué el matemático francés Fourier (1882), que propuso la ley que hoy se conoce como ley de la conducción de calor (12). Dicha ley predice que en cualquier sistema donde se involucre un flujo, ya sea de calor, de fluido o de electricidad, la cantidad que fluye será directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, ó,

$$\text{flujo} \propto \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}} \quad (1.1)$$

En la conducción el flujo de calor pasa a través de un material fijo, tal como la pared mostrada en la Fig. 1.1 La dirección del flujo de calor será a angulos rectos a la pared, si las-

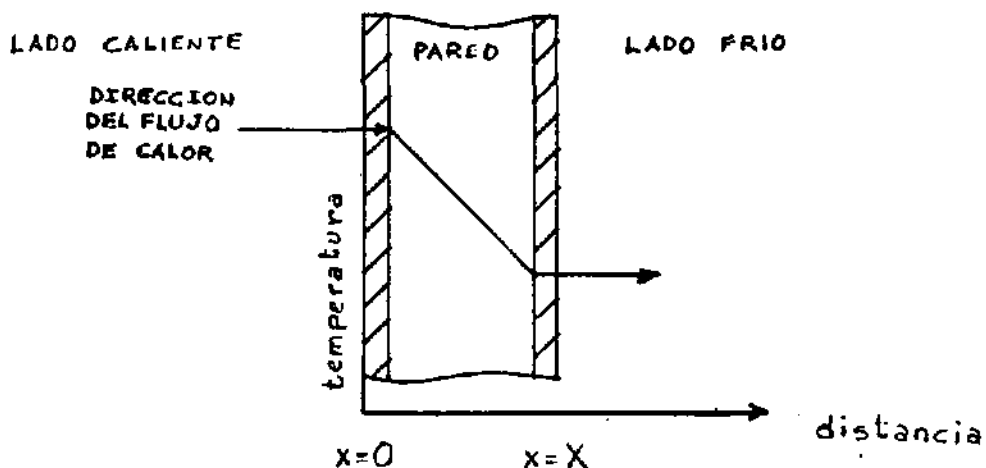


Fig. 1.1 Flujo de calor a través de una pared. (9)

superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico.

Supóngase que existe una fuente de calor a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. El flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared A . Si t es la temperatura de la pared en cualquier punto y x es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor dQ es dada por

$$dQ = kA(-dt/dx) \quad \text{Btu/hr} \quad (1.2)$$

El término $(-dt/dx)$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara donde $x=0$ y menor en la cara donde $x=X$. Es decir, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura dt que impulsa el calor a través de la pared de espesor dx . La constante de proporcionalidad k es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica. Esta conductividad se evalúa experimentalmente y existen materiales que son buenos conductores de calor, mientras que, otros son malos conductores (9), estos últimos se conocen como aislantes.

En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a cabo por efecto de la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías, por lo que necesariamente existe una resistencia al flujo de calor. La conductancia es la recíproca de la resistencia al flujo de calor, y la Ec. 1.1 se puede expresar como

$$\text{flujo} \propto \text{conductancia} \times \text{potencial} \quad (1.3)$$

Suponiendo una cantidad de calor conocida Q' Btu que se ---

transmite por una pared de tamaño desconocido en un intervalo de tiempo θ h con una diferencia de temperatura medida Δt °F, y la Ec. 1.3 se escribe

$$Q = \frac{Q'}{\theta} = \text{conductancia} \times \Delta t \quad \text{Btu/h} \quad (1.4)$$

De la Ec. 1.4, la conductancia tiene las dimensiones de Btu/h °F. Cuando la conductancia se reporta para una cantidad de un pie de grueso con un área de flujo de un pie², la unidad de tiempo 1 hr y la diferencia de temperatura 1 °F, se llama conductividad térmica, k . Para una pared de grueso L y área A , la correlación entre la conductividad térmica y la conductancia, esta dada por

$$\text{conductancia} = k(A/L)$$

y

$$Q' / \theta = k(A/L) \Delta t \quad (1.5)$$

donde

$$k = \text{Btu} / (\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F})/(\text{pie})$$

derivando

$$dQ' / d\theta = k dA(dt/dx) \quad (1.6)$$

Considerando un cubo de volumen $dv=dx \cdot dy \cdot dz$, como la Fig. 1.2 recibe una cantidad de calor $dQ1'$ Btu a través de su cara izquierda yz , en un intervalo de tiempo $d\theta$. Supóngase que todas las caras menos la izquierda y derecha yz , están aisladas. En el mismo intervalo de tiempo, la cantidad de calor $dQ2'$ abandona el lado derecho, y haciendo un balance de calor tenemos

$$dQ' = dQ1' - dQ2' \quad (1.7)$$

De acuerdo al Ec. 1.6, el calor que entra al volumen es

$$dQ1' / d\theta = k dy dz (-\partial t / \partial x) \quad (1.8)$$

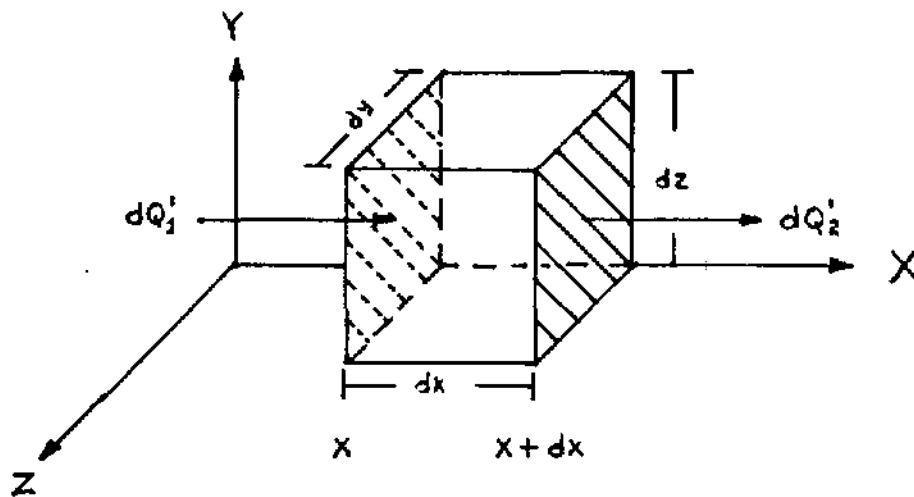


Fig. 1.2 Flujo de calor unidireccional. (9)

El gradiente de temperatura $(-\partial t / \partial x)$ puede variar, ya sea con el tiempo o la posición del cubo. Esta variación de posición estará dada por la función $f(x) = \partial (\partial t / \partial x) / \partial x$, sobre la distancia dx comprendida de x a $x + dx$, y si $dQ_2' > dQ_1'$, el cambio total será

$$f(x) = - \frac{\partial (\partial t / \partial x)}{\partial x} dx \quad \text{ó} \quad - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx$$

Entonces a x el gradiente es $-\partial t / \partial x$, y a $x + dx$ el gradiente de temperatura es

$$- \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx$$

dQ_2' a la salida del cubo y en la misma forma que la Ec. 1.8 será

$$\frac{dQ_2'}{d\theta} = k \, dy \, dz \left[- \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right] \quad (1.9)$$

Sustituyendo Ecs. 1.8 y 1.9 en la 1.7, tenemos

$$\frac{dQ'}{d\theta} = k \, dy \, dz \left(-\frac{\partial t}{\partial x} \right) - k \, dy \, dz \left(-\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right)$$

Resumiendo

$$\frac{dQ'}{d\theta} = k \, dy \, dz \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) dx \quad (1.10)$$

El cubo habrá cambiado en temperatura - dt grados. El cambio de temperatura por unidad de tiempo será dt/dθ, el cual para el intervalo de tiempo dθ será (dt/dθ)dθ grados. Para elevar el volumen dx dy dz es necesario definir el calor específico volumétrico, - Cv Btu/(pie³)(°F), obtenido multiplicando el calor específico C - Btu/(lb)(°F) por la densidad ρ (lb/pie³), así tenemos que

$$\frac{dQ'}{d\theta} = c \, \rho \, dx \, dy \, dz \left(\frac{\partial t}{\partial \theta} \right) \quad (1.11)$$

Combinando 1.10 y 1.11

$$c \, \rho \, dx \, dy \, dz \frac{\partial t}{\partial \theta} = k \, dy \, dz \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) dx \quad (1.12)$$

de donde:

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{k}{c \, \rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1.13)$$

La Ec. 1.13 nos representa la ley general de Fourier para flujo de calor a través del eje X. Si la transferencia de calor es a través de los ejes X,Y,Z, la Ec. 1.13 se transforma

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{k}{c \, \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1.14)$$

Considerando un estado estable, t no varía con el tiempo, y $dt/d\theta$ es igual a cero. $\partial t/\partial x$ es una constante y $\partial^2 t/\partial x^2 = 0$. dQ_1' es igual a dQ_2' y la Ec. 1.9 se reduce a Ec. 1.5, donde $dx dy = dA$. Sustituyendo dQ por $dQ'/d\theta$, ambos términos tienen las dimensiones de Btu/h, la ecuación del estado estable es:

$$dQ = k dA (dt/dx)$$

integrando obtenemos la ecuación general de transmisión de calor por conducción

$$Q = \frac{kA}{L} \Delta t \quad (1.15)$$

El objetivo final de la conducción de calor es predecir la historia de la distribución de temperatura instantánea y/o el modelo de temperatura fija dentro de un cuerpo expuesto a un ambiente cuyas temperaturas difieren de las que el sólido está conduciendo. Una vez que esta respuesta de la temperatura del cuerpo es calculada otra información tales como el flujo de calor interno y de superficie, el incremento térmico y los esfuerzos térmicos pueden ser derivados (19).

El cálculo de la temperatura del material es necesario como un primer paso en la selección de materiales y en el diseño de estructuras que operan a niveles de temperatura limitadas o elevadas durante su vida de servicio. Para estructuras sin aislamiento, las predicciones del componente de temperatura son necesarios para: determinar si la estructura sobrevivirá térmicamente; para calcular el flujo de calor a través de la estructura al elemento adyacente o equipos que pueden ser termosensibles; para evaluar los efectos en la integridad estructural de esfuerzos térmicos sobrepuestos en esfuerzos mecánicos debido a la presión, vibración, acústico y otras cargas aplicadas.

Hay numerosas complicaciones sobre la predicción de la conducción de calor en sistemas prácticos. Estos problemas incluyen límites de condiciones ambientales, el requerimiento de la complicación de la geometría del cuerpo, y la necesidad de flexibilidad en el análisis de una variedad de materiales que se desvían ampliamente del concepto de simple conductor de calor isotrópico de propiedades constantes. De aquí que en nuestro estudio realizaremos una comparación sobre diferentes aislamientos térmicos utilizados en la industria.

1.2 CONVECCION

La convección es el mecanismo mediante el cual el calor se transmite por mezcla de las partes calientes con las frías de un mismo material. Este fenómeno está restringido al caso de fluidos y puede ser de dos tipos:

- a) CONVECCION NATURAL.- En este tipo la mezcla se produce por el ascenso del fluido caliente al disminuir su densidad y el descenso del fluido frío por tener densidad mayor al fluido-caliente.
- b) CONVECCION FORZADA.- Aquí, la mezcla se produce por medio de una fuerza externa, tal como la agitación mecánica, bombeo del fluido, etc.

La transmisión de calor por convección puede ser descrita por la ecuación de Fourier

$$dQ = hAdt. \quad (1.16)$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación y debe ser evaluado experimentalmente (9). Se llama coeficiente-

de transferencia de calor. Esta ecuación integrada representa la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = h A (T_2 - T_1) \quad (1.17)$$

Consideremos dos fluidos, uno caliente y otro frío, puestos en contacto por medio de una pared metálica (2), como se muestra en la Fig. 1.3. Esta figura representa los gradientes de temperatura

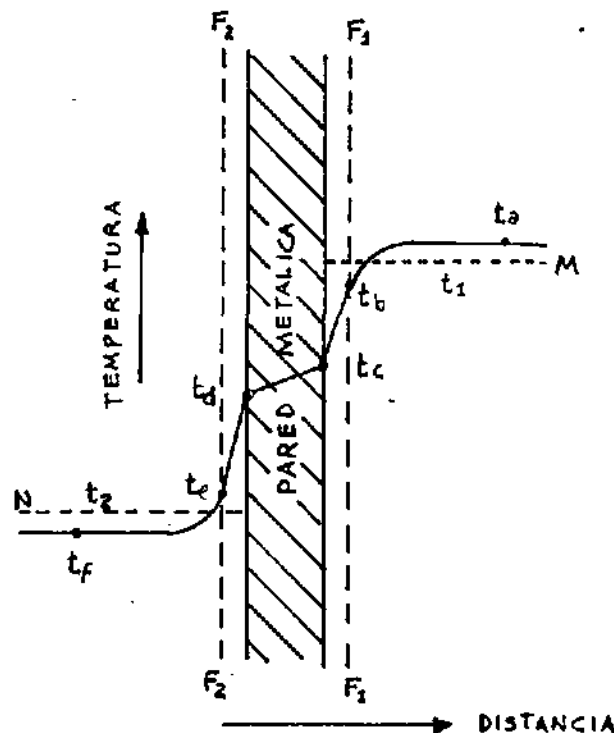


Fig. 1.3 Gradientes de temperatura en convección forzada.(2)

tura para el caso en que el valor se transmite desde un fluido caliente a través de una pared metálica al interior de un fluido frío. Las líneas de puntos F_1F_1 y F_2F_2 , representan los límites de las películas en flujo laminar, y todas las partes situadas a la derecha de F_1F_1 e izquierda de F_2F_2 están en régimen turbulento. El gradiente de temperatura desde el interior de la masa del fluido caliente hasta la pared metálica, está representada por la línea curva $tatbtc$. La temperatura t_a es la máxima temperatura en-

el fluido caliente; t_b , la temperatura en el límite entre las regiones de régimen turbulento y laminar, y la temperatura t_c es la temperatura en la cara de separación entre el fluido y la pared metálica. La significación de t_d , t_e , t_f es similar.

En los cálculos de transferencia de calor se toma la temperatura media del fluido, tal como se obtendría si se mezclase completamente y se tomase su temperatura. Esta temperatura media t_1 está indicada por la línea MM. El mismo razonamiento se sigue en el fluido frío, cuya temperatura media t_2 está representada por la línea NN. Si el fluido no es viscoso y la tubería no tiene gran diámetro, esta temperatura media es una de las que se pueden tomar si se inserta un termómetro en la tubería y su bulbo está próximo al centro de la corriente del fluido. Para determinar el curso real de la curva $t_a t_b t_c$, es necesario efectuar medidas exactas con termopares muy finos. El gradiente de temperatura $t_d t_e$ está originado por el calor transmitido en conducción pura, normalmente a través de un material cuya conductividad térmica es conocida y en la mayor parte de los casos es una pequeña fracción de la diferencia total de temperatura $t_a t_f$.

En la Fig. 1.3 supongamos que Q kcal/h pasan del fluido caliente a la pared metálica y de ésta al fluido frío. Sea A_1 el área de la pared metálica por el lado del fluido caliente, perpendicular al flujo de calor; el área del lado frío A_2 ; y el área media de la pared metálica, A_m . El coeficiente de superficie en el lado caliente se define por la relación

$$h_1 = \frac{Q}{A_1 (t_1 - t_c)} \quad (1.18)$$

donde $1/h_1 A_1$ es una resistencia térmica del lado del fluido caliente.

En la misma forma del lado del fluido frío, será:

$$h_2 = \frac{Q}{A_2 (t_d - t_2)} \quad (1.19)$$

Así que podemos considerar la Fig. 1.3, formada por tres resistencias en serie: primero, la resistencia del lado caliente, $1/h_1 A_1$; segundo, la resistencia de la pared metálica, L/kAm ; y tercero, - la resistencia en el lado frío, $1/h_2 A_2$. Sabiendo que la ecuación de flujo de calor en una pared con tres resistencias está dada - por

$$Q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.20)$$

relacionando con la Ec. 1.20 tenemos

$$Q = \frac{\Delta t \text{ (total)}}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{L}{kAm} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad (1.21)$$

Una vez conocida la ecuación que determina el flujo de calor es necesario conocer los coeficientes individuales de película h .

La ecuación que sirva para predecir los valores numéricos de tales coeficientes, debe incluir:

- a) Todas las propiedades del fluido.
- b) Todas las condiciones del flujo.

En forma general estas dos condiciones son tales como: diámetro de tubería, velocidad del flujo, densidad, viscosidad, calor-específico, etc.

Experimentalmente y utilizando el análisis dimensional se ha llegado a determinar ecuaciones por medio de las cuales, obtenemos los valores de los coeficientes individuales de transmisión, -

los cuales pueden ser:

1.- ECUACION DE DITTUS - BOELTER

Esta ecuación nos sirve para fluidos como aire y otros gases; para agua, hidrocarburos y varios líquidos orgánicos (15); y para fluidos en movimiento turbulento por el interior de tuberías de sección circular y bajo números de Reynolds desde 10,000 hasta 500,000, con números de Prandtl desde 0.73 a 95.

$$h = 0.023 \frac{k}{D} \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_v}{k} \right)^{0.4} \quad (1.22)$$

Para la región de números de Reynolds comprendida entre 2,100 y 10,000, es necesario introducir un grupo adimensional, a saber: la relación de la viscosidad a la temperatura de la superficie de la pared, μ_s , a la viscosidad a la temperatura de la masa, μ , elevada a un exponente igual a 0.14; con lo que la Ec. 1.22 se transforma en:

$$\left(\frac{hD}{k} \right) \left(\frac{\mu_s}{\mu} \right)^{0.14} \left(\frac{C\mu}{k} \right)^{-0.33} = f \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right) \quad (1.23)$$

donde el valor de $f(Dv\rho/\mu)$ se toma de la Fig. 1.4, obtenida al graficar la función $f(Dv\rho/\mu)$ contra DG/μ , en la cual al disminuir el número de Reynolds los valores se dispersan por la influencia del término L/D .

2.- ECUACION DE ULSAMER (2)

Esta ecuación es conveniente para fluidos en convección forzada por el exterior de un solo tubo y formando un ángulo recto con el eje del mismo, y puede ser:

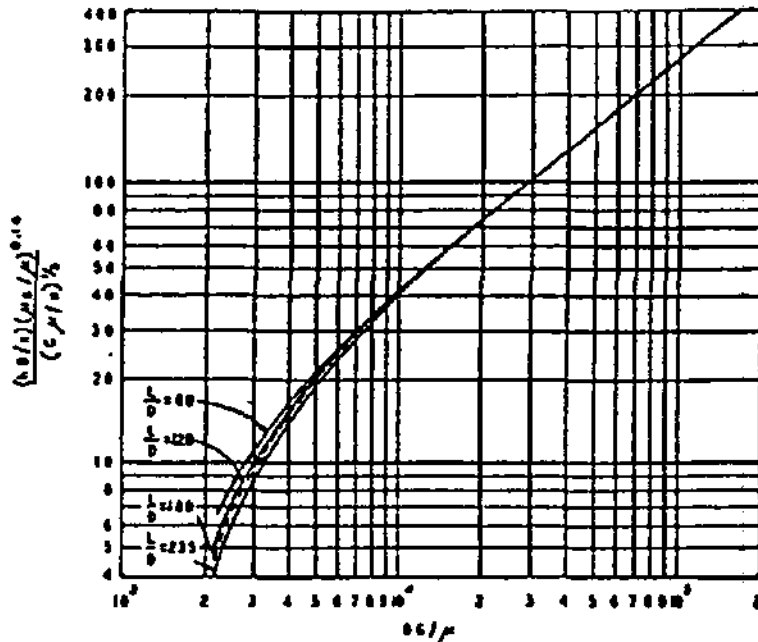


Fig. 1.4 Correlación para convección forzada y números de Reynolds bajos. (2)

* Para número de Reynolds de 0.1 a 50

$$\left(\frac{hD}{k_f} \right) = 0.91 \left(\frac{DG}{\mu_f} \right)^{0.0385} \left(\frac{D\mu_f}{k_f} \right)^{0.31} \quad (1.24)$$

* Para número de Reynolds de 50 a 10,000

$$\left(\frac{hD}{k_f} \right) = 0.60 \left(\frac{DG}{\mu_f} \right)^{0.50} \left(\frac{D\mu_f}{k_f} \right)^{0.31} \quad (1.25)$$

Donde el subíndice f nos indica que estas propiedades han de evaluarse a la temperatura media de la película viscosa.

3.- ECUACION DE Mc ADAMS (15)

Esta ecuación tiene aplicación para fluidos de convección -- forzada, que fluyen en ángulo recto con el eje de un haz tubular de 10 filas o más.

$$\left(\frac{hD_o}{k_f} \right) \left(\frac{C\mu_f}{k_f} \right)^{0.33} = \phi \left(\frac{D_o G_{\max}}{\mu_f} \right) \quad (1.26)$$

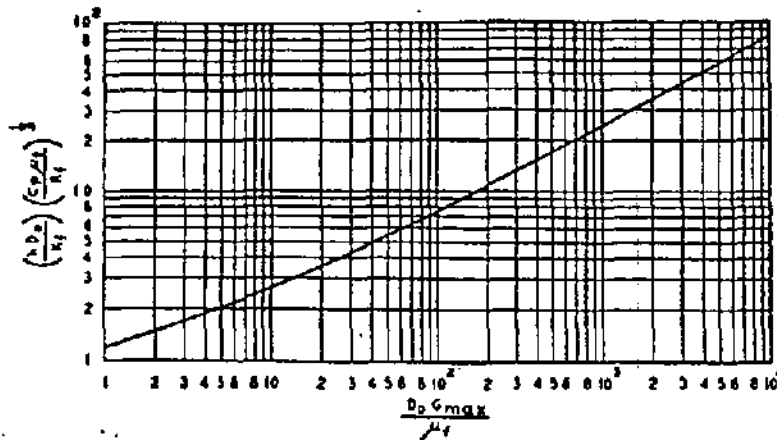


Fig. 1.5 Correlación para fluidos que se mueven formando ángulo recto con bancos de tubos (2)

En la que el valor de la función ϕ , se toma de la gráfica - de la Fig. 1.5. Para el caso de haces de tubos de menos de 10 filas, h se multiplica por el factor dado por la tabla 1.1

TABLA 1.1 Relación de h para N filas de profundidad a h para 10- filas de profundidad.

No. de filas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Relación para tubos al tres bolillo		0.73	0.82	0.88	0.91	0.94	0.96	0.98	0.99	1.0
Relación para tubos en línea	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	1.0

Así como estas ecuaciones podemos tener muchas más para casos específicos (15), pero no es tema de nuestro estudio, por lo que una vez obtenido el coeficiente individual de película, multipliquemos el numerador y el denominador de la Ec. 1.21 por A_1 , o sea, el área de la pared del lado del fluido caliente y obtendremos:

$$q = \frac{A_1 \Delta t}{1/h_1 + A_1/A_m k + A_1/h_2 k_2} \quad (1.27)$$

62713

Definiendo el coeficiente global de transferencia de calor U_1

$$U_1 = \frac{1}{1/h_1 + A_1 L/A_m k + A_1/h_2 k_2} \quad (1.28)$$

y comparando la Ec. 1.28 con la Ec. 1.27, se deduce que:

$$Q = U_1 A_1 \Delta t \quad (1.29)$$

Esta es la ecuación general de transferencia de calor por convección, y establece que la cantidad de calor transferido es producto de tres factores:

- 1.- El coeficiente global de transmisión de calor.
- 2.- La caída de temperatura.
- 3.- El área de la superficie de calentamiento.

1.3 RADIACION

La radiación es el mecanismo por medio del cual el calor se transfiere a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas, cuya longitud de onda está comprendida en el intervalo de 0.8 a 400 micrones (2). La radiación térmica tiene la misma naturaleza que la luz, razón por la cual obedecerá las mismas leyes, es decir, se propaga en línea recta, se refleja en superficies, asimismo tendrá intensidad I y longitud de onda λ . La importancia de la radiación aumenta a medida que la temperatura aumenta.

La potencia emisiva es la cantidad total de energía radiante de todas las longitudes de onda emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo. La potencia emisiva total E , Btu/(h)(pie²), está dada por la Ec. 1.30

$$E = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (1.30)$$

Esta ecuación determina que el área bajo la curva de I_{λ} vs. λ , donde $\lambda=0$ hasta $\lambda=\infty$, es la potencia emisiva total E (9), esta curva se muestra en la Fig. 1.6 y está dada por la Ec. 1.31

$$I_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (1.31)$$

donde I_{λ} = intensidad de emisión monocromática, Btu/(h)(pie²)-(micrón).

λ = longitud de onda, micrones.

C_1 y C_2 = constantes equivalentes: 1.16×10^8 y 25,740, respectivamente.

T = temperatura del cuerpo, °R.

Partiendo de la Ec. 1.31, y sustituyendo en la Ec. 1.30, a temperatura fija, tenemos que:

$$E = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (1.32)$$

Considerando;

$$x = C_2 / \lambda T$$

$$\lambda = C_2 / Tx$$

$$d\lambda = (-C_2 / Tx^2) dx$$

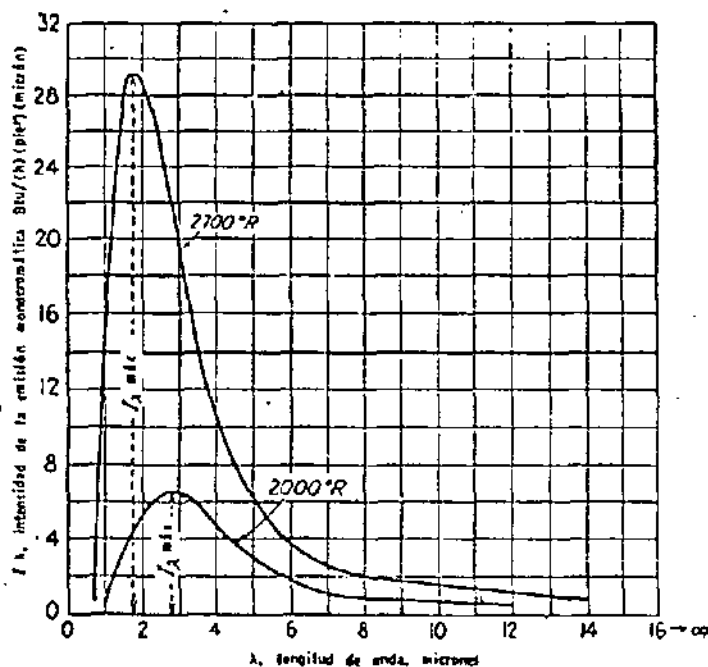


FIG. 1.6 Intensidad de radiación monocromática para un cuerpo caliente a diferentes temperaturas (9)

Entonces:

$$E_b = - \frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_0^{\infty} x^3 (e^x - 1)^{-1} dx \quad (1.33)$$

Desarrollando el término en paréntesis

$$E_b = - \frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_0^{\infty} x^3 (e^{-x} + e^{-2x} + e^{-3x} + e^{-4x} + \dots) dx \quad (1.34)$$

Integrando cada término y sumando solamente los primeros cuatro:

$$E_b = \frac{C_1 T^4}{C_2^4} \times 6.44 \quad (1.35)$$

Evaluando constantes:

$$E_b = 0.173 \times 10^{-8} T^4 \quad (1.36)$$

La Ec. 1.36, es el área bajo la curva de la Fig. 1.6 de $\lambda=0$ a $\lambda=\infty$ y establece que la radiación total de un cuerpo negro perfecto es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Esto se conoce como la Ley de Stefan-Boltzman. La constante 0.0173×10^{-8} Btu/(h)(pie²)(°R⁴), se conoce como la constante de Stefan-Boltzman, designada comúnmente por σ . Para un cuerpo cualquiera, cuya emisividad está dada por E/E_b y conociendo que $E = E_b$. La Ec. 1.36 se transforma

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.37)$$

y

$$Q/A = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.38)$$

La Ec. 1.38 representa la transmisión de calor por radiación y representa variaciones según la disposición de los cuerpos dona

dor y receptor (9).

1.- Para dos planos extensos paralelos:

$$\frac{Q}{A} = 0.173 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1.39)$$

2.- Para dos planos con diferentes emisividades:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.40)$$

3.- Para dos planos con una placa interceptora:

$$\frac{Q_1}{A} = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \frac{1}{2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.41)$$

4.- Para esferas con forros concéntricos:

$$Q = \frac{\sigma A_1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.42)$$

5.- Para cilindros con forros concéntricos:

$$Q = \frac{\sigma A_1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.43)$$

Ahora consideremos dos placas radiantes a temperaturas T_1 y T_2 , como se muestra en la Fig. 1.7. Las dos placas no están una frente a la otra, y por lo mismo tienen una vista oblicua una de la otra. La placa interior presentada isométricamente en el plano horizontal, radía en todas las direcciones. Algo de la radia-

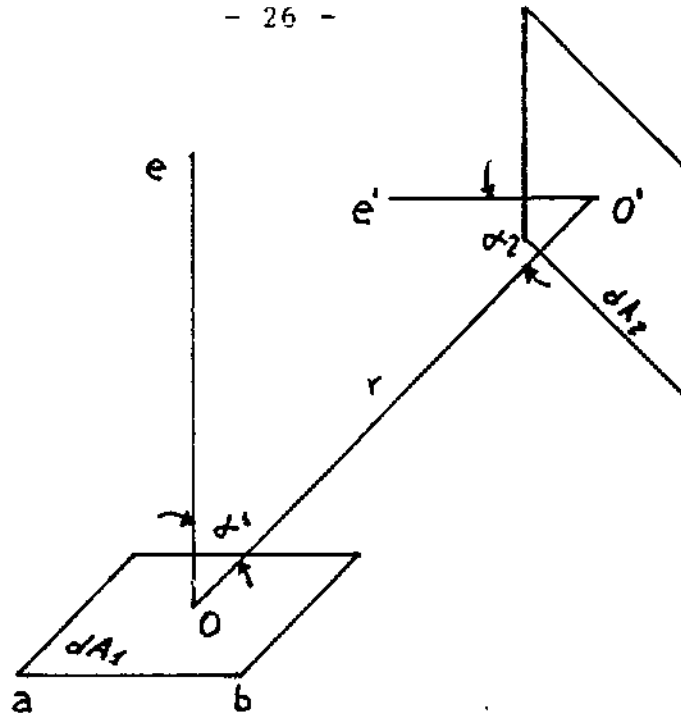


Fig. 1.7 Radiación entre dos placas. (9)

ción de la placa dA_1 cae en la placa dA_2 , que reflejará algo de energía incidente y una parte regresará nuevamente a la placa dA_1 . La línea más corta que une los centros O y O' es r . La imagen de dA_1 reflejada será $dA_1' = dA_1 \cos \alpha_1$; para la placa dA_2 será $dA_2' = dA_2 \cos \alpha_2$. Si ambos son cuerpos negros, la radiación de la placa 1 a la placa 2 es proporcional a la superficie normal ex puesta de cada una e inversamente al cuadrado de la distancia entre ellas, donde I_1 es la constante de proporcionalidad dimensionalmente igual a la intensidad de radiación, así tenemos

$$dQ_{1-2} = \frac{I_1}{r^2} dA_1' dA_2' \quad (1.44)$$

Sustituyendo, tenemos

$$dQ_{1-2} = \frac{I_1}{r^2} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 dA_1 dA_2 \quad (1.45)$$

Considerando

$$\begin{aligned} dW_1 &= \frac{dA_2'}{r^2} = \frac{r \sin \alpha d\beta r d\alpha}{r^2} \\ &= \sin \alpha d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (1.46)$$

De las Ecs. 1.44, 1.45 y 1.46

$$\frac{dQ}{dA} = E_b = I_1 \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha \int_0^{2\pi} d\beta \quad (1.47)$$

Desarrollando:

$$\frac{dQ}{dA} = I_1 \pi \quad \text{donde} \quad I_1 = \frac{E_b}{\pi} = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (1.48)$$

Sustituyendo la Ec. 1.48 en la Ec. 1.45

$$dQ = \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.49)$$

Donde

$$F_A = \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 dA_2}{\pi r^2} \quad (1.50)$$

El término F_A se denomina factor geométrico de configuración y - la EC. 1.49 integrándola queda

$$Q = F_A A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.51)$$

Si dos superficies son grises, no negras, la Ec. 1.40 queda

$$Q = \frac{F_A A_1 \sigma}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.52)$$

Considerando a F_E como factor de emisividad

$$F_E = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1}$$

$$Q = F_A F_E A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.53)$$

Del sumario dado en la tabla 1.2, y de las Figs. 1.8, 1.9 y 1.10, se toman los valores necesarios para el cálculo de Q en base a la Ec. 1.53, que es la ecuación para calcular la transferencia de calor por radiación.

TABLA 1.2 VALORES DE F_A Y F_E (9)

	F_A	F_E
(a) La superficie A_1 es pequeña comparada con la superficie envolvente A_2	1	ϵ_1
(b) Superficies A_1 y A_2 de discos paralelos, cuadrados, rectángulos 2:1, rectángulos largos	Fig. 1.8	$\epsilon_1 \epsilon_2$
(c) Superficie dA_1 y superficie rectangular paralela A_2 con una esquina del rectángulo sobre dA_1	Fig. 1.9	$\epsilon_1 \epsilon_2$
(d) Superficies A_1 o A_2 de rectángulos perpendiculares teniendo un lado común	Fig. 1.10	$\epsilon_1 \epsilon_2$
(e) Superficies A_1 y A_2 de planos paralelos infinitos o superficie A_1 de un cuerpo completamente encerrado que es pequeño comparado con A_2	1	$\frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2}\right) - 1}$
(f) Esferas concéntricas o cilindros concéntricos infinitos con superficies A_1 y A_2	1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$

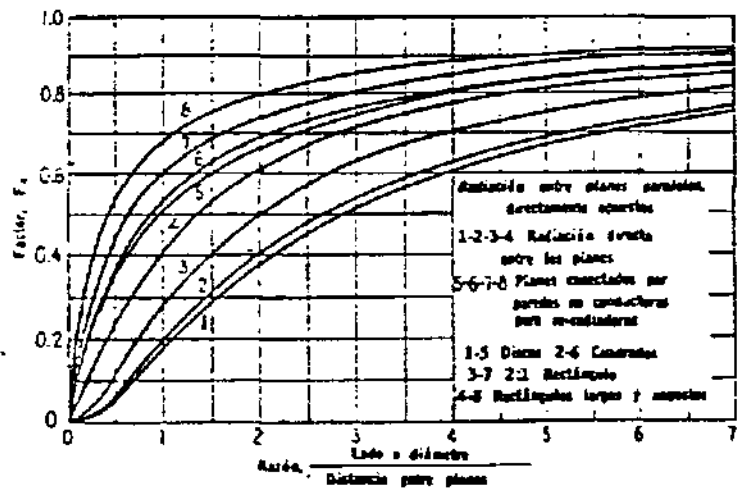


FIG. 1.8 Radiación entre planos paralelos. (Hottel) (9)

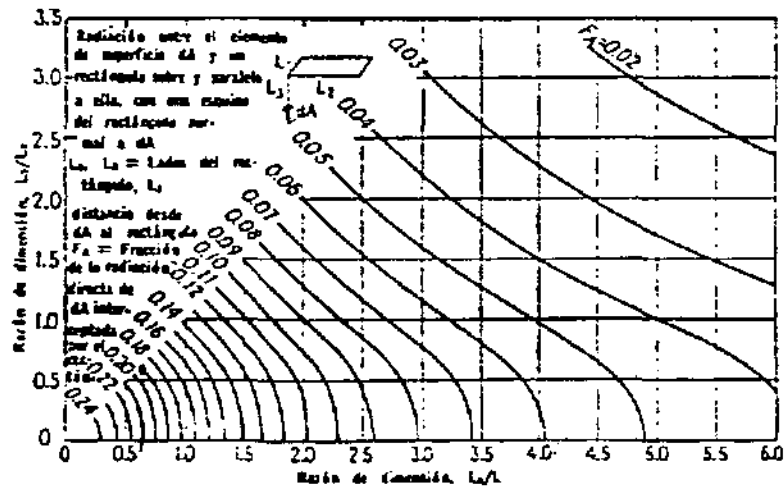


FIG. 1.9 Radiación entre un elemento y un plano paralelo. (Hottel) (9)

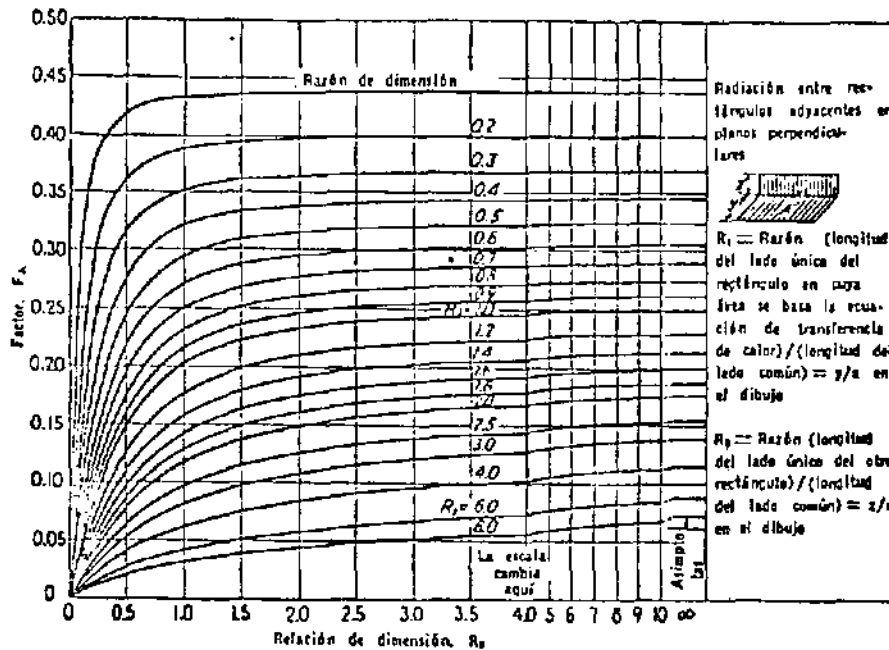


FIG. 4.10 Radiación entre planos perpendiculares. (Hottel) (9)

1.4 CONDUCTIVIDAD TERMICA

Una vez analizados los medios de transferencia de calor, nos damos cuenta que en nuestro estudio el medio que tiene mayor importancia es la conducción, por lo que trataremos de explicar más ampliamente el concepto de conductividad térmica y su aplicación.

La conductividad térmica se define como "el número de calorías que en la unidad de tiempo atraviesa el área unidad de una sustancia homogénea bajo la influencia de una diferencia de temperatura igual a la unidad, en dirección perpendicular a la superficie" (17). La unidad más común en ingeniería es el Btu/(hora) (pie²) (°F/pulg), en el sistema decimal su valor es de 0.12401 -- Kilocalorias/(hora) (m²) (°C/m) (13).

La energía térmica puede ser conducida en los sólidos de dos modos: vibración de red y transporte por medio de electrones libres. En los buenos conductores eléctricos un gran número de --

Tabla 1.3 Conductividad térmica de diversos materiales en 0 °C (10)

Material	Conductividad térmica k	
	W/m °C	Btu/h pie- °F
Metales:		
Plata (pura)	410	237
Cobre (puro)	385	223
Aluminio (puro)	202	117
Níquel (puro)	93	54
Hierro (puro)	73	42
Acero al carbón, 1% C	43	25
Plomo (puro)	35	20.3
Acero cromo-níquel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Sólidos no metálicos:		
Cuarzo, paralelo al eje	41.6	24
Magnetita	4.15	2.4
Mármol	2.08-2.94	1.2-1.7
Arena	1.83	1.06
Vidrio de ventana	0.78	0.45
Arce o roble	0.17	0.096
Aserrín	0.059	0.034
Fibra de vidrio	0.038	0.022
Líquidos:		
Mercurio	8.21	4.74
Agua	0.556	0.327
Amoníaco	0.540	0.312
Aceite lubricante, SAE 50	0.147	0.085
Freón 12, CCl ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
Hidrógeno	0.175	0.101
Helio	0.141	0.081
Aire	0.024	0.0139
Vapor de agua (saturado)	0.0206	0.0119
Bióxido de carbono	0.0146	0.00844

electrones libres se mueven en la estructura de la red del material (10). De la misma manera que estos electrones pueden transportar carga eléctrica, también pueden llevar energía térmica de una región de alta temperatura a una de baja temperatura, como ocurre en los gases. De hecho, con frecuencia nos referimos a estos electrones como gas de electrones. La energía también se puede transmitir como energía vibracional en la estructura de red del material. No obstante, en general, este último modo de transferencia de energía no es tan grande como el transporte por electrones y por esta razón los buenos conductores eléctricos son casi siempre buenos conductores de calor, como el cobre, aluminio y

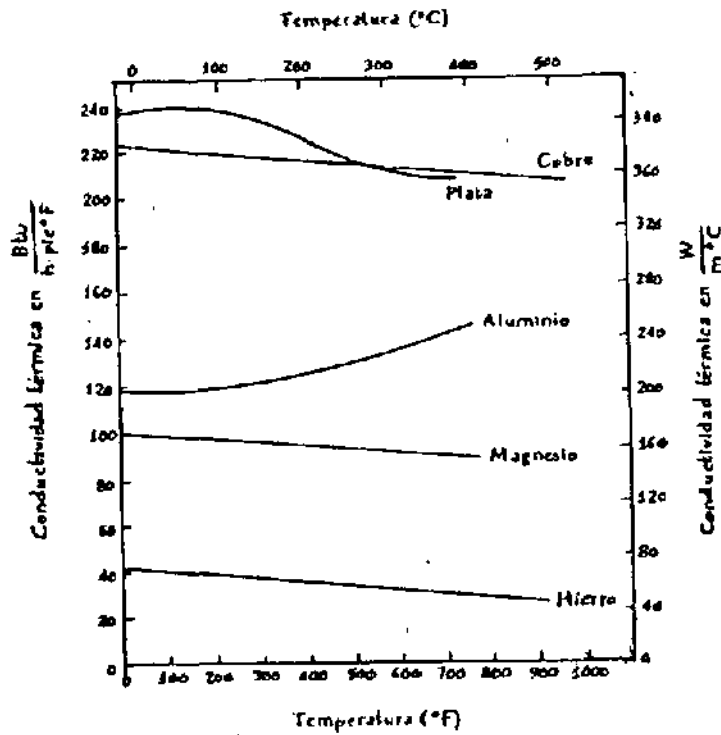


Fig. 1.11 Conductividad térmica de los metales (12)

plata, y los aislantes eléctricos son casi siempre buenos aislantes de calor. En la tabla 1.3, se muestra la conductividad térmica de algunos materiales aislantes.

A altas temperaturas, la transferencia de energía a través de materiales aislantes puede involucrar varios modos: conducción a través de material sólido fibroso o poroso; conducción a través del aire atrapado en los espacios huecos; y radiación a temperaturas suficientemente altas.

Un mecanismo secundario para la conducción térmica en sólidos está asociado con vibraciones de redes. Este efecto explica por qué, cuando crece la temperatura, en general decrece la conductividad térmica (12), como se muestra en la Fig. 1.11. Las vibraciones de redes impiden el movimiento de los electrones libres, provocando con esto que la componente de la conductividad térmica disminuya más rápido que la componente aumentada de la conductividad térmica debido a mayores vibraciones de redes. Por esta razón encontramos que la conductividad térmica de metales puros

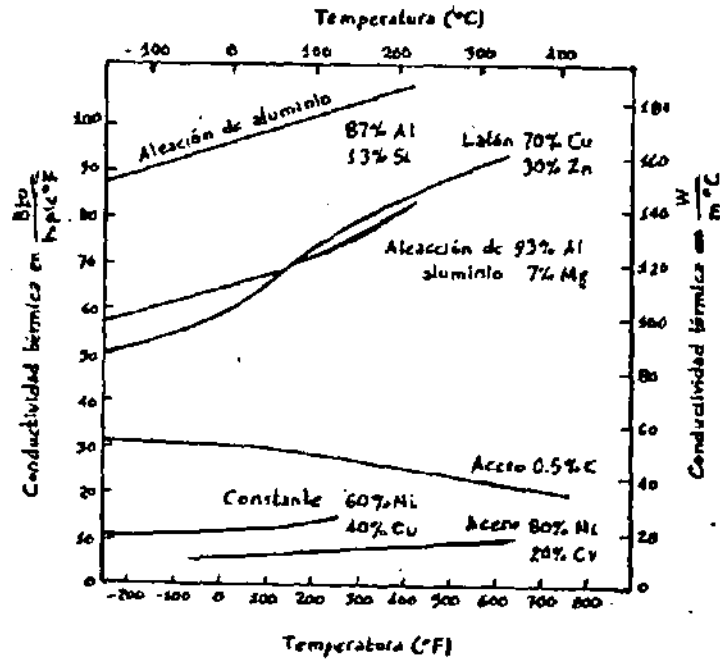


Fig. 1.52 Conductividad térmica de aleaciones (12)

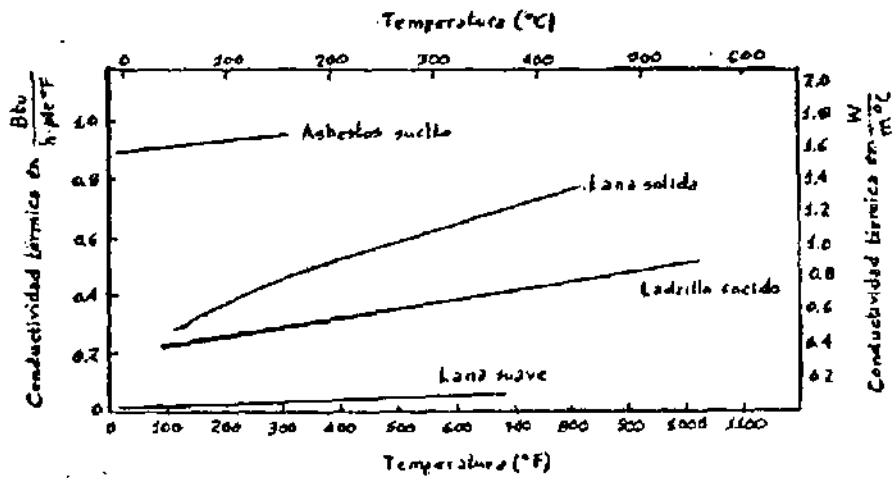


Fig. 1.53 Conductividad térmica de materiales aislantes (12)

tiende a decrecer cuando aumenta la temperatura, mientras que la conductividad térmica de las aleaciones y aislantes térmicos, que tienen unos cuantos electrones libres, y dependen principalmente de las vibraciones de redes para conducir calor, tienden a aumentar su conductividad térmica con el crecimiento de la temperatura tal como se muestra en las Figs. 1.12 y 1.13.

Una situación análoga entre la conducción de calor y la conducción eléctrica se da en un resistor eléctrico que tiene un valor de resistencia constante, R , con una diferencia de voltaje, V , que se imprime a través de él, Fig. 1.14, sabemos por experiencia que fluirá una corriente eléctrica, I , a través del resistor. La magnitud de la corriente sería linealmente con la dirección de la diferencia de voltaje impresa a través del resistor.

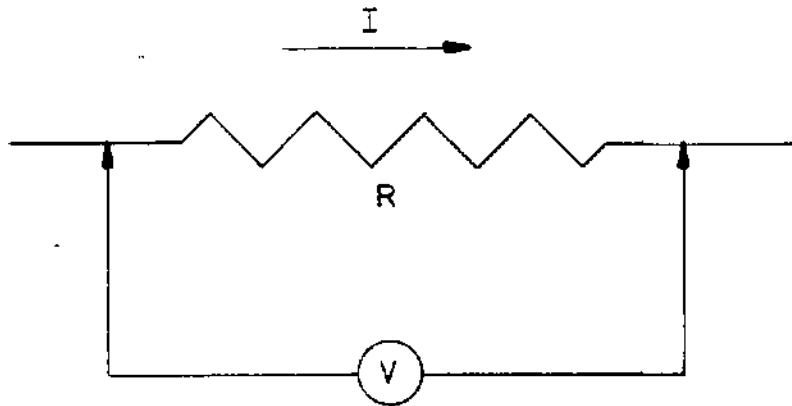


Fig. 1.14 Análogo eléctrico. (52)

Así tenemos que el flujo de calor está expresado por:

$$\text{Velocidad de transmisión} = \frac{\text{caída de temperatura}}{\text{resistencia}} \quad (1.54)$$

En el flujo eléctrico, el factor potencial es la fuerza electromotriz y la velocidad del flujo de electricidad es el coulombio por segundo (amperio) (18). La ecuación de flujo eléctrico es:

$$\text{amperios} = \frac{\text{voltios}}{\text{ohmios}} \quad (1.55)$$

Comparando esta ecuación con la ley de fourier, Ec.1.1, se observa que la velocidad de transmisión de calor en Kcal/hr es análoga al amperio, la caída de temperatura, al voltaje, y a la resistencia eléctrica.

La conductividad térmica de los materiales en forma de bloques, láminas, planchas, mantas, etc., y la de los aislantes de relleno y los cementos aislantes, cuando se usan para temperaturas medias hasta 650°C, suele medirse por método normalizado por la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales y se ha publicado como A.S.T.M. Designation C177 (1).

En la guía de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción y Ventilación y en diversos manuales y artículos se encuentran tablas de conductividad térmica (13), en la tabla 1.4 se muestran algunos valores representativos de la conductividad térmica. Los valores publicados son típicos y pueden ser o no aplicables al material y a la aplicación especial de que se trate. Las decisiones finales deben hacerse basándose en la información y las recomendaciones de fabricantes reputados, o bien, como resultado de pruebas imparciales.

El estudio de la transferencia de calor por conducción tiene varias aplicaciones, ya sea a través de paredes simples, paredes compuestas o tuberías.

En el caso de paredes simples ya se explicó anteriormente; el caso de paredes compuestas es muy común en la industria meta -

- 36 -
 Tabla 2.4 Valores representativos de la conductividad térmica (10)

Material	k Btu/h-pie°F	T °F	k W/m °C	T °C
<i>Metalles:</i>				
Cobre (puro)	223	68	386	20
Aluminio (puro)	118	68	204	20
Hierro (puro)	42	68	72.7	20
Acero (.5% de carbono)	31	68	53.6	20
<i>No metales:</i>				
Textura				
Asfalto	.43-.44	68-132	.74-.76	20-55
Cemento, cenizas	.44	75	.76	24
Vidrio, ventana	.45	68	.78	20
Piedra				
Mármol	1.2-1.7	-	2.08-2.94	-
Madera				
Balsa	.032	86	.055	30
Pino blanco	.065	86	.112	30
Roble	.096	86	.166	30
<i>Material aislante:</i>				
Asbestos (láminas)	.096	124	.166	51
Cincho (triturado)	.025	90	.043	32
Vientas de madera	.034	75	.059	24
<i>Líquidos saturados:</i>				
Amoníaco, NH ₃	.301	68	.521	20
Dióxido de carbono, CO ₂	.0504	68	.087	20
Acute para máquinas	.081	140	.140	60
<i>Gases a la presión atmosférica:</i>				
Aire	.0104	-100	.018	-74
	.0157	100	.027	38
Helio	.0536	-200	.093	-130
	.0977	200	.169	93
Hidrógeno	.0567	-190	.098	-123
	.145	350	.251	175
Neón 12	.0048	32	.0084	0
	.0080	212	.0038	100
Oxígeno	.00790	-190	.0147	-123
	.02212	350	.0383	175

lúrgica, ya sea ferrosa o no ferrosa, y los criterios que se manejan para determinar el tipo de refractario, principalmente dos:

- 1.- ASPECTOS MECANICOS.- Debido a que se manejan grandes cantidades de materias primas y productos generalmente sólidos que son propiedades abrasivas y los recubrimientos son sometidos a grandes esfuerzos. Los materiales de menor conductividad-térmica, son demasiado frágiles debido a que en su estructura existen cavidades rellenas con aire, esto hace que un re-

cubrimiento quede de la siguiente manera: las capas interiores que están en contacto con materias primas y productos, serán de aislantes resistentes a impactos y abrasión; las capas exteriores estarán constituidas por materiales frágiles, pero buenos aislantes.

De esta manera se crea una pared compuesta por materiales de diferente conductividad térmica dispuestas en serie, además de satisfacer la necesidad del aislamiento, de forma que queden cubiertas las necesidades mecánicas.

2.- ASPECTOS QUIMICOS.- De acuerdo a los materiales manejados y sus propiedades químicas, los refractarios o recubrimientos de hornos deberán ser de la misma especie que los primeros, ya que si no fuera así, crearíamos condiciones de una reacción de neutralización entre los productos y materias primas con el refractario deteriorándolo.

Entre los refractarios ácidos más comunes, están: la sílica (SiO_2), silicato de aluminio ($\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$) o alúmina. Y entre los refractarios básicos más comunes, están: la dolomita ($\text{MgCO}_3\text{-Ca-CO}_3$), la magnesita (MgCO_3) y cromomagnesita ($\text{CrCO}_3\text{MgCO}_3$).

Supongamos una pared compuesta por tres materiales diferentes, denominados a, b y c, según se muestra en la Fig. 1.15. Escribiendo la Ec. 1.15 en su forma más general y arreglando algebraicamente los términos, resulta entonces para una pared plana,

$$q = k \frac{A}{L} (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{L/kA} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (1.55)$$

donde:

$R = L/kA$ resistencia térmica (11).

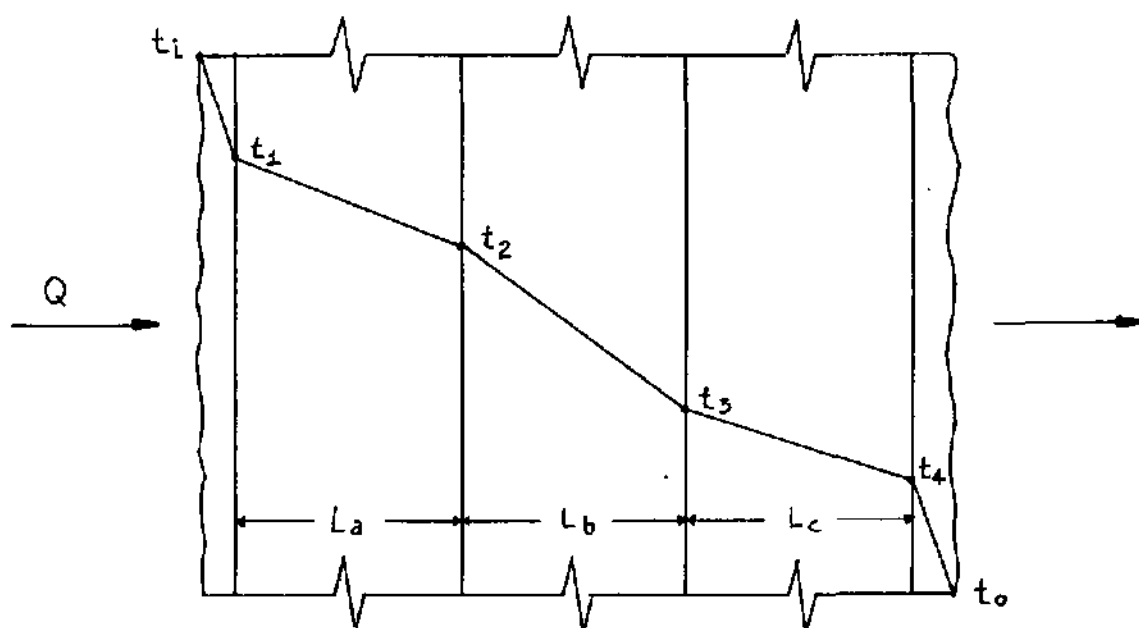


Fig. 1.15 Esquema de una pared compuesta. (2)

En el caso de la pared compuesta mostrada en la Fig. 1.15, - el flujo estable de calor que fluye a través de cada una de las - secciones de la pared es el mismo; o el calor Btu por hora que - fluye a través de la pared completa es,

$$q = q_a = q_b = q_c \quad (1.56)$$

y

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R_a} = \frac{t_2 - t_3}{R_b} = \frac{t_3 - t_4}{R_c} = \frac{t_1 - t_4}{R_t} \quad (1.57)$$

y para el caso más general

$$q = \frac{t_1 - t_n}{R_t} = \frac{t_1 - t_n}{\frac{L_a}{k_a A_a} + \frac{L_b}{k_b A_b} + \frac{L_c}{k_c A_c} + \dots + \frac{L_n}{k_n A_n}}$$

Ahora bien, en el caso de la transferencia de calor por conducción a través de tuberías, se centra el estudio del presente - trabajo, por lo cual, lo trataremos más a fondo posteriormente.

C A P I T U L O I I

" A I S L A _ M I E N T O S T E R M I C O S "

2.1 DEFINICION

El aislamiento térmico es todo material que tenga la propiedad de oponer resistencia al paso del calor o frío a través de éstos. Los materiales aislantes en su composición están formados por millones de burbujas de aire y éstas forman pequeñas celdas de aire estático atrapadas entre sus componentes de éstos, gracias a esta característica estos cuerpos tienen una alta estabilidad de transmisión de calor (3).

El aislamiento ha sido usado por el hombre por un largo tiempo, por cierto más tiempo de lo que tenía entendido como funcionaba.

La principal cualidad que debe reunir todo material aislante es que realmente aisle, es decir, que tenga un coeficiente de conductividad térmica tan bajo como sea posible (4).

No es suficiente que un material aislante determinado tenga un coeficiente de conductividad térmica baja, sino que, es necesario que la conserve a través del tiempo y durante su colocación definitiva. Existen materiales que son aislantes pero que, con el transcurso del tiempo, van absorbiendo humedad, aumentando de este modo su coeficiente de conductividad térmica. Todo material aislante no debe ser higroscópico y debe conservar íntegras eternamente todas las propiedades y por consiguiente, mantener indefinidamente igual coeficiente de conductividad.

La conductividad térmica es la propiedad de un cuerpo homogéneo, y se define como la cantidad de calor que fluye perpendicularmente a través de un área unitaria en la unidad de tiempo, manteniendo una diferencia de temperatura unitaria entre las caras del material de espesor unitario (17). El símbolo usual para la conductividad térmica es la letra k ; así pues, el coeficiente de conductividad térmica determina el poder de transmisión del calor

a través de un cuerpo, y la clasificación de los materiales aislantes.

PROPIEDADES FISICAS.- Los aislamientos térmicos deben tener ciertas propiedades según el uso a que se destinen, como son la resistencia mecánica, la dureza, la densidad, la compresibilidad, el calor específico, la resistencia a temperaturas altas o bajas, el coeficiente de dilatación térmica, etc (13).

PROPIEDADES QUIMICAS.- Las propiedades químicas de los aislantes térmicos dependen mucho de su aplicación especial y es poco lo que se puede decir que tenga valor general. En las fábricas de productos químicos, los aislantes deben ser inertes a los vapores y líquidos con los cuales pueden ponerse en contacto. En algunos procesos químicos es necesario poner el aislamiento en el interior de recipientes a presión para mantener la temperatura de las paredes del recipiente por debajo del punto peligroso. El análisis químico de los aislantes tiene importancia para el que los fabrica; pero para el que los usa, el resultado en una aplicación particular con los materiales con los que puede ponerse en contacto el aislante tiene más importancia que el análisis químico completo.

Sin embargo, la elección final de un material aislante para una aplicación dada implica por lo general una transacción entre propiedades deseables, como se muestra en la tabla 2.1.

2.2 TIPOS DE AISLAMIENTO TERMICO Y CLASIFICACION

De hecho cualquier cuerpo o material a la mano puede funcionar como aislante térmico en un momento dado, sin embargo, es necesario observar las alteraciones que sufren sus componentes ante la presencia de calor y de frío para determinar su cualidad aislante; pero existen algunos materiales que mediante un proceso que altere su estado natural superan su propiedad aislante mismas

Tabla 2.1 Tipos de aislantes y aplicaciones (11)

Tipo	Intervalo de Temperatura, °C	Conductividad térmica mW/m·°C	Densidad, kg/m ³	Aplicación
1 Superaislante lince evacuado	-240-1100	0.0015-0.72	Variable	Muchas
2 Espuma de poliuretano	-180-150	16-20	25-48	Tubería caliente y fría
3 Espuma de poliuretano	-170-110	16-20	32	Tanques
4 Bloques de vidrio celular	-200-200	29-108	110-150	Tanques y tubería
5 Hojas de fibra de vidrio para envolver	-80-280	22-78	10-50	Tubería y accesorios
6 Hojas de fibras de vidrio	-170-230	25-86	10-50	Tanques y equipo
7 Fibra de vidrio premoldeada	-50-230	32-55	10-50	Tubería
8 Hojas elastoméricas	-40-100	36-39	70-100	Tanques
9 Paneles de fibra de vidrio	60-370	30-55	10-50	Tubería y accesorios
10 Elastómero premoldeado	-40-100	36-39	70-100	Tubería y accesorios
11 Fibra de vidrio con revestimiento de barrera de vapor	-6-70	28-45	10-32	Líneas de refrigeración
12 Fibra de vidrio sin chaqueta de barrera de vapor	a 260	29-45	24-48	Tuberías calientes
13 Tablero de fibra de vidrio	20-450	33-52	25-100	Calderas, tanques, cambiadores de calor
14 Bloques y tableros de vidrio celular	20-500	28-108	110-150	Tubería caliente
15 Bloques y tableros de espuma de poliuretano	100-150	16-20	24-65	Tubería
16 Fibra mineral premoldeada	a 850	35-91	125-160	Tubería caliente
17 Hojas de fibra mineral	a 750	37-81	125	Tubería caliente
18 Bloques de lana mineral	450-1000	52-130	175-290	Tubería caliente
19 Bloques, tableros de silicato de calcio	230-1000	32-85	100-160	Tubería caliente, calderas, revestimientos de chimeneas
20 Bloques de fibra mineral	a 1100	52-130	210	* Calderas y tanques

que se mantienen constante, como es el caso de la Lana Mineral.

Hasta ahora ha sido la sociedad Americana de ensayos de materiales la encargada de realizar los estudios y pruebas de cada uno de los materiales considerados como aislantes térmicos idóneos así es la encargada de emitir y publicar las llamadas NORMAS A.S.T.M., en las que los clasifica según su conductividad térmica y según su comportamiento físico de operación bajo condiciones específicas de clima y abuso mecánico (1). Es pues, en base a estas -

normas que cada fabricante establece su proceso de fabricación para dar la calidad a sus materiales que las mismas le exigen (17).

Los materiales aislantes son clasificados de acuerdo a los rangos de temperatura en los que pueden ser usados, tales como: para altas temperaturas, mayores a 35°C; y para bajas temperaturas, menores a 35°C.

Cuando la temperatura alcanza ciertos límites superiores, los materiales se vuelven estructuralmente inestables, o no son competitivos debido a que tienen una conductividad relativamente alta. En los rangos de baja temperatura casi todos los materiales son estructuralmente estables, y reúnen las características técnicas para poder ser instalados, pero la selección en base a los costos elimina a todos aquellos materiales con altos valores de conductividad térmica.

A continuación se presentarán los materiales que se recomiendan de acuerdo a las temperaturas de operación del proceso (6).

2.2.1 PARA ALTAS TEMPERATURAS.

- a).- Lana Mineral.- Este material al principio se fabricaba con escoria de hierro de altos hornos; era por consecuencia, inestable en presencia de la humedad a causa de su gran contenido en cal y sulfuros (LANA MINERAL DE COLOR BLANCA), lo que determina el riesgo de corrosión sobre el equipo aislado. Actualmente, se obtiene fundiendo, en un horno de cubilote, piedra volcánica, cuya corriente se transforma en fibras a través de rotores de alta velocidad periférica (SPINER), lo que genera las siguientes características en el pro

ducto:

- 1.- Alta eficiencia térmica por su bajo factor de continuidad. (Por su fibra muy delgada y densidad muy baja).
- 2.- Alta eficiencia acústica.
- 3.- Física y químicamente estables ya que la temperatura y humedad no alteran su estado.
- 4.- Incombustible en razón de su origen.
- 5.- Mínima higroscopicidad que no permite --- aceptación de humedad.
- 6.- Flexibilidad. Lo que facilita su instalación en equipos irregulares y tuberías de gran diámetro.
- 7.- Económicas. ES EL MATERIAL AISLANTE MAS ECONOMICO QUE EXISTE EN EL MERCADO.

PROPIEDADES FISICAS.

COLOR: Café obscuro

TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVICIO: 650 °C -
(1200 °F)

DENSIDAD: Desde 6 Lbs./Ft³ (96 Kg./Mt.³) -
hasta 14 Lbs./Ft³ (224 Kg./Mt³).

CUMPLE LA NORMA: A.S.T.M. -C-592-80

ABSORCION DE HUMEDAD: Menos de 1% por peso
a 120 °F y 100% Humedad relativa por 96 Hrs.

La Lana Mineral se puede encontrar en el -
mercado, en una variedad de formas para di
versos usos:

LANA SUELTA. La Lana Suelta, producto ori-
ginal a granel sin tratamiento, es la base

de todos los demás productos de lana mineral. Se usa como material de relleno y -- es aplicado por embutimiento a mano; se usa también como medio filtante y para uso general.

LANA GRANULADA. La lana granulada es la -- lana suelta que ha pasado por granuladores y pasada por una criba para dejarla par -- cialmente libre de perdigones. Su principal uso como aislador en casas ya existentes, donde se aplica por soplado neumático. Actualmente se utiliza también como un preventivo contra incendios por esparado en -- edificios en construcción.

MANTAS INDUSTRIALES PARA BAJA TEMPERATURA. La lana mineral aglutinante en formas ligeras de peso pero de tamaños acomodables al equipo que ha de aislarse, se denominan -- mantas industriales. En esta forma las mantas pueden ir, revestidas o no, o encerra-- das en papel o mucelina.

El uso más amplio de las mantas industriales es el aislamiento en aplicaciones domésticas, especialmente en los refrigeradores y congeladores. Para el servicio de refrigeradores las mantas son cortadas en la fá-- brica en dimensiones que ajusten perfectamente a las paredes y puertas del gabinete. Para el aislamiento en estufas de cocinas-- las mantas son de formas más blandas, para que la lana se adapte fácilmente y cubra -- todo el forro del horno. El contenido del

aglutinante orgánico de la manta debe ser mínimo para evitar el humo y el olor.

MANTAS INDUSTRIALES PARA ALTA TEMPERATURA. La lana suelta, ligeramente aplastada para fijar el polvo o algún aglutinante para que rechaze el agua, se forma en mantas rectangulares de varios tamaños y gruesos adaptables a la superficie que se ha de aislar. La manta va encerrada en tela metálica, listones mecánicos, papel kraft, u otros materiales, también conocidas como COLCHONETAS.

CUBIERTA DE TUBOS. La cubierta de tubos es del tipo de manta industrial, ésta se hace de lana mineral suelta, cubierta una cara o las dos con tela metálica flexible. Esta manta es un aislamiento flexible que ajusta perfectamente al tubo de gran diámetro.

CEMENTO AISLANTE. El cemento aislante es la lana mineral granulada combinada con bentonita y otras arcillas. Puede ser aplicada a todo equipo que produzca o transfiera calor y es particularmente útil para evitar pérdidas de calor en grietas y juntas. Puede ser aplicada en capas sobre pestañas, codos, accesorios y válvulas o como revestimiento sobre otras formas de aislamiento.

El cemento aislante se usa en los cuerpos cilíndricos de las calderas tubulares, en cascos y tuberías, válvulas y accesorios, calentadores, tanque de almacenaje, bombas, hornos y , en general, donde quiera que la

aplicación del ordinario aislamiento rectangular es difícil, a causa de las irregularidades y salientes de la superficies.

MEDIOS FILTRANTES. La lana mineral afieltrada de fibra fina, en estado seco, se usa para apartar las partículas finas de materia. Por ejemplo, los filtros en tubos de gas frente a luces pilotos en estufas domésticas están hechos con este tipo de lana. También esta lana empacada a alta densidad es usada en procesos industriales como medio coalescente; ya sea para pararel agua de los gases, para desalar en petróleo y como colador inerte.

MEDIOS PARA ABSORCION DEL SONIDO. Manta flexible de lana mineral se usa hace años como tratamiento acústico normal. Estos productos por su alta porosidad y permeabilidad absorben la energía de las ondas sonoras.

Las mantas de lana mineral, cosidas o acolchadas entre mucelina, papel kraft o medios sustentadores semejantes son usadas como protección antisonoras.

- b) Fibra de vidrio.- Este material se elabora con arena sílica, piedra caliza, carbonato de sodio y otros ingredientes minerales, en forma granular o en polvo; y se mezclan en mezcladores giratorios, para luego ponerlos en el horno de fusión. El vidrio fundido llega al antecrisol, donde hay orificios metáli-

cos por los que fluye el vidrio en delgados chorros, a medida que emerge el vidrio es estirado por chorros de vapor a alta presión que lo dejan en forma fibrosa.

CARACTERISTICAS.

El aislamiento de fibra de vidrio es el material que trabaja desde temperatura ambiente a 454 °C (850 °F). También puede ser usada en aplicaciones a baja temperatura.

Este aislamiento está disponible en varias presentaciones: placas rígidas o flexibles, tubería preformada, colchoneta armada y fibra sin aglomerante.

Estos materiales se presentan en diferentes densidades lo que les confiere diferentes propiedades térmicas.

- c) Silicato de Calcio.- Este aislamiento se hace a base de hidróxido de calcio y sílice que por medio de inyección de vapor directo se convierte en silicato de calcio.

Debido a su consistencia y su estabilidad en altas temperaturas, estos materiales se usan en el aislamiento de equipos y tuberías que operan a altas temperaturas, y que estarán expuestos a abusos mecánicos severos y continuos (6). Este aislamiento puede conseguirse como tubería rígida preformada para diámetros nominales desde 1/2

pulgadas hasta 24 pulgadas, con espesores de 1/2 a 4 pulgadas o como placas auto--ajustables para el aislamiento de tuberías de diámetros mayores a 24" y equipos.

PROPIEDADES FISICAS.

DENSIDAD: Máxima 14 Lbs./Ft³ (224 Kg./Mt³)

CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.39 BTU.Pulg./Hr.-Ft² °F.

TEMPERATURA MAXIMA: 1000 °C.

- d) Perlita Expandida.- Este material se elabora a base de - una roca sílica natural que tiene como característica que se expande de 4 a 20 veces su volumen cuando se calienta a 870 °C dando origen a millones de celdas vitrificadas de perlita expandida (6). Esta perlita se mezcla con Silicato de Sodio como --aglomerante y con fibras sintéticas como - refuerzo mecánico en forma de tubería preformada o placa rígida, forman un aislamiento de gran resistencia mecánica y ligereza que soporta temperaturas de hasta 650°C.

PROPIEDADES FISICAS.

DENSIDAD: Máxima 14 Lbs./Ft³ (224 Kg./Mt³)

CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.39 BTU.Pulg./Hr.-Ft² °F.

TEMPERATURA MAXIMA: 650 °C.

PRESENTACION:

Este aislamiento está disponible en forma-

de tubería preformada, en diámetros nominales desde 1/2 Pulg. hasta 20 Pulg. con espesores de 1 a 4 Pulg. y en bloques de 36 Pulg. de longitud de anchos de 6, 12 y 18 Pulg. con espesores de 1 a 5 Pulg.

e).- **Asbestos.**- El aislamiento térmico a base de fibra de asbesto, se compone principalmente de fibra de asbesto amosite con un aglutinante inorgánico resistente al calor, con o sin material de relleno.

No ampliaremos más en este tema ya que este material está por desaparecer en el mercado por sus características cancerígenas.

2.2.2 PARA BAJAS TEMPERATURAS.

En este rango de temperatura los aislamientos que más comúnmente se usan son los plásticos celulares tal como la espuma de poliuretano y espuma de poliestireno.

Estas espumas se forman con la reacción de dos componentes químicos, en donde el aire o gas de uno de los componentes queda atrapado en las celdas de la espuma. Las celdas formadas son tan pequeñas que reducen en gran medida la transferencia de calor por convección del gas o el aire atrapado, lo que da como resultado las más bajas conductividades térmicas de los materiales aislantes. Por su estructura de celdas cerradas, las espumas impiden la absorción de agua, lo que permite conservar la capa-

idad aislante aún en las condiciones más extremas de humedad.

- a).- Poliuretano.-Este material es ideal para el aislamiento de equipos y tubería que trabajan a temperaturas menores que la del ambiente, especialmente a temperaturas criogénicas, debido a que por su estructura es prácticamente impermeable y presenta la conductividad más baja entre los materiales aislantes.

PROPIEDADES FISICAS.

DENSIDAD: 32 KG/Mt³

CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.12 BTU.Pulg./Hr.-
Ft² °F.

TEMPERATURA DE OPERACION: -185 °C a 70 °C.

Este producto se puede conseguir en, medias cañas de 1 Mt. de longitud en diámetros de 1/2 Pulg. a 36 Pulg. y espesores de 1 a 6 Pulg. y en placas. También puede ser aplicado directamente sobre tanques y equipos por medio de esprayado.

- b).- Poliestireno.-Este material es empleado en el aislamiento de sistemas a bajas temperaturas. Está constituido por un 98% de aire lo que le da una elevada capacidad aislante y su estructura de celdas cerradas le da una gran resistencia a la absorción agua.

PROPIEDADES FISICAS.

DENSIDAD: de 17 Kg./Mt³ a 25 Kg./Mt³

CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.25 BTU. Pulg./Hr.--
Ft' °F.

TEMPERATURA DE OPERACION: -150 °C a 80 °C.

Este material se puede conseguir en forma de tubería preformada de un metro de longitud en diámetros desde 1/2 Pulg. hasta -- 24 Pulg. con un espesor de 1/2 hasta -- 6 Pulg. y en forma de placas.

c) Fibra de vidrio

y lana mineral. - La fibra de vidrio y lana mineral pueden también ser usadas en aplicaciones a baja temperatura protegidas con una adecuada barrera de vapor. En sistemas operando a baja temperatura, el rompimiento de la barrera de vapor afecta a el aislamiento de fibra de vidrio y lana mineral en forma masiva.

2.3 USOS Y APLICACIONES DEL AISLAMIENTO TERMICO.

El aislamiento térmico sirve para cinco fines principales: - aumentar la comodidad en las viviendas; conservar el calor o alguna otra forma de energía; facilitar el control de la temperatura en un proceso químico; reducir la temperatura del casco de un recipiente sometido a presión, y controlar la temperatura exterior del espacio aislado, con el fin de evitar peligros al personal; - proteger los miembros estructurales próximos contra las temperaturas elevadas; reducir la temperatura en lugares de trabajo y, -- en caso de maquinaria que funcione por debajo de la temperatura ambiente, impedir que sude la superficie más caliente o que se cubra de escarcha (13).

Cualquier proceso en el que intervenga alguna forma de tem -

peratura requiere de algún material termoaislante, según sea su naturaleza. De esta forma tenemos:

INDUSTRIA PETROQUIMICA.- Sus procesos requieren de casi todos los materiales termoaislantes enumerados con anterioridad con los objetivos también ya mencionados.

INDUSTRIA CEMENTERA.- Requiere básicamente de aislantes para alta temperatura con la característica de acabados muy exigentes--debido a que tienen que operar a la intemperie casi en su totalidad.

INDUSTRIA ELECTRICA.- Si tomamos en cuenta que la electricidad se genera en plantas termoeléctricas, geotérmicas y nucleares observamos que el uso de termoaislantes es ilimitados en todas --sus normas, presentaciones y especificaciones.

INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.- Básicamente emplea termoaislantes para su proceso de pinturas horneadas aunque también los requiere --en algunos procesos.

INDUSTRIA AZUCARERA.- La industria productora de azúcar consume lana mineral en sus diferentes modalidades por sus características de economía y flexibilidad para instalación en equipos --totalmente irregulares e intercambiables con cierta periodicidad.

INDUSTRIA SIDERURGICA.- Por la obtención de sus productos en altos hornos es un alto consumidor de aislamientos térmicos para altas temperaturas.

INDUSTRIA NAVAL.- Sus requerimientos en esta necesidad se dividen en: nuevas construcciones que a su vez requieren de aislamientos convencionales y aislamientos especiales.

Aislamientos Convencionales._ Son los que pueden llevar todos los

buques y la mayoría son los siguientes:

- Confort térmico y acústico en habitaciones.
- Confort acústico en cámara de máquina.
- Tuberías de agua caliente y fría.
- Tuberías de combustible caliente.
- Tuberías de otros fluidos fríos o calientes.
- Escapes de motor principal y motores auxiliares.
- Calderas o generadores de vapor.
- Depósitos de fluidos fríos o calientes.
- Centrales y conductos de aire acondicionado.
- Cabinas de control en cámara de máquinas.
- Cámaras refrigeradas.
- Protección de oxidación en zonas inaccesibles.

Aislamientos Especiales.- Son los que requieren buques de carga - especiales como: Frigoríficos, pesqueros congeladores, gaseros y dedicados a las diferentes cargas criogénicas en:

- Bodegas frigoríficas.
- Túneles de congelación.
- Departamentos de frigorígenos.
- Escotillas isotérmicas.
- Aparatos de producción de fríos.
- Intercambiadores de calor.
- Depósitos de líquidos refrigerantes.
- Tuberías de frío.
- Tanques de carga de productos criogénicos.
- Compartimientos de bodegas para cargas especiales.

2.4 BENEFICIOS DEL AISLANTE TERMICO

Ya hemos mencionado someramente los beneficios que proporcionan los aislantes térmicos, pero en este inciso trataremos de hacerlo mas comprensibles.

PROTECCION._ Protección de personal, ya que existen tube --

rías y equipos dentro de cada industria que requieren algún recubrimiento termoaislante más que para mejorar el proceso o economizarlo por protección del personal que labora cerca de su periferia, siguiendo los criterios que a continuación mencionamos:

- Altura: 1.5 Mts.
- Extremos: 60 cm.
- Acabados: de preferencia no metálicos por su alta conductividad térmica y por la facilidad que tienen de transmitirlo.

CALIDAD EN EL PRODUCTO.- Es evidente que en procesos que requieren de temperaturas estables es necesario la presencia de sistemas termoaislantes. Para estos procesos que son continuos y que deben tener una temperatura constante es necesario aislarlos y -- así poder obtener una buena calidad en el producto.

CONFORT.- Es sobradamente conocido el hecho de que la gente quiere vivir en mejores condiciones, y no esta dispuesta a soportar las inconveniencias del frío, del calor o del ruido en grado extremo.

El confort significa bienestar, alegría de vivir y salud, en las industrias y oficinas salud y mejor rendimiento del trabajo.

Estos problemas los podemos encontrar continuamente todos -- los días en industrias y oficinas, y el aislamiento contra estos es otra necesidad que se va imponiendo a medida que vamos mecanizando nuestro sistema de vida.

ECONOMIA.- Como sabemos, la cantidad de calor que fluye de una cara a otra de un material, será menor mientras mayor sea el espesor del aislamiento, pero debe observarse que el ahorro de -- energía no es directamente proporcional al espesor; ahora, si ob-

servamos que el objetivo del uso del aislamiento en la mayoría de los casos es ECONOMIA, el espesor óptimo será aquel que con la menor inversión posible proporcione la mayor economía, lo cual se logra haciendo una evaluación que deberá tener en cuenta, por una parte el costo del aislamiento y por otra el costo total que sea posible. El costo total es igual a la suma del costo del aislamiento más el costo de las pérdidas de calor que con ese espesor de aislamiento se tienen. El espesor del aislamiento que corresponda al menor costo total será el espesor óptimo (5).

2.5 SISTEMAS DE APLICACION

Cuando se instala aislamiento térmico se requiere de materiales complementarios para su instalación, protección mecánica y acabado (17). Estos materiales ayudan a fijar el aislamiento y dan resistencia al abuso mecánico durante la vida de la planta, ya -- que tanto las tuberías como los recipientes y equipos del proceso están expuestos a diversos esfuerzos mecánicos como caminar o -- que caigan objetos sobre ellos, se le recarguen escaleras, etc., además el acabado final debe dar protección a la intemperie y ser resistente a la corrosión.

La selección de estos materiales depende del tipo de aislamiento que se utilice, rango de temperatura de operación, medio -- ambiente y esfuerzos mecánicos a los que será sometidos.

PREFORMADOS.- De fácil y rápida aplicación para tuberías y -- equipos con alta y baja temperatura, presentan buena estética, fragilidad, inadaptabilidad en superficies irregulares y costos más o menos caros.

ESPREADOS.- Resulta muy práctico para equipos muy irregula -- res donde se requiere de aislamiento constante y compacto ya que llena totalmente cada espacio por incómodo que se encuentre (Depó -- sitos criogénico). Requiere de sistemas y tecnología muy complica

da y voluminosa lo que encarece su aplicación.

Evita las posibles fugas de temperatura ya que no presenta uniones ni fisuras que originen ese riesgo.

FLEXIBLES.- Cubren los rangos de alta y baja temperatura con las características de fácil adaptación en superficies irregulares y tuberías de cualquier diámetro, además su costo es muy económico, los defectos estéticos se mejoran con un buen sistema de acabado.

C A P I T U L O I I I

" D I S E Ñ O Y C O N S T R U C C I O N
D E L E Q U I P O "

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO

Se requirió de los siguientes materiales e instrumentos para el montaje del equipo, en el cual se realizaron las pruebas para la determinación de la conductividad térmica de los diferentes materiales aislantes que se van a comparar, y que a continuación se enlistan, tal y como se muestra en la Fig. 3.1

- 1.- Alambre de nichrom.
- 2.- Material refractario.
- 3.- Termómetros.
- 4.- Aislante térmico a ensayar.
- 5.- Alambre de cobre.
- 6.- Tubo de vidrio Pyrex.
- 7.- Tapones de corcho.
- 8.- Terminal para conexión a fuente de poder.
- 9.- Soporte de madera.
- 10.-Fuente de poder.
- 11.-Foco piloto.
- 12.-Suministro de energía 120/125V.
- 13.-Voltímetro de 0 a 5V/A.C.
- 14.-Amperímetro de 0 a 5A/A.C.
- 15.-Selector de voltaje.
- 16.-Selector de entrada al transformador.
- 17.-Switch general.
- 18.-Selector de salida del transformador.
- 19.-Fusible de 1A/125V.

Se empleó un tubo de vidrio Pyrex, de 25mm. de diámetro y --- 80cm. de longitud, que se recubrió con los materiales aislantes -- que se van a comparar, en una longitud de 20cm. Dentro del tubo - se colocó una resistencia de alambre de nichrom del número 20, de 1m. de longitud, que se embobinó sobre un material refractario de 23mm. de diámetro y 10cm. de longitud. Los extremos de la resisten-

FIG. 3.1

DIAGRAMA DEL EQUIPO

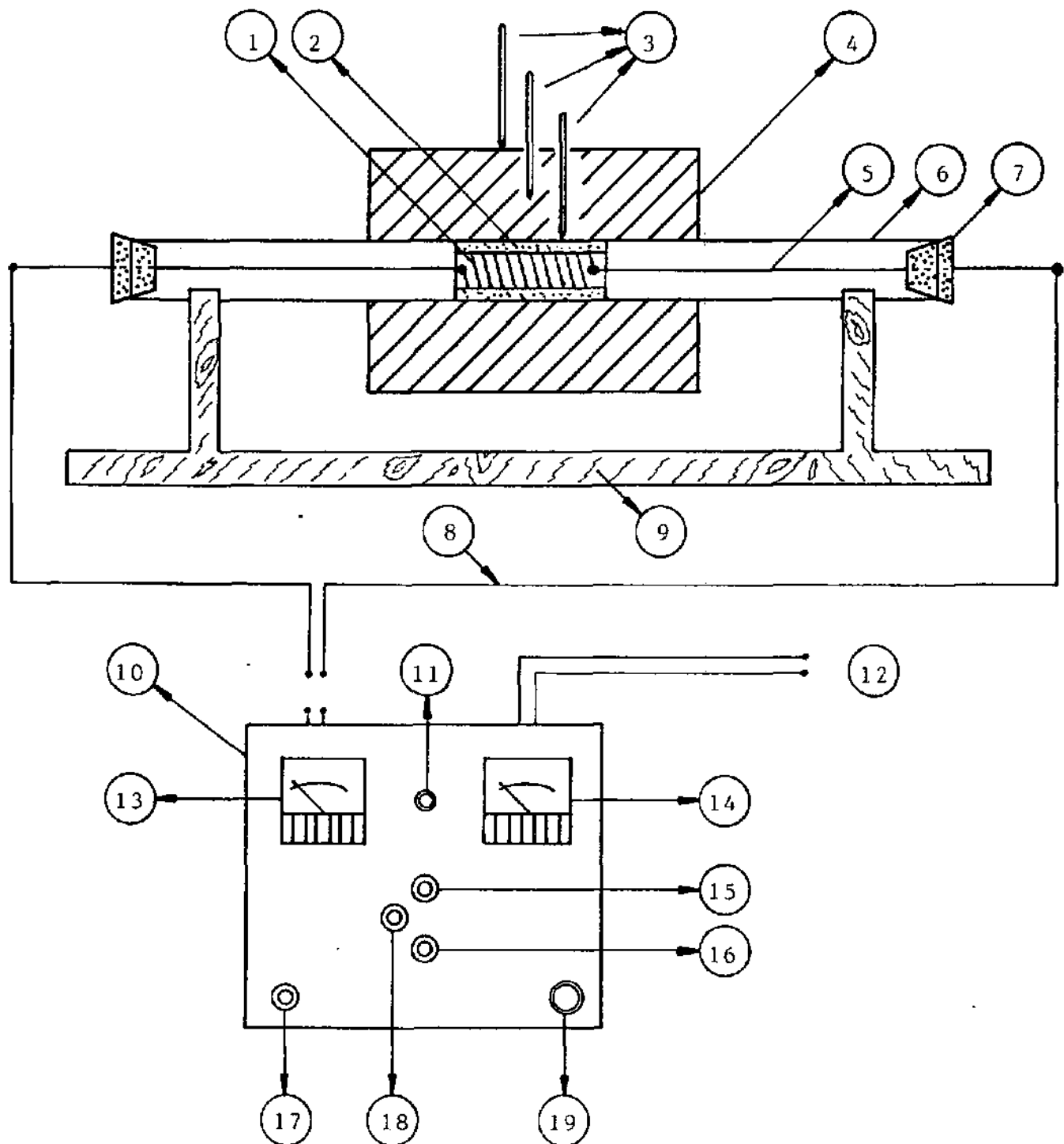
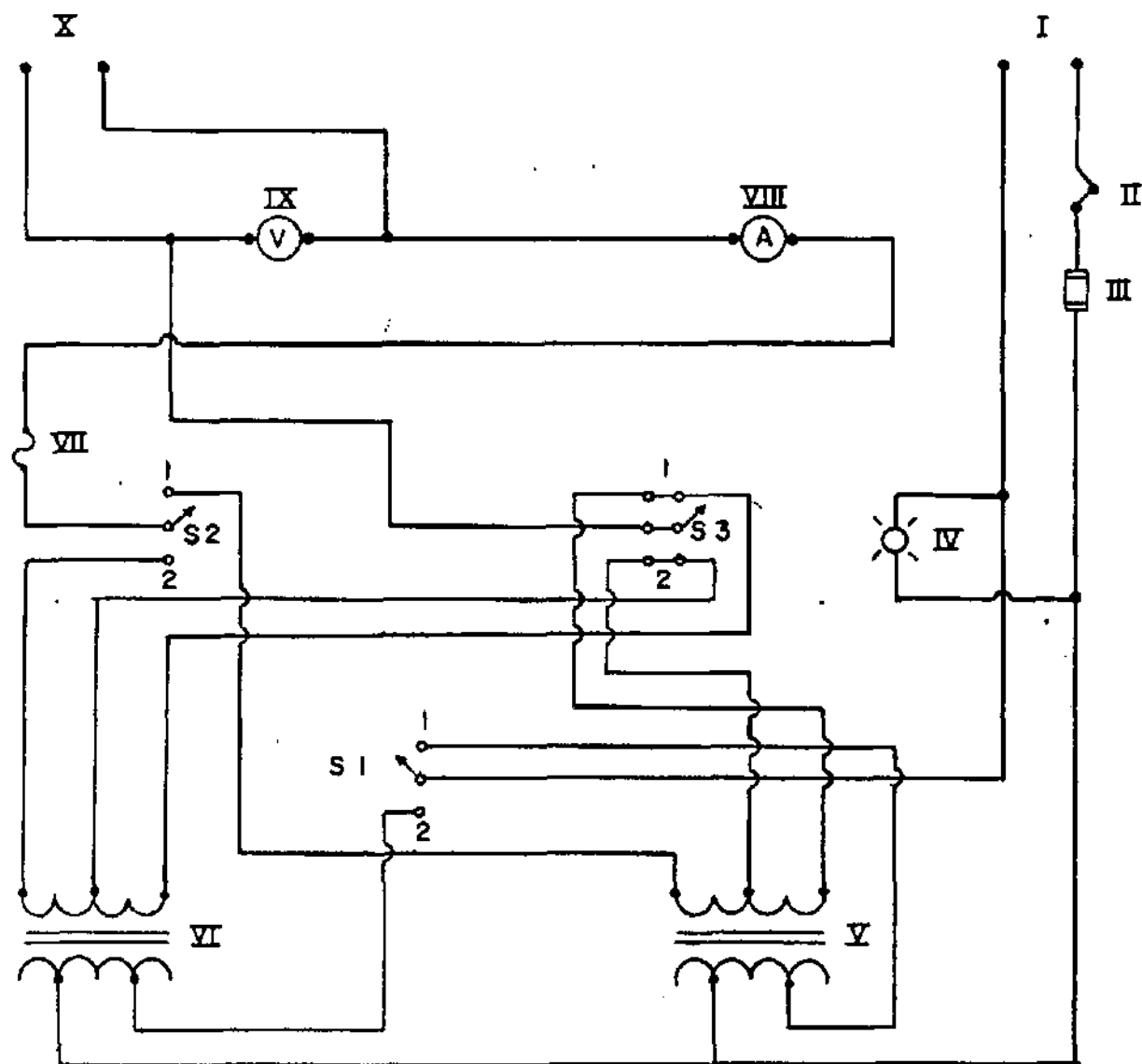


DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER



- I ACOMETIDA 110/125 V
- II SWITCH GENERAL
- III FUSIBLE GENERAL 1 A
- IV FOCO PILOTO
- V TRANSFORMADOR 9 V-CT/5A
- VI TRANSFORMADOR 6 V-CT/3A
- VII FUSIBLE 5 A
- VIII AMPERIMETRO 0-5A/AC
- IX VOLTIMETRO 0-10V/AC
- X TOMACORRIENTE 0-5A/0-10V
- S1 SELECTOR DE ENTRADA
- S2 SELECTOR DE SALIDA
- S3 SELECTOR DE VOLTAJE

FIG. 3.2 DIAGRAMA ELECTRICO

cia se conectan mediante unas zapatas a un alambre de cobre, que se hace pasar a lo largo del tubo a través de unos tapones de corcho, quedando en ambos lados los extremos que, a su vez se conectan mediante zapatas a una terminal que se conecta en el tomacorriente de la fuente de poder, que es alimentada mediante corriente alterna de 110/125V. De esta forma, se hace pasar una corriente eléctrica a través de la resistencia, y ésta al calentarse -- transmitirá el calor al material aislante a través del tubo, calentando así este material. De la corriente suministrada podemos calcular el flujo de calor que se transfiere al aislante, y conociendo la diferencia de temperaturas, así como el radio, el espesor y la longitud del aislante térmico, podremos calcular su conductividad térmica a ciertas condiciones, de manera, que podamos compararlo con los otros materiales utilizados.

En nuestro estudio emplearemos aislantes térmicos que son comunes en la industria, tales como el Vitroform, el Pamsil y la Vermiculita (pexel), de los cuales hablaremos posteriormente. El aislamiento se coloca sobre el tubo de vidrio, y para conocer la temperatura se colocan termómetros sobre el aislamiento a un nivel exterior, nivel medio y nivel interior, efectuando perforaciones sobre dicho material. Para ello, se utilizaron termómetros marca Taylor en un rango de -10 a 120°C, -20 a 150°C y -20 a 450°C para el nivel exterior, nivel medio y nivel interior, respectivamente.

La corriente eléctrica se suministra al equipo con una fuente de poder, cuyo diagrama eléctrico se muestra en la Fig. 3.2, ver la referencia 8, y que consta de las siguientes partes:

- a) Un switch general conectado a un foco piloto que nos indica cuando el equipo está en operación.
- b) Dos transformadores: uno de 9V-C.T./5A y otro de 6V-C.T./3A, de manera que, puede proporcionar al sistema voltajes de 3,-

6, 4.5 y 9V. Para evitar que estos transformadores se quemen por un cortocircuito, están protegidos por un fusible de tapón de 1A/125V.

- c) Tres selectores S1, S2 y S3, que sirven para seleccionar la entrada de corriente al transformador, salida de corriente - del transformador y voltaje alto o bajo, respectivamente. Es to con el fin de evitar que estén operando al mismo tiempo - los dos transformadores y se sobrecaliente la fuente de po-- der, al estar realizando las pruebas.
- d) Un amperímetro y un voltímetro, para tomar la lectura de la corriente de salida del transformador que está en operación, y poder calcular con estos datos el flujo de calor suminis-- trado al sistema. Para evitar que se quemen por una sobre-- carga, están protegidos por un fusible de cartucho de 5A/125V.
- e) Un tomacorriente para conectar las terminales de la resisten cia.

De esta forma, podremos realizar pruebas con el equipo en - diferentes condiciones de operación, manteniendo un flujo de calor constante, con cuatro voltajes diferentes. Así, podremos deter-- minar la conductividad térmica a diferentes temperaturas y obser-- var el comportamiento que presentan los materiales aislantes ana-- lizados.

C A P I T U L O I V

" O P E R A C I O N D E L E Q U I P O "

OPERACION DEL EQUIPO

Como ya se mencionó anteriormente, el equipo para determinar la conductividad térmica de los materiales aislantes que se van a comparar, consiste esencialmente de una fuente de calefacción, - de una fuente de poder y del aislamiento que se va a estudiar, ver Fig. 3.1. Ahora bien, para operar el equipo se conecta la fuente de poder al suministro de energía 110/125V A.C., conectando también las terminales de la resistencia a la fuente de poder. La - fuente de poder tiene dos transformadores, con los cuales podremos mantener cuatro condiciones de operación diferentes, a saber:

1ª.- TRANSFORMADOR 9V-C.T./5A, VOLTAJE ALTO.

La operación se muestra en la Fig. 4.1. Se energiza la fuente de poder con el switch general, siguiendo estos pasos:

- a) Colocar el selector S1 en la posición 1, para la entrada de corriente al transformador.
- b) Colocar el selector S2 en la posición 1, para la salida de corriente del transformador.
- c) Colocar el selector S3 en la posición 1, para seleccionar una operación a 9V.

2ª.- TRANSFORMADOR 9V-C.T./5A, VOLTAJE BAJO

La operación se muestra en la Fig. 4.2. Se energiza la fuente de poder con el switch general, siguiendo estos pasos:

- a) Colocar el selector S1 en la posición 1, para la entrada de corriente al transformador.

- b) Colocar el selector S2 en la posición 1, para la salida de corriente del transformador.
- c) Colocar el selector S3 en la posición 2, para seleccionar una operación a 4.5V.

3ª.- TRANSFORMADOR 6V-C.T./3A, VOLTAJE ALTO.

La operación se muestra en la Fig. 4.3. Se energiza la fuente de poder con el switch general, siguiendo estos pasos:

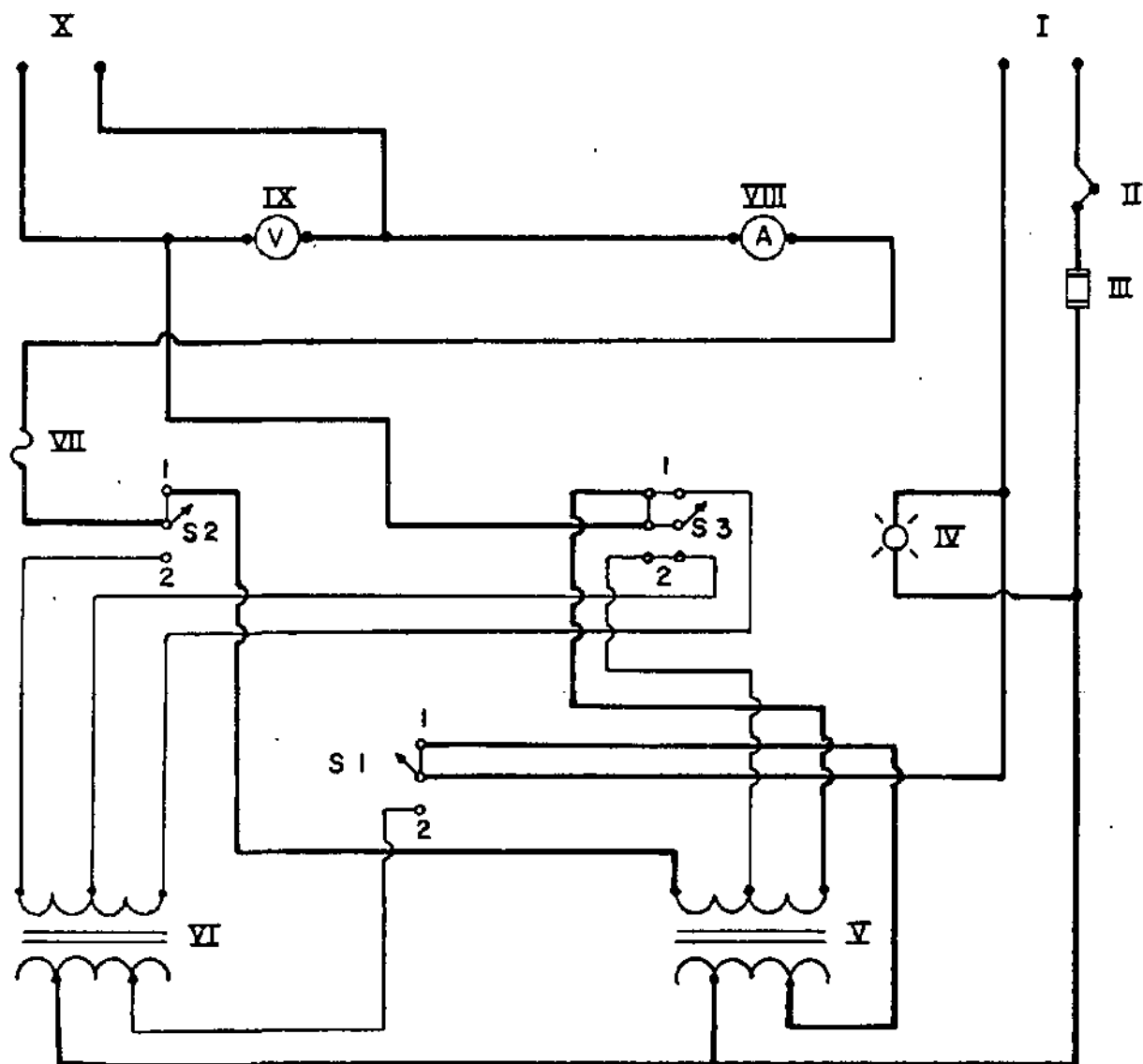
- a) Colocar el selector S1 en la posición 2, para la entrada de corriente al transformador.
- b) Colocar el selector S2 en la posición 2, para la salida de corriente del transformador.
- c) Colocar el selector S3 en la posición 1, para seleccionar una operación de 6V.

4ª.- TRANSFORMADOR 6V-C.T./3A, VOLTAJE BAJO.

La operación se muestra en la Fig. 4.4. Se energiza la fuente de poder con el switch general, siguiendo estos pasos:

- a) Colocar el selector S1 en la posición 2, para la entrada de corriente al transformador.
- b) Colocar el selector S2 en la posición 2, para la salida de corriente del transformador.
- c) Colocar el selector S3 en la posición 2, para seleccionar una operación de 3V.

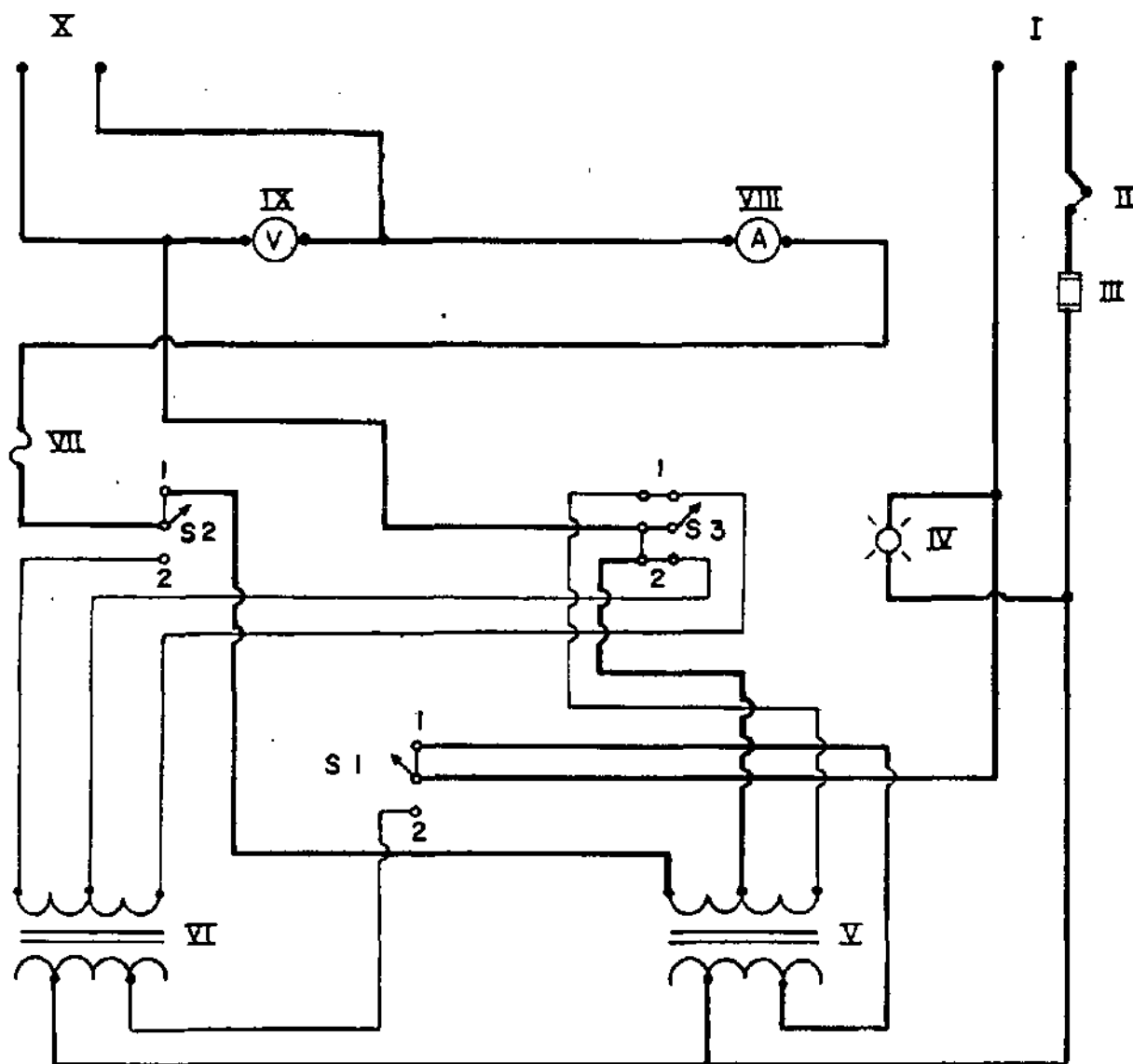
DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER



- I ACOMETIDA 110/125 V
- II SWITCH GENERAL
- III FUSIBLE GENERAL 1 A
- IV FOCO PILOTO
- V TRANSFORMADOR 9 V-CT/5 A
- VI TRANSFORMADOR 6 V-CT/3 A
- VII FUSIBLE 5 A
- VIII AMPERIMETRO 0-5 A/AC
- IX VOLTIMETRO 0-10 V/AC
- X TOMACORRIENTE 0-5 A/0-10 V
- S1 SELECTOR DE ENTRADA
- S2 SELECTOR DE SALIDA
- S3 SELECTOR DE VOLTAJE

FIG. 4.1 OPERACION DEL EQUIPO A 9 V.

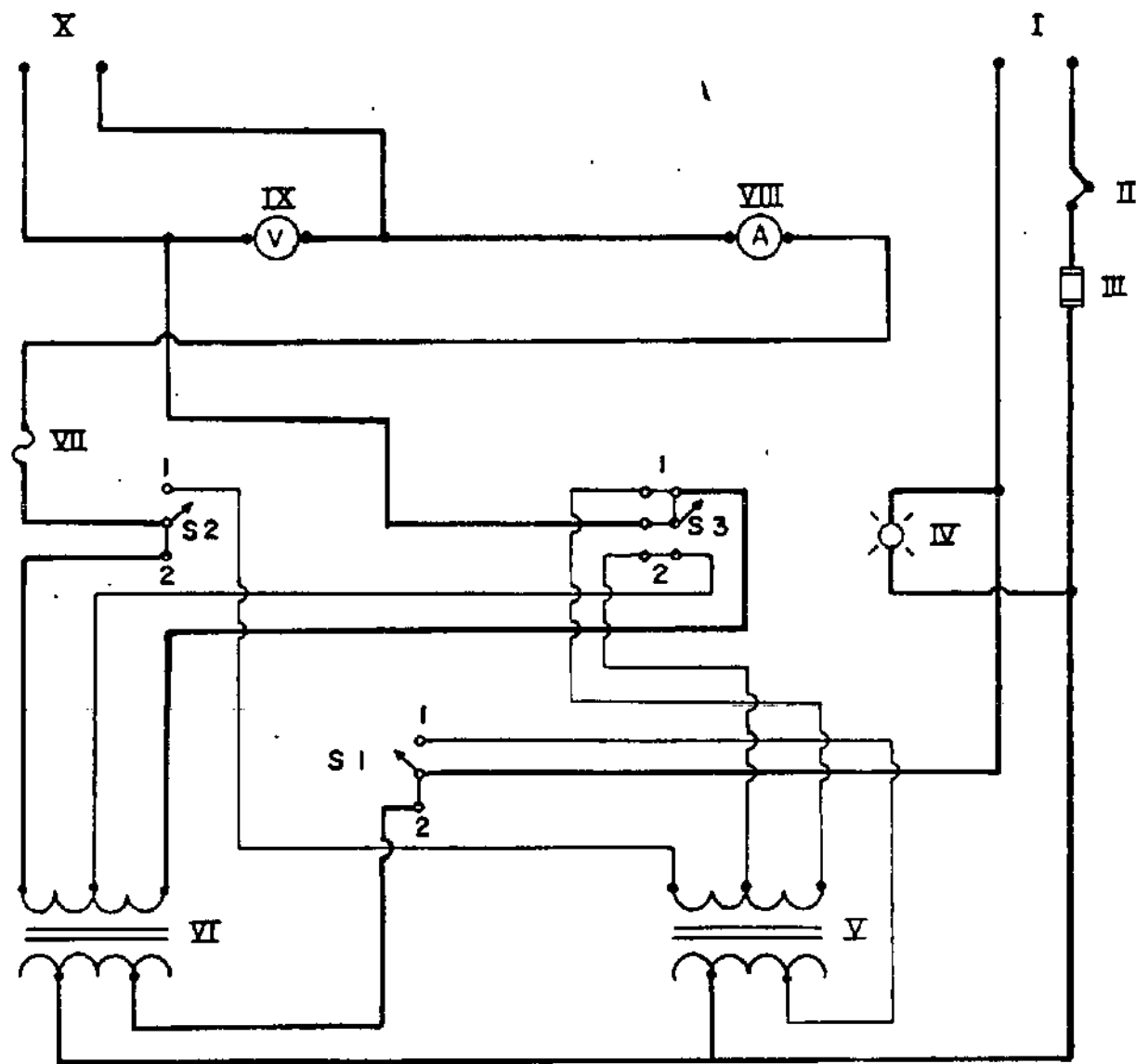
DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER



- I ACOMETIDA 110/125 V
- II SWITCH GENERAL
- III FUSIBLE GENERAL 1A
- IV FOCO PILOTO
- V TRANSFORMADOR 9V-CT/5A
- VI TRANSFORMADOR 6V-CT/3A
- VII FUSIBLE 5A
- VIII AMPERIMETRO 0-5A/AC
- IX VOLTIMETRO 0-10V/AC
- X TOMACORRIENTE 0-5A/0-10V
- S1 SELECTOR DE ENTRADA
- S2 SELECTOR DE SALIDA
- S3 SELECTOR DE VOLTAJE

FIG. 4.2 OPERACION DEL EQUIPO A 4.5 V.

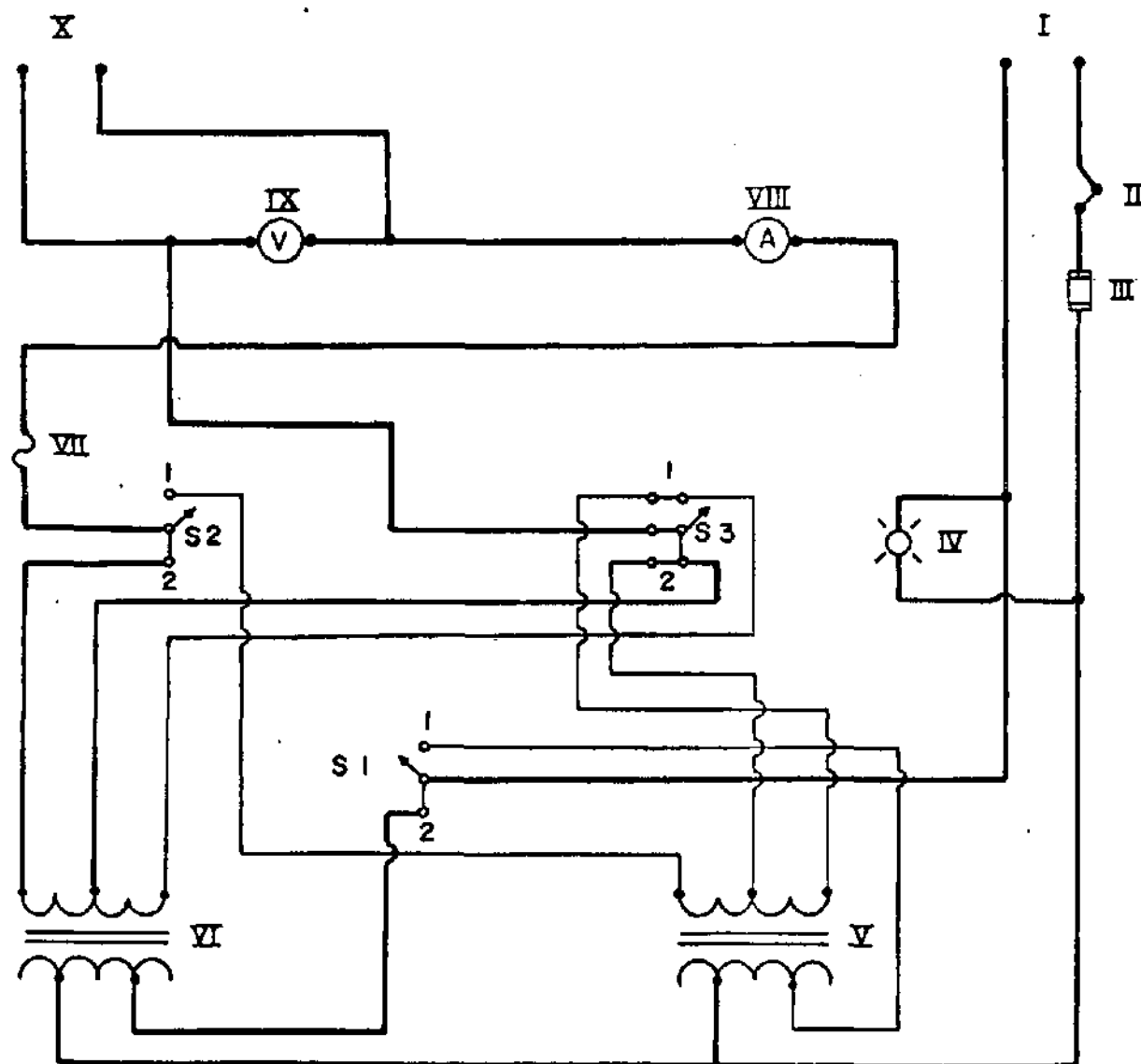
DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER



- I ACOMETIDA 110/125 V
- II SWITCH GENERAL
- III FUSIBLE GENERAL 1 A
- IV FOCO PILOTO
- V TRANSFORMADOR 9 V-CT/5A
- VI TRANSFORMADOR 6 V-CT/3 A
- VII FUSIBLE 5 A
- VIII AMPERIMETRO 0-5 A/AC
- IX VOLTIMETRO 0-10 V/AC
- X TOMACORRIENTE 0-5 A/0-10 V
- S1 SELECTOR DE ENTRADA
- S2 SELECTOR DE SALIDA
- S3 SELECTOR DE VOLTAJE

FIG. 4.3 OPERACION DEL EQUIPO A 6 V.

DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FUENTE DE PODER



- I ACOMETIDA 110/125 V
- II SWITCH GENERAL
- III FUSIBLE GENERAL 1 A
- IV FOCO PILOTO
- V TRANSFORMADOR 9 V-CT/5 A
- VI TRANSFORMADOR 6 V-CT/3 A
- VII FUSIBLE 5 A
- VIII AMPERIMETRO 0-5 A/AC
- IX VOLTIMETRO 0-10 V/AC
- X TOMACORRIENTE 0-5 A/0-10 V
- S 1 SELECTOR DE ENTRADA
- S 2 SELECTOR DE SALIDA
- S 3 SELECTOR DE VOLTAJE

FIG. 4.4 OPERACION DEL EQUIPO A 3 V.

Las pruebas se realizarán de la siguiente manera:

- 1.- Se coloca el aislamiento térmico, medias cañas de 20 cm. de longitud, sobre el tubo de vidrio, procurando que esté situado justamente sobre el elemento de calefacción. Se debe -- colocar de manera que, quede lo más justo posible a la superficie del tubo, sujetándolo mediante abrazaderas de aluminio. Además, se debe procurar sellar las uniones y juntas con -- una pasta hecha del mismo material, para evitar que existan -- fugas de flujo de calor.
- 2.- Se insertan los termómetros en las respectivas perforaciones, realizadas a diferentes niveles del material aislante. Sin -- embargo, debido a que la superficie de contacto entre la pared del tubo y el bulbo del termómetro es un área puntual, -- se debe procurar fijar este termómetro a la pared del tubo -- con un material que sea buen conductor de calor, en las pruebas realizadas se utilizó el THERMON (cemento conductor de -- calor). De esta forma, se obtendrá una lectura más real de la temperatura.
- 3.- Se conectan las terminales de la resistencia a la fuente de poder y se opera en cualquiera de las cuatro condiciones descritas anteriormente. Una vez seleccionada una condición de operación, se deja operando el equipo durante 20 minutos, para calentar el medio ambiente. A partir de este momento se considera un tiempo cero, y se comienza a tomar lectura de -- la temperatura en los diferentes niveles, a intervalos de -- tiempo de 5 minutos, hasta alcanzar una condición estable -- en la que la variación de temperatura sea mínima.
Para que la prueba sea mejor, se deben eliminar las corrientes de aire que afecten la temperatura ambiente, una solu -- ción sencilla es cubrir todo el equipo con una bolsa de polietileno.

Se registran las temperaturas obtenidas y se repiten las ---

pruebas para cada condición de operación. Antes de iniciar otra prueba, se deja enfriando el equipo, hasta que los termómetros indiquen la temperatura ambiente, se puede utilizar aire a presión para enfriarlo más rápidamente.

- 4.- Se repiten las pruebas con cada material aislante utilizado, calculando su respectiva conductividad térmica, y reportándose los valores obtenidos a la temperatura de la superficie - del tubo sin aislante. Así mismo, se calcula la potencia su ministrada tomando lecturas del voltaje y amperaje de los - medidores de tablero, y convirtiendo a las unidades requeridas.

Se calcula la conductividad térmica a diferentes temperaturas, comparando así el comportamiento de los diferentes aislamientos térmicos analizados.

C A P I T U L O V

" P R U E B A S Y D E T E R M I N A C I O N
 D E L A
C O N D U C T I V I D A D T E R M I C A "

5.1 VITROFORM

VITROFORM es un aislamiento preformado para tuberías, Fig. - 5.1, que se fabrica con fibra de vidrio aglutinada con resina fenólica de fraguado térmico, moldeada para ajustarse a la superficie de la tubería de medidas comerciales, tanto de fierro como de cobre.

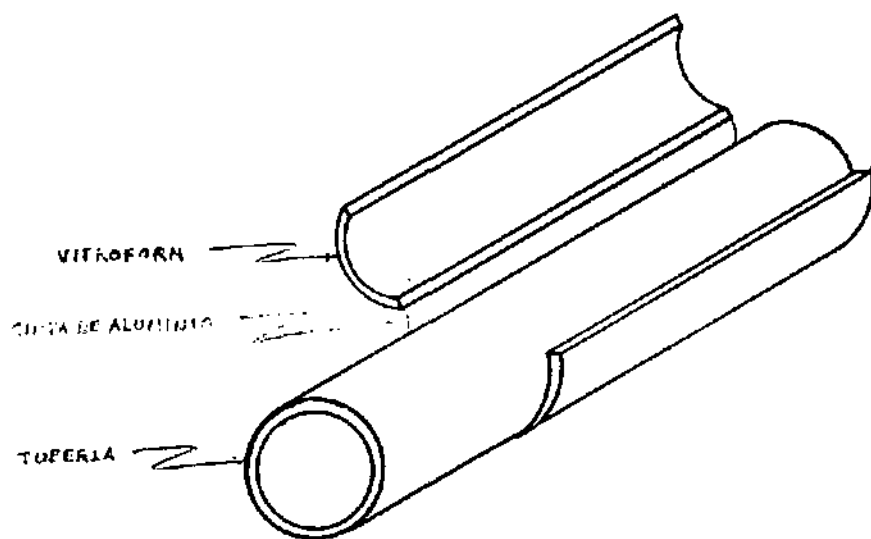


Fig. 5.1 Vitroform

Se proporciona con la rigidez necesaria para soportar los abusos mecánicos normales en toda instalación industrial. Se presenta con una apariencia de color amarillo.

VITROFORM es surtido en tramos de 91 cm. (35.8") de longitud y en diversos diámetros y espesores. El material es surtido ahora sin recubrimiento, lo cual da mayor flexibilidad para seleccionar el acabado deseado.

Cada tramo se surte con dos flejes de aluminio de 1.91 cm -

(3/4") de ancho, que sujetan el recubrimiento en ambos extremos.

La variación en diámetros y espesores permite colocar un pre formado encima de otro, cuando el espesor requerido sea mayor a los obtenidos normalmente.

VITROFORM se fabrica para diámetros de tuberías standard de fierro de 1/2" a 12" (I.D.) o de cobre de 1/2" a 3" (O.D.). Los espesores varían de 3/4" a 2".

Las ventajas que ofrece VITROFORM son:

- Máxima eficiencia térmica.
- Incombustible.
- Dimensionalmente estable.
- Inorgánico.
- No favorece la corrosión.
- Fácil de instalar y manejar.
- Económico.

Sus características físicas son:

- Densidad: 5 lb/ cft (80 kg/m³).
- Calor específico: 0.20 Btu/lb/°F.
- Capilaridad: despreciable después de 24 hrs.
- Normas: sigue el A.S.T.M. C-547-Clase I.

- Valor de permeancia al vapor de agua: con un recubrimiento de PyroVit, 0.01 granos por hora por pie² por pulgada de Hg.
- Difusividad térmica: 0.015 ft²/hr a 75°F (24°C) de temperatura promedio (0.0014 m²/hr).
- Corrosión de acero y aluminio: no se provoca o acelera.

En la tabla 5.1, se muestran los espesores recomendados para diferentes diámetros de tubería de cobre.

Tabla 5.1 Medidas de VITROFORM para tuberías de cobre.

DIAMETRO		ESPESORES	
pulgs.	mm	pulgs.	pulgs.
1/2	12.7	1/2	1
3/4	19.1	1/2	1
1	25.4	1/2	1
1 1/4	32.0	1/2	1
1 1/2	38.0	1/2	1
2	51.0		1
2 1/2	64.0		1
3	76.0		1

Las especificaciones para instalar el VITROFORM, son las siguientes:

- 1.- La superficie de las tuberías por aislar deberá encontrarse completamente limpia y seca antes de colocar el aislamiento. Es recomendable aplicar una capa de pintura anticorrosiva a la superficie del tubo.
- 2.- Cuando la superficie de la tubería esté lista para ser aisla

da, se aplicará el aislamiento VITROFORM de acuerdo con el espesor indicado, tabla 5.1, según se trate de bajas o altas temperaturas.

El VITROFORM se instala colocando las medias cañas en torno a la tubería. Si se recubre con una manta, ésta deberá retirarse y aplicar sobre ella los flejes de aluminio, o bien alambre galvanizado con objeto de que el aislamiento quede sujeto firmemente a la tubería.

- 3.- Para acabados finales se recomienda tomar en consideración si la instalación es fría o caliente, si está en el interior o a la intemperie, si hay o no cierto abuso mecánico.
- 4.- Si la instalación es caliente y está situada en el interior y donde no esté sometida a ningún abuso mecánico, podrá dejarse la cubierta de manta como acabado final, o si se prefiere, se podrán aplicar dos manos de pintura impermeable como acabado final sobre la manta.
- 5.- Si la instalación es caliente y está situada en el interior, pero donde exista abuso mecánico, se recomienda protegerse con un recubrimiento rígido como lámina galvanizada o de aluminio, en el espesor que se prefiera. Generalmente es de calibre 26 a 32. Los trasplantes de las láminas deberán ser al menos de 2" (5.08 cm). Las láminas se sujetarán con flejes galvanizados o de acero inoxidable de 3/4" (1.27 cms.) colocados de 9" a 12" (22.9 a 30.5 cms.) centro a centro.
- 6.- Para instalaciones calientes a la intemperie, el aislamiento deberá protegerse como se explicó en el punto 5, pero sellando las juntas de las chaquetas de lámina con un impermeabilizante de reconocido prestigio.
- 7.- Para instalaciones frías, se recomienda el uso del VITROFORM

con cubierta de Pyro-Vit. El Pyro-Vit, actúa como barrera de vapor con una permeancia de 0.01 granos por hora por pie² por pulgada de mercurio.

Todos los materiales aislantes en el mercado para instalaciones frías requieren de barrera de vapor que evitará condensaciones o formaciones de hielo dentro del aislamiento.

- 8.- En instalaciones frías interiores sin abuso mecánico se podrá instalar el VITROFORM, dejando acabado el Pyro-Vit con sus juntas longitudinales y transversales debidamente selladas con un material que constituya barrera de vapor. Los flejes ayudarán también a mantener la cubierta.
- 9.- Para instalaciones frías a la intemperie se recomienda instalar el material en la forma descrita en el punto 8, pero protegiendo la instalación con una chaqueta de lámina galvanizada o de aluminio, calibre 26 a 32, como se mencionó en el punto 6. La chaqueta metálica va sobre la cubierta de Pyro-Vit, debidamente sellada como se mencionó. Las juntas de la cubierta metálica deben sellarse con un material impermeabilizante. Es muy importante que la barrera de vapor no tenga ninguna perforación y si la hay, deberán sellarse perfectamente.

Así también, existen otras especificaciones para instalar el VITROFORM, las cuales se pueden solicitar al fabricante.

El VITROFORM debe usarse para la temperatura de operación -- entre -84°C hasta 232°C (-120°F hasta 450°F). Su almacenaje deberá hacerse en lugares protegidos de la intemperie.

5.2 PAMSIL

PAMSIL es un aislante térmico de media y alta temperatura; - fabricado por millones de celdas vitrificadas de perlita expandida y aglutinadas con silicato de sodio, se suministra en medias cañas para aislamiento de tuberías y en bloques para recubrimiento de superficies planas o curvas de gran radio. El silicato de sodio actúa como endurecedor, para darle rigidez a la media caña. Este se mezcla en una cantidad adecuada (20% del total de mezcla añadida) con la perlita expandida y se comprime en una prensa caliente a presión (35 a 49 kg/cm²), y se retira formando así las medias cañas con longitud y espesores requeridos para diferentes casos.

El PAMSIL se proporciona en medias cañas de 36" de longitud y diámetros y espesores indicados por el fabricante, con anchos de 6", 12" y 18", y espesores de 1" a 5 1/2" en incrementos de 1/2".

Las ventajas del PAMSIL son:

- Máxima eficiencia térmica.
- Gran resistencia mecánica.
- Insoluble en agua fría o caliente.
- Libre de asbesto, evitando la contaminación.
- No ataca el acero inoxidable conforme especificación DANA de DUPONT.
- Fácil de cortar.
- Incombustible e inorgánico.

- Dimensiones estables.
- Resistencia química.
- Liviano.

PAMSIL es el resultado de investigaciones llevadas a cabo por E.I. DUPONT con el fin de obtener un material aislante que efectivamente ayude a prevenir la acción corrosiva desintegradora del acero inoxidable.

El interés de DUPONT en este problema era el resultado de serias fallas de tuberías y equipos aislados bajo condiciones de la Costa del Golfo.

La industria ha desarrollado aislamiento que no han ayudado a este problema.

Pero PAMSIL, fué el primer material desarrollado que ayuda a prevenir tal ataque corrosivo del acero inoxidable.

Es de nuestro conocimiento que PAMSIL, es el único material que pasa rigurosa prueba acelerada "DANA". Es una prueba que determina que tan bueno es el material para detener la migración de iones cloros hacia la superficie metálica.

PAMSIL, por lo tanto, no es solo un material aislante, sino que resuelve un serio problema metalúrgico y elimina la necesidad de aplicar un caro recubrimiento de alta temperatura anticorrosivo a las superficies metálicas antes de instalar el aislamiento.

Propiedades físicas:

- Límite de temperatura de servicio: 760°C (1400°F)

- Densidad seco: 0.22grs/cm³ 13.75 lbs/ft³
- Resistencia a la flexión: 3.86kgs/cm² 55 psi
- Resistencia a la compresión: 6.32kgs/cm² 90 psi
- Encogimiento lineal: a 1500°F 0.74%
- Cumple con las siguientes normas:

ASTM C-303, C-203, C-165, C-356 y C-177

ASTM C-610-67

MILITARY MIL-1-24244

DANA TEST (E.I. DUPONT)

OAK RIDGE LAB.STD.RDT-M12-IT (ATOMIC ENERGY)

Los espesores recomendados están dados por el fabricante para una temperatura ambiente de 68°F y a condición "dentro de edificios sin movimiento forzado de aire" según ASHVE (American Society for Heating and Ventilation Engineers).

Para tuberías en exteriores generalmente conviene pasar al espesor inmediato superior para evitar el efecto del viento y de temperaturas menores.

El sistema de instalación en tuberías se muestra en la Fig.- 5.2 donde:

- 1.- Aislamiento en medias cañas de PAMSIL traslapadas.
- 2.- Sello de juntas con cemento aislante PAMSIL.

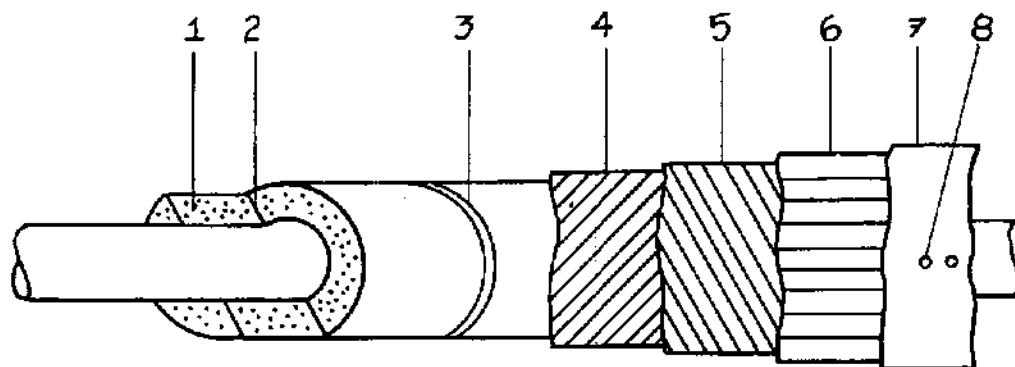


Fig. 5.2 Sistema de instalación del PAMSIL

- 3.- Sujección de medias cañas con alambre galvanizado calibre 16 para tuberías hasta 5".
- 4.- Tela de refuerzo de manta o fibra de vidrio.
- 5.- Mastique protector de intemperie.
- 6.- Pintura vinílica, según código de colores.
- 7.- Lámina galvanizada o de aluminio calibre 26.
- 8.- Fleje galvanizado o inoxidable 3/4" x 0.020" o tornillos pi-ja galvanizados o inoxidable de 1/82 x 1/2" cada 45 y cada-15 cms., respectivamente.

5.3 VERMICULITA

VERMICULITA, es el nombre geológico de un grupo de minerales laminados e hidratados, que están constituidos por silicatos de - hierro, magnesio, potasio y calcio, con una apariencia semejante a la mica.

La estructura y las propiedades de los minerales de silica--tos, se determinan según el modo en que la continuidad de los tetraedros de SiO_4 se extiende en toda la estructura. El enlace Si-O es el más fuerte de la estructura, y los átomos de oxígeno - son los que tienen mayor radio, de manera que la disposición del esqueleto formado por los átomos de silicio y oxígeno determina - el número y la posición de los cationes básicos que completan el cristal. Aunque se usan frecuentemente los términos "orto-silicato" y "meta-silicato", para designar compuestos que pueden considerarse como derivados de los ácidos hipotéticos H_4SiO_4 y H_2SiO_3 , no son los silicatos sales de varios ácidos silícicos y sus es--tructuras no concuerdan de la derivación teórica que puede hacerse de tales ácidos. La complejidad de las estructuras posibles, - aumenta por la posibilidad de sustituir los átomos de silicio con átomos de aluminio, con lo que se modifica la relación existente entre el oxígeno y el silicio y se altera en consecuencia, el número de átomos básicos necesarios para satisfacer las reglas de - valencia.

Los diversos silicatos pueden clasificarse con arreglo al tipo de red Si-O. Las investigaciones de Bragg son la base de una buena parte de nuestros conocimientos acerca de la estructura de los silicatos. Aquí seguimos la nomenclatura propuesta por Strunz y Fleisher, quienes clasifican los silicatos en cinco grupos:

- 1.- NESOSILICATOS.- Formados por minerales que tienen grupos - SiO_4 separados; los cuatro átomos de oxígeno que rodean a un

átomo de silicio, no están ligados a ningún otro átomo de silicio, por lo que cada átomo de oxígeno tiene valencia de -1 no satisfecha, que ha de satisfacerse con átomos básicos; la forma tipo es $Am(BX_4)_n$.

2.- INOSILICATOS.- Que tienen cadenas de Si-O, como los piróxenos y los anfíboles; la forma tipo es $Am(BX_3)_n$.

3.- FILOSILICATOS.- Que se caracterizan por la presencia de láminas de Si-O formadas por la unión de tres vértices de cada tetraedro de SiO_4 con los tetraedros vecinos, de manera que cada tetraedro tiene tres átomos de oxígeno compartidos y uno libre; la forma tipo es $Am(B_2X_5)_n$.

4.- TECTOSILICATOS.- Caracterizados por una red continua de tetraedros ligados entre sí, semejante a la red de cuarzo, la tridimita y la cristobalita, excepto que algunos de los átomos tetravalentes de silicio se han sustituido por aluminio, lo que exige la incorporación de cationes metálicos a la estructura para satisfacer las reglas de valencia; la forma tipo es $Am(BX_2)_n$.

5.- SOROSILICATOS.- También llamados silicatos de grupo, en los que dos tetraedros de SiO_4 unidos entre sí, forman el grupo Si_2O_7 ; la forma tipo es $Am(B_3X_4)_n$ ó $Am(B_6X_{18})_n$.

Existen unos 800 minerales de silicatos y solo mencionaremos aquí una pequeña parte de los mismos, aproximadamente 20% del total. Sin embargo, la mayoría de los minerales más comunes están incluidos en el estudio que sigue, y la mayoría de los que se han omitido son minerales raros. Además de los silicatos que no se encuentran en la naturaleza, estos se han preparado en relación con estudios realizados acerca de las relaciones de equilibrio de fases en los sistemas de silicatos. Muchos compuestos --

de esta clase han sido descritos en artículos publicados por el Laboratorio de Geofísica. En la Tabla 5.2, se indican algunas propiedades de los silicatos.

Las micas forman un grupo de minerales que en general cristalizan en el sistema monoclinico, aunque algunos son hexagonales o triclinicos. Tienen una exfoliación basal perfecta y forman láminas delgadas, tenaces y más o menos elásticas. En este grupo se incluyen la Moscovita, $kAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$; Paragonita, $NaAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$; Flogopita, $kMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$; Lepidolita, $kLi_2(AlSi_4O_{10})(F,OH)_2$, y $kLiAl_2(Al_2Si_2O_{10})(F,OH)_2$; y Zinwaldita, $--kLiFeAl(AlSi_3O_{10})(OH)_2$.

La clave de la estructura de la mica fué dada por Pauling; Hendricks esclareció el conocimiento de la estructura de las micas y su polimorfismo.

La estructura de una mica típica, la Moscovita, muestra la red hexagonal de los tetraedros de sílice formados al ligar tres vértices de cada tetraedro a tetraedros adyacentes. Todos los tetraedros apuntan hacia abajo. Los átomos inferiores de oxígeno forman anillos, dentro de los cuales se encuentra un hidroxilo que forma una capa apretada con átomos situados en los vértices de un triángulo equilátero. Esta capa se ajusta dentro de una capa parecida a la red adyacente.

Las capas dobles adyacentes están como si fuesen imágenes mutuas en un espejo situado en un plano central. Entre las capas hay lugar para los átomos de magnesio o de aluminio en coordinación senaria o para átomos de Mg y Fe, como en la Flagopita y la Biotita. Los dos anillos hexagonales opuestos están ligados entre sí por medio de una capa de átomos de k, con una coordinación de grado duodécimo. La simetría de la estructura no es hexagonal, sino monoclinica, porque la simetría haxagonal se pierde cuando se encuentra frente a frente dos láminas para formar una lámina

TABLA 5.2 PROPIEDADES DE LAS FORMAS DE SILICE Y DE LOS MINERALES DE SILICATOS (13)

SUSTANCIA	FORMA CRISTALINA	INDICES DE REFRACCION			DUREZA	DENSIDAD
MOSCOVITA	PLACAS MONICLINICAS	1.558	1.595	1.601	3 - 4	-
FLOGOPITA	PLACAS HEXAGONALES - MONOCLINICAS	1.551	1.598	1.598	3 - 4	-
BIOTITA	PLACAS HEXAGONALES - MONOCLINICAS	1.573	1.620	1.629	3	3.10
LEPIDOLITA	MONOCLINICO SEUDO -- HEXAGONAL	1.530	1.553	1.556	-	2.82
ZINWALDITA	PLACAS HEXAGONALES - MONOCLINICAS	1.551	1.578	1.581	3	2.99
MARGARITA	MONOCLINICO, TABLE - TAS HEXAGONALES	1.632	1.643	1.645	4	3.00
PIROFILITA	ORTORROMBICO TUBULAR	1.552	1.588	1.600	1 - 2	2.80
TALCO	PRISMA MONOCLINICO	1.539	1.584	1.589	1	2.70
PREHNITA	ORTORROMBICO	1.629	1.629	1.652	6	2.90
GLAUCONITA	MONOCLINICO EN PLACAS	1.590	1.614	1.615	-	2.50
ANTIGORITA	ORTORRÓMBICO FIBROSO	1.490	1.502	1.511	4 - 5	2.60
AMESITA	PLACAS SEUDOHXAGO -- NALES	-	1.612	-	2 - 3	2.77
DAFNITA	PLACAS MONOCLINICAS - FIBROSAS	1.643	1.649	1.649	BLANDA	-
CAOLINITA	PLACAS HEXAGONALES - MONOCLINICAS	1.561	1.565	1.566	2	2.60

TABLA 5.2 PROPIEDADES DE LAS FORMAS DE SILICE Y DE LOS MINERALES DE SILICATOS

SUSTANCIA	FORMA CRISTALINA	INDICE DE REFRACCION			DUREZA	DENSIDAD
DICKITA	PLACAS HEXAGONALES - MONOCLINICAS	1.561	1.563	1.567	2	2.60
NACRITA	TUBULAR MONOCLINICO	1.557	1.562	1.563	-	-
PIROFILITA	ORTORROMBICO TUBULAR	1.552	1.588	1.600	1 - 2	2.80
SAPONITA	MONOCLINICO	1.520	1.525	1.527	BLANDA	2.26
VERNICULITA	PLACAS MONOCLINICAS HEXAGONALES	1.542	1.573	1.573	1	-

doble , y los hidroxilos y los oxígenos no se encuentran en planos opuestos, sino al tresbolillo. La exfoliación característica de la mica es una consecuencia de esta estructura.

La Moscovita, Flogopita, Biotita y Paragonita tienen estructuras parecidas. En la Moscovita hay alternación de capas de $2k$ con capas de $2Al_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$. En la mica margarita, que es quebradiza, las hojas de tetraedros ligados tienen la composición $(Al_2Si_2O_{10})$, y la carga doble en la hoja doble está equilibrada mediante la sustitución de k por la Ca para dar $CaAl_2(Al_2Si_2O_{10})(OH)_2$.

Ha de hacerse resaltar que todas las composiciones y estructuras indicadas anteriormente han sido idealizadas y que los minerales naturales poseen una variedad sorprendente de composiciones resultantes de la sustitución isomórfica; el flúor reemplaza frecuentemente a algunos hidroxilos, algunas micas están alteradas parcialmente para formar hidromicas, tales como la Damourita y la Sericita.

Las micas están difundidas. Son constituyentes originales de la Sienita Granítica y de la Sienita Nefelínica. Las micas también pueden formarse por alteración de otros minerales, ya por metamorfismo regional o por metamorfismo de contacto. En las Pegmatitas se encuentran hojas grandes de mica y aquellas son la fuente comercial de la mayoría de las micas.

La mica debe su valor industrial a su propiedad de dividirse en hojas finas que tienen gran resistencia eléctrica y poder dieléctrico. La mayor parte de la mica del comercio se utiliza para aislamientos eléctricos; pero las hojas claras y transparentes de Moscovita se utilizan cuando se necesita un material transparente resistente al calor y a la ruptura, propiedades que son esenciales en las ventanas para estufas o para hornos industriales, anteojos y caretas contra gases. Para los usos indicados se-

prefiere la Moscovita; la Biotita se usa como relleno en la industria del caucho y en los techados.

Las vermiculitas son minerales parecidos a la mica, de composición indefinida y variables. Gruner ha demostrado que son de un tipo específico, con un promedio de sus celdas unitarias que corresponde aproximadamente a $(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2(4\text{H}_2\text{O})$. La estructura se parece a la de las micas y las cloritas; pero la capa intermedia, que en la micas contiene iones alcalinos o alcalinotérreos y en las cloritas está formado por $\text{Mg}(\text{OH})_2$, está formado por agua; $4\text{H}_2\text{O}$ ocupan casi el mismo espacio que $3\text{Mg}(\text{OH})_2$. Las vermiculitas son productos de alteración, principalmente de las micas. Recientemente han adquirido importancia industrial, porque al calentarlas para expulsar el agua, se hinchan y forman un valioso material aislante.

Yacimientos de este material, son encontrados en varias partes del mundo, y en su explotación se usa el método de la mina abierta, el mineral en crudo se tritura, se eliminan sus impurezas, y se selecciona en varios tamaños, finalmente se trata a altas temperaturas en horno continuo expandiéndose, en más o menos 140 veces su volumen, en forma de gusanillos, de donde proviene su nombre.

El aumento de volumen, su color plateado o dorado y su baja capacidad calorífica lo hace un material con una conductividad térmica muy baja por lo que resulta ideal para aislamiento de calor y sonido.

Un análisis químico promedio es el siguiente:

Sílice _____ SiO_2 _____ 39.3%

Alúmina _____ Al_2O_3 _____ 11.8%

Oxido de Hierro	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO}$	6.6%
Bióxido de Titanio	TiO_2	1.2%
Magnesia	MgO	22.8%
Oxido de Calcio	CaO	1.3%
Oxido de Potasio	K_2O	12.2%
Agua (libre o combinada)		12.2%

Sus propiedades son:

- Aislante.
- Refractario.
- Incombustible.
- Moldeable.
- No abrasivos.
- No irritante.
- Químicamente inerte.
- Punto de fusión arriba de los 1800°C .
- Calor específico de 0.20 cal/gr .
- Densidad en seco de 0.4448 gr/cm^3 .

Sus usos principales son:

* EN LAS CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES

AISLAMIENTOS TERMICOS

Concretos aislantes, puestos debajo de la impermeabilización de las azoteas o tejas.

Concretos reflejantes, debajo de paneles radiantes.

Aplanados y colados aislantes para limitar introducción de calor en los concretos de carga.

Aislamiento de chimeneas y tubos para chimeneas.

PROTECCION CONTRA INCENDIOS

Aplanados de vermiculita para protección contra incendios de almacenes y colados de concreto contra fuego que proviene de arriba.

Paredes corta fuego.

ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD

Eliminación de la condensación de vapor en locales donde se produce una fuerte cantidad de vapor (tintorerías, fábricas de papel, etc.).

Eliminación de infiltraciones de agua de paredes contra terraplenes.

ABSORCION ACUSTICA

Disminución de niveles sonoros en edificios ruidosos (fábricas de tejidos, talleres, tipográficos, cuartos de prueba de motores, oficinas ruidosas), aislamiento acústico entre locales en diferentes niveles sonoros.

* EN LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES EN GENERAL

A TEMPERATURAS ALTAS Y MEDIANAS

Aislamiento de hornos (eléctricos, de petróleo o de gas), - calderas, secadores, calentadores de cualquier temperatura, - aislamiento en equipo de laboratorio para la fabricación de productos químicos, aislamientos de tuberías de vapor sobre- calentado, saturado, agua caliente y sobrecalentada (con --- ducciones aéreas, en canales completamente enterradas), ais- lamiento de tuberías de aire caliente enterradas.

TEMPERATURAS BAJAS

Cámaras frigoríficas y almacenes refrigerantes.

Cámaras para vinos e instalaciones vinícolas, tuberías refri- geradas.

Aislamiento en columnas de fraccionamiento de aire líquido.

AISLAMIENTO TÉRMICO Y ANTICONDENSANTE

Aislamiento de depósitos de cualquier dimensión para agua - fría, caliente y productos químicos.

Eliminación de condensaciones en conductores de agua fría.

* EN LA INDUSTRIA METALURGICA

Aislamiento en cajones para transporte a cualquier distancia de lingotes incandescentes de la fábrica a las fraguas.

Recocido a enfriamiento muy lento de piezas de todos tamaños.

* EN LAS CENTRALES ELECTRICAS

Pavimentos secos y no conductores de la electricidad.

Paredes corta-fuego para locales de transformadores.

* EN LA INDUSTRIA MECANICA EN GENERAL

Bases antivibrantes para prensas, aparatos de precisión para mejorar las condiciones de funcionamiento, en máquinas para-reducir las vibraciones en las transmisiones.

Lubricación en seco de cojinetes fuertemente cargados especialmente si funcionan a temperaturas altas.

* EN LA INDUSTRIA DE ZINC Y ESTAÑO

Aislamiento antioxidante en tanques de zincado y estañado - (sobre metal fundido).

Aislamiento térmico en tanques de galvanizado (en caliente).

* EN LAS CONSTRUCCIONES NAVALES

Pavimentaciones ligeras en las partes internas de los navíos.

Aislamiento de tuberías de vapor, agua, aire, etc.

Bodegas de refrigeración y celdas o cámaras frigoríficas con materiales aislantes simultáneamente contra incendios.

* EN LA AGRICULTURA

Se usa como acondicionador de suelos y como portador iónico-en el metabolismo vegetal.

* EN LA INDUSTRIA DE PLASTICOS

Se usa como carga y ornamental.

De acuerdo con su granulometría se presentan para su venta - en los siguientes tipos;

VERMICULITA TIPO "B-ESPECIAL"

VERMICULITA TIPO "B-1"

VERMICULITA TIPO "C-1"

VERMICULITA TIPO "C-2"

La VERMICULITA TIPO "B-ESPECIAL", se emplea como ornamental-
en aplanados de muros y plafones, y como aislamiento en do--
ble pared.

La VERMICULITA TIPO "B-1", se emplea como aislamiento para -
relleno en doble pared.

Aislamiento en hornos eléctricos.

Aislamiento de calderas.

Aislamiento de frío y en cámaras refrigerantes.

La VERMICULITA TIPO "C-1", se emplea en silenciadores de des-
carga de gas, para autos.

Aislamiento contra fuego para cajas fuertes y locales -
de guarda valores.

Ladrillos aislantes para temperaturas hasta 1000°C.

Para bases antivibrantes.

La VERMICULITA TIPO "C-2", se emplea para cementos aislantes.

Aislamiento en autos, autobuses, aviones, etc.

Preparación de vidrios aislantes tipo marino.

Filtros de toda clase (para filtrar cristales de hidro-
carburo en aire líquido).

Inerte para bombas de acetileno disuelta en acetona.

Como portador iónico en el metabolismo vegetal y como-
acondicionador de suelos.

Existen formas especiales prefabricadas tales como:

- * PLACAS "VER-VIC".- Están constituidas por vermiculita, tie-
rras diatomaceas y aglutinantes inorgánicos. Sus dimensio-
nes son: 0.90x0.25m y espesores de:

1 pulgada	2.54 cm.
1 1/2 pulgada	3.81 cm
2 pulgadas	5.80 cm.

Se usa para aislamientos de tanques, calderas, autoclaves, - etc. Para bajas y altas temperaturas hasta 1050°C con una - conductividad térmica de 0.32 Btu/(h)(pie²)(°F/pulg.) [0.034 Kcal/(h)(m²)(°C/m)] a 100°F (38°C).

* MEDIAS CAÑAS "BEXEL".- Se encuentran constituidas por vermiculita, tierra diatomacea y aglutinantes inorgánicos. Sus dimensiones son standards de 1/2" hasta 12" (1.3 hasta 30.5cm) se usa para aislamientos en tuberías que conducen líquidos a temperaturas altas, así mismo para tuberías de vapor y agua-caliente o fría.

* PLACAS VERMITEC-46.- Se encuentran constituidas por vermiculita y cemento. Estos materiales se presentan al consumidor en las siguientes dimensiones de 0.50x0.25 m. en los siguientes espesores.

1	pulgada	2.54 cm.
1 1/2	pulgada	3.81 cm.
2	pulgada	5.80 cm.

Se usa para aislamiento de hornos y resiste una temperatura de 1600°F (871°C), su conductividad es de 0.47 Btu/(h)-(pie²)(°F/pulg.) a 300°F [0.058 Kcal/(h)(m²)(°C/m) a 149°C], y 0.85 Btu/(h)(pie²)(°F/pulg.) entre los 1600°F y los 300°F [0.105 Kcal/(h)(m²)(°C/m) a 875°C] y su peso específico es de 564 Kg/cm³.

* LADRILLOS VERMITEC-46.- Se presenta en dimensiones de 9" x- 4 1/2" x 2 1/2" (23 x 11.5 x 6.3 cm.) y se emplea para aislamientos en muros, calderas y hornos. Su coeficiente de transmisión (conductividad) varía entre los 0.47 y 0.85 Btu/(h)(pie²)(°F/pulg.) entre los 1600°F y los 300°F [0.058 a 0.105 Kcal/(h)(m²)(°C/m) entre los 148.9 a los 871°C].

- * BLOCK VERMITEC-46 .- Las dimensiones de este material son - de 10 x 20 x 40 cm. con un peso aproximado de 2 a 2.5 kg. y - se emplea en las construcciones por su ligereza y su poder -- acústico, en muros divisorios, así mismo se emplea para cámaras frigoríficas.

El poder aislante de un block equivale aproximadamente - al poder aislante de una placa de corcho de 3" (7.62 cm) con la ventaja que sobre el block se puede aplanar inmediatamente, sin necesidad de usar metal desplegado.

- * VIRUMIN PLASTICO TERMICO.- Este material se emplea para aislamiento de superficies no uniformes y su preparación es sumamente sencilla, con solamente agregar una pequeña porción - de agua para formar una masilla de consistencia adecuada -- para su aplicación.
- * VIRUMIN PLASTICO ACUSTICO.- Este material es empleado como - acústico, en muros y plafones, con un alto coeficiente de -- absorción acústica de 0.85 en 15 mm. de espesor a una fre -- cuencia de 1000 Hertz y 0.40 a una frecuencia de 200 Hertz, - pudiéndose aplicar con flama como si fuera yeso. Este material se presenta en sacos de 25 ó 50 Kg.
- * VERMITEC PLASTICO.- Este material se presenta granulado en - sacos de 25 ó 30 Kg, y se emplea en aplanados acústicos y -- térmicos de habitaciones, salas de espectáculos o locales -- ruidosos, es de 0.48 a 512 Hertz.

De igual forma se emplea para acabados; no expuestos a - la intemperie en aislamientos de tuberías y tanques.

- * CEMENTO TERMOAISLANTE PRIMEX - PLASTOLITE.- Está constituido por lana mineral molida, vermiculita, asbesto y aglutinantes inorgánicos.

Se emplea para aislamiento de superficies de bajas y -- altas temperaturas con superficies bastante adherentes y de buena consistencia a la compresión, en su aplicación no aparecen cuarteaduras aún aplicándose en superficies calientes; se puede usar para acabados duros y a la intemperie.

5.4 DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL MATERIAL QUE -- CONSTITUYE EL AISLAMIENTO.

Una tubería de vapor puede perder calor a la atmósfera por -- radiación, convección y conducción. La pérdida de calor por radiación es una función de la cuarta potencia de las temperaturas absolutas del cuerpo y los alrededores. Por ello será pequeña la pérdida de calor a bajas temperaturas pero aumentará rápidamente al crecer éstas. El aire es un mal conductor del calor y por ello las pérdidas de calor por conducción serán pequeñas; sin embargo, como las corrientes de convección se originan con facilidad, la -- pérdida de calor total desde una superficie no aislada es considerable y, por tanto, deberá aplicarse, por razones económicas, -- alguna forma de aislamiento. Un material aislante debe poseer -- las dos cualidades siguientes: baja conductividad térmica e impedir la formación de corrientes de convección.

En el presente trabajo la transmisión de calor será a través de un tubo cilíndrico, calentándose por medio de una resistencia, que a su vez calentará el material aislante que lo recubre. De -- esta manera, el área de flujo de calor es inversamente proporcional al radio por lo que el gradiente de temperatura será inversamente proporcional al mismo.

El flujo de calor a través de una superficie de radio r viene dado por la ecuación de Fourier, Ec. 1.2;

$$q = kA(-dt/dx) \quad (5.1)$$

y considerando el flujo de calor a través de una sección de recubrimiento de longitud unitaria a lo largo del eje del tubo, situado a un radio r del centro del tubo, la ecuación anterior se --- transforma en:

$$q = k 2\pi r l (-dT/dr) \quad (5.2)$$

donde l representa la longitud del tubo considerada.

Integrando entre los límites r_1 y r_2 , tenemos

$$q \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = - 2\pi l k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$q = \frac{2\pi k l (T_1 - T_2)}{\ln r_2/r_1}$$

$$k = \frac{q}{2\pi l (T_1 - T_2)} \ln r_2/r_1 \quad (5.3)$$

donde:

k = Conductividad térmica, en Kcal/(h)(m²)(°C/m)

q = Calor transferido a través del recubrimiento, en Kcal/hr

T_1 y T_2 = Temperaturas en el punto interior y exterior del recubrimiento, en °C.

l = Longitud del recubrimiento, en m.

r_1 y r_2 = Radios interior y exterior del recubrimiento, en m.

La Ec. 5.3, es la ecuación que utilizaremos para calcular la

conductividad térmica de los materiales aislantes que vamos a comparar en nuestro estudio. Sin embargo, para ello se precisa conocer el flujo de calor, q . Lo cual se determinará a partir de los datos obtenidos de las lecturas de voltaje y amperaje suministrados al equipo por la fuente de poder, durante la operación del sistema. Así, la potencia suministrada se calculará a partir de la siguiente ecuación (18)

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5.4)$$

donde:

P = Potencia en Watts.

V = Voltaje en Volts.

R = Resistencia en ohmios.

De la ley de ohm (18) tenemos que

$$R = \frac{V}{I} \quad (5.5)$$

Sustituyendo 5.5 en 5.4

$$P = \frac{V^2}{V/I} = V I \text{ (Watt)} \quad (5.6)$$

De la Ec. 5.6 obtenemos la potencia en Watt y las conversiones adecuadas tendremos el flujo de calor, q , en kcal/hr.

En pruebas preliminares se observó que se requirió de 20 min. para que el tubo al aire libre alcanzara un estado estable, es decir, que simule unas condiciones de operación normal. Así que, una vez colocado el aislamiento térmico se deja operando el equipo durante 20 minutos, a partir de entonces se considera un tiem-

po cero y se comienza a tomar lectura de las temperaturas, así - como de los medidores de tablero, a intervalos de 5 minutos hasta que se alcance un estado estable, aproximadamente 80 minutos - después.

Para realizar los cálculos se procedió de la siguiente forma

EJEMPLO: Calcular la conductividad térmica de un material - aislante que cumple con las siguientes condiciones:

$$V = \text{Voltaje de la corriente suministrada} = 3.5 \text{ V}$$

$$I = \text{Amperaje de la corriente suministrada} = 2.42 \text{ A}$$

$$l = \text{Longitud del aislamiento} = 0.20 \text{ m}$$

$$r_1 = \text{Radio interior del aislante} = 0.0127 \text{ m}$$

$$r_2 = \text{Radio exterior del aislante} = 0.0381 \text{ m}$$

$$T_1 = \text{Temperatura exterior del aislante} = 24^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \text{Temperatura media del aislante} = 31^\circ\text{C}$$

$$T_3 = \text{Temperatura interior del aislante} = 85^\circ\text{C}$$

SOLUCION:

Primero se procede a calcular el flujo de calor a partir de la potencia suministrada, de la Ec. 5.6

$$P = V I$$

$$P = (3.5\text{V})(2.42\text{A})$$

$$P = 8.47 \text{ Watts}$$

Realizando la conversión,

$$8.47 \text{ Watt} \times \frac{0.2389 \text{ cal/s}}{1 \text{ Watt}} \times \frac{1 \text{ Kcal}}{1000 \text{ cal}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}$$

De lo cual se tiene que

$$Q = 7.2845 \text{ Kcal/hr}$$

Sustituyendo en la ecuación 5.2

$$k = \frac{Q}{2 \pi L (T_3 - T_1)} \ln r_2/r_1$$
$$k = \frac{7.2845 \text{ Kcal}}{2(3.14216)(0.20\text{m})(85 - 24)^\circ\text{C}} \ln(0.0381/0.0127)$$
$$k = \frac{(7.2845)(1.0986)}{2(3.1416)(0.20)(61)}$$
$$k = 0.1044 \text{ Kcal/(h)(m}^2\text{)(}^\circ\text{C/m)}$$

De esta forma se realizaron los cálculos de la conductividad térmica a partir de los resultados obtenidos en las pruebas. A continuación se muestra en las siguientes tablas los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

Cabe aclarar que para los cálculos de la conductividad térmica de los diferentes aislantes, se mantienen constantes algunos datos, tales como: el radio interno del aislante ($r_1 = 0.0127 \text{ m}$); el radio externo del aislante ($r_2 = 0.0381 \text{ m}$); y la longitud del aislante (0.20 m).

TABLA 5.3 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN LA PRIMERA PRUEBA A 3.5 V y 2.43 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	29.0	35.0	88.0	59.0	53.0
5	32.0	38.5	97.0	65.0	58.5
10	34.0	42.0	104.0	70.0	62.0
15	36.0	45.0	108.0	72.0	63.0
20	37.0	47.0	113.0	76.0	66.0
25	39.0	49.0	116.0	77.0	67.0
30	39.5	50.5	119.0	79.5	68.5
35	40.5	52.0	121.0	80.5	69.0
40	41.0	53.0	123.0	82.0	70.0
45	42.0	54.0	124.0	82.0	70.0
50	42.0	55.0	125.0	83.0	70.0
55	42.5	56.0	126.0	83.5	70.0
60	43.0	56.5	127.0	84.0	70.5
65	43.0	57.0	127.0	84.0	70.0
70	43.5	57.0	128.0	84.5	71.0
75	43.5	57.0	128.0	84.5	71.0
80	43.5	57.5	128.0	84.5	70.5

TABLA 5.4 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN LA --
SEGUNDA PRUEBA A 5.5 V Y 3.43 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	32.0	34.0	137.0	105.0	103.0
5	37.0	46.0	152.0	115.0	106.0
10	41.0	51.0	163.0	122.0	112.0
15	43.0	54.5	171.0	128.0	116.5
20	44.0	56.5	177.0	133.0	120.5
25	45.0	58.0	184.0	139.0	126.0
30	46.0	60.0	186.0	140.0	126.0
35	48.5	61.0	187.0	138.5	126.0
40	51.0	62.5	189.0	138.0	126.5
45	52.5	63.5	191.0	138.5	127.5
50	53.0	64.0	192.0	139.0	128.0
55	53.5	65.0	195.0	141.5	130.0
60	54.0	66.0	199.0	145.0	133.0
65	55.0	68.0	203.0	148.0	135.0
70	56.0	69.0	205.0	149.0	136.0
75	56.5	71.0	208.0	151.5	137.0
80	57.0	72.0	210.0	153.0	138.0
85	57.5	73.5	212.0	154.5	138.5
90	58.0	74.5	213.0	155.0	138.5
95	58.0	75.5	214.0	156.0	138.5
100	58.5	77.0	215.0	156.5	138.0

TABLA 5.5 TEMPERATURAS REGISTRADAS DE LA VERMICULITA EN LA --
TERCERA PRUEBA A 7.33 V Y 4.5 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	44.0	59.0	210.0	166.0	151.0
5	51.0	69.0	249.0	198.0	180.0
10	57.0	78.0	264.0	207.0	186.0
15	61.0	85.0	275.0	214.0	190.0
20	65.0	92.0	285.0	220.0	193.0
25	69.0	97.0	291.0	222.0	194.0
30	71.0	102.0	296.0	225.0	194.0
35	73.0	105.0	300.0	227.0	195.0
40	74.0	109.0	304.0	230.0	195.0
45	76.0	111.0	308.0	232.0	197.0
50	77.0	113.0	311.0	234.0	198.0
55	78.0	115.0	314.0	236.0	199.0
60	79.0	117.0	316.0	237.0	199.0
65	80.0	119.0	318.0	238.0	199.0
70	81.0	120.0	320.0	239.0	200.0
75	81.0	121.0	321.0	240.0	200.0
80	81.5	122.0	322.0	240.5	200.0

TABLA 5.6 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA PRIMERA --
PRUEBA A 3.5 V Y 2.42 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	24.0	31.0	85.0	61.0	54.0
5	26.0	35.0	94.0	68.0	59.0
10	27.0	37.0	100.0	73.0	63.0
15	29.0	40.0	106.0	77.0	66.0
20	30.0	42.0	110.0	80.0	68.0
25	31.0	44.0	113.0	82.0	69.0
30	32.0	45.0	116.0	84.0	71.0
35	34.0	46.0	118.0	84.0	72.0
40	34.0	47.0	120.0	86.0	73.0
45	35.0	48.0	122.0	87.0	74.0
50	35.0	49.0	124.0	89.0	75.0
55	35.0	50.0	125.0	90.0	75.0
60	35.5	50.0	126.0	90.5	76.0
65	36.0	50.0	127.0	91.0	77.0
70	36.0	50.5	128.0	92.0	77.5
75	36.0	51.0	129.0	93.0	78.0
80	36.0	51.0	129.0	93.0	78.0

TABLA 5.7 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA SEGUNDA --
PRUEBA A 5.4 V Y 3.5 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	35.0	39.0	150.0	115.0	111.0
5	40.0	46.0	165.0	125.0	119.0
10	44.0	52.0	176.0	132.0	124.0
15	50.0	57.0	185.0	135.0	128.0
20	52.0	61.0	192.0	140.0	131.0
25	55.0	64.0	198.0	143.0	134.0
30	57.0	66.0	203.0	146.0	137.0
35	57.0	67.0	206.0	149.0	139.0
40	58.0	68.0	209.0	151.0	141.0
45	59.0	70.0	214.0	155.0	144.0
50	59.5	70.5	216.0	156.5	145.5
55	60.0	71.0	218.0	158.0	147.0
60	60.0	72.0	220.0	160.0	148.0
65	61.0	72.5	222.0	161.0	149.5
70	61.5	73.0	223.0	161.5	150.0
75	62.0	74.0	224.0	162.0	150.0
80	62.0	74.0	224.0	162.0	150.0

TABLA 5.8 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL PAMSIL EN LA TERCERA --
PRUEBA A 7.5 V Y 4.6 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	37.0	56.0	230.0	193.0	174.0
5	40.0	68.0	253.0	213.0	185.0
10	42.0	76.0	268.0	226.0	192.0
15	43.0	83.0	280.0	237.0	197.0
20	44.0	88.0	290.0	246.0	202.0
25	50.0	93.0	298.0	248.0	205.0
30	61.0	95.0	305.0	244.0	210.0
35	74.0	99.0	310.0	236.0	211.0
40	81.0	100.0	314.0	233.0	214.0
45	85.0	102.0	318.0	233.0	216.0
50	85.5	103.0	320.0	234.5	217.0
55	86.0	104.0	322.0	236.0	218.0
60	87.0	105.0	324.0	237.0	219.0
65	87.0	106.0	324.0	237.0	218.0
70	87.0	106.0	324.0	237.0	218.0
75	87.5	107.0	325.0	237.5	218.0
80	87.5	107.0	325.0	237.5	218.0

TABLA 5.9 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL VITROFORM EN LA PRIMERA-
PRUEBA A 2.5 V Y 1.8 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	26.0	37.0	90.0	64.0	53.0
5	28.0	42.0	102.0	74.0	60.0
10	30.0	44.0	112.0	82.0	68.0
15	31.0	45.0	118.0	87.0	73.0
20	33.0	46.0	123.0	90.0	77.0
25	35.0	47.0	128.0	93.0	81.0
30	36.0	48.0	131.0	95.0	83.0
35	37.0	49.0	134.0	97.0	85.0
40	37.0	50.0	140.0	103.0	90.0
45	38.0	51.0	142.0	104.0	91.0
50	38.5	52.0	143.0	104.5	91.0
55	38.5	52.5	143.0	104.5	90.5
60	39.0	53.0	144.0	105.0	91.0
65	39.5	53.5	145.0	105.5	91.5
70	39.5	53.5	145.0	105.5	91.5
75	40.0	54.0	146.0	106.0	92.0
80	40.0	54.0	146.0	106.0	92.0

TABLA 5.10 TEMPERATURAS REGISTRADAS DEL VITROFORM EN LA SEGUNDA-
PRUEBA A 3.5 V Y 2.38 A.

θ, min	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1 = T_3 - T_1$	$\Delta T_2 = T_3 - T_2$
0	29.0	47.0	142.0	113.0	95.0
5	32.0	53.0	159.0	127.0	106.0
10	33.0	59.0	171.0	138.0	112.0
15	34.0	63.0	181.0	147.0	118.0
20	36.0	66.5	189.0	153.0	122.5
25	37.0	69.0	195.0	158.0	126.0
30	38.0	71.0	199.0	161.0	128.0
35	39.0	73.0	203.0	164.0	130.0
40	39.0	74.0	206.0	167.0	132.0
45	39.0	75.0	208.0	169.0	133.0
50	39.5	76.0	210.0	170.5	134.0
55	39.5	77.0	211.0	171.5	134.0
60	40.0	77.0	212.0	172.0	135.0
65	40.5	78.0	214.0	173.5	136.0
70	40.5	78.5	215.0	174.5	136.5
75	41.0	79.0	216.0	175.0	137.0
80	41.0	79.0	216.0	175.0	137.0

TABLA 5.11 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERNICULITA EN LA PRIMERA PRUEBA

min	volt	amper	Kcal/h	°C	°C	°C	Kcal/(h)(m ²)(°C/m)
θ	V	A	Q	T ₁	T ₃	ΔT	K
0	3.5	2.45	7.3748	29.0	88.0	59.0	0.1093
5	3.5	2.45	7.3748	32.0	97.0	65.0	0.0992
10	3.5	2.45	7.3748	34.0	104.0	70.0	0.0921
15	3.5	2.45	7.3748	36.0	108.0	72.0	0.0895
20	3.5	2.45	7.3748	37.0	113.0	76.0	0.0848
25	3.5	2.45	7.3748	39.0	116.0	77.0	0.0837
30	3.5	2.45	7.3748	39.5	119.0	79.5	0.0811
35	3.5	2.45	7.3748	40.5	121.0	80.5	0.0801
40	3.5	2.45	7.3748	41.0	123.0	82.0	0.0786
45	3.5	2.45	7.3748	42.0	124.0	82.0	0.0786
50	3.5	2.45	7.3748	42.0	125.0	83.0	0.0777
55	3.5	2.45	7.3748	42.5	126.0	83.5	0.0772
60	3.5	2.39	7.1942	43.0	127.0	84.0	0.0748
65	3.5	2.39	7.1942	43.0	127.0	84.0	0.0748
70	3.5	2.39	7.1942	43.5	128.0	84.5	0.0763
75	3.5	2.39	7.1942	43.5	128.0	84.5	0.0744
80	3.5	2.39	7.1942	43.5	128.0	84.5	0.0744

TABLA 5.12 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERMICULITA EN LA SEGUNDA PRUEBA

min θ	volt V	amper I	Kcal/h Q	°C T ₁	°C T ₃	°C ΔT	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
0	5.40	3.45	16.0225	32.0	137.0	105.0	0.1334
5	5.40	3.45	16.0225	37.0	152.0	115.0	0.1218
10	5.33	3.42	15.6773	41.0	163.0	122.0	0.1123
15	5.33	3.42	15.6773	43.0	171.0	128.0	0.1071
20	5.33	3.42	15.6773	44.0	177.0	133.0	0.1030
25	5.33	3.42	15.6773	45.0	184.0	139.0	0.0986
30	5.33	3.42	15.6773	46.0	186.0	140.0	0.0979
35	5.20	3.38	15.1161	48.5	187.0	138.5	0.0954
40	5.20	3.38	15.1161	51.0	189.0	138.0	0.0957
45	5.20	3.38	15.1161	52.5	191.0	138.5	0.0954
50	5.20	3.38	15.1161	53.0	192.0	139.0	0.0951
55	5.33	3.42	15.6773	53.5	195.0	141.5	0.0968
60	5.33	3.42	15.6773	54.0	199.0	145.0	0.0945
65	5.33	3.42	15.6773	55.0	203.0	148.0	0.0926
70	5.33	3.42	15.6773	56.0	205.0	149.0	0.0919
75	5.33	3.42	15.6773	56.5	208.0	151.5	0.0905
80	5.33	3.42	15.6773	57.0	210.0	153.0	0.0895

TABLA 5.13 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA VERNICULITA EN LA TERCERA PRUEBA

min	volt	amper	Kcal/h	°C	°C	°C	Kcal/(h)(m ²)(°C/m)
θ	V	I	Q	T ₁	T ₃	ΔT	K
0	6.60	4.50	25.5432	44.0	210.0	166.0	0.1345
5	6.60	4.50	25.5432	51.0	249.0	198.0	0.1128
10	6.60	4.40	24.9755	57.0	264.0	207.0	0.1055
15	6.60	4.40	24.9755	61.0	275.0	214.0	0.1020
20	6.60	4.40	24.9755	65.0	285.0	220.0	0.0992
25	6.60	4.40	24.9755	69.0	291.0	222.0	0.0983
30	6.60	4.40	24.9755	71.0	296.0	225.0	0.0970
35	6.60	4.40	24.9755	73.0	300.0	227.0	0.0962
40	6.60	4.40	24.9755	74.0	304.0	230.0	0.0949
45	6.55	4.40	24.7863	76.0	308.0	232.0	0.0934
50	6.55	4.40	24.7863	77.0	311.0	234.0	0.0926
55	6.55	4.40	24.7863	78.0	314.0	236.0	0.0918
60	6.50	4.40	24.5971	79.0	316.0	237.0	0.0907
65	6.50	4.39	24.5412	80.0	318.0	238.0	0.0901
70	6.50	4.39	24.5412	81.0	320.0	239.0	0.0898
75	6.50	4.39	24.5412	81.0	321.0	240.0	0.0894
80	6.50	4.39	24.5412	81.5	322.0	240.5	0.0892

TABLA 5.14 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL PAMSIL EN LA PRIMERA PRUEBA

min θ	volt V	amper I	Kcal/h Q	°C T_1	°C T_3	°C ΔT	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
0	3.50	2.42	7.2845	24.0	85.0	61.0	0.1044
5	3.50	2.42	7.2845	26.0	94.0	68.0	0.0936
10	3.50	2.42	7.2845	27.0	100.0	73.0	0.0872
15	3.50	2.42	7.2845	29.0	106.0	77.0	0.0827
20	3.50	2.42	7.2845	30.0	110.0	80.0	0.0796
25	3.50	2.42	7.2845	31.0	113.0	82.0	0.0777
30	3.50	2.42	7.2845	32.0	116.0	84.0	0.0758
35	3.50	2.42	7.2845	34.0	118.0	84.0	0.0758
40	3.50	2.42	7.2845	34.0	120.0	86.0	0.0740
45	3.50	2.42	7.2845	35.0	122.0	87.0	0.0732
50	3.50	2.42	7.2845	35.0	124.0	89.0	0.0716
55	3.50	2.42	7.2845	35.0	125.0	90.0	0.0708
60	3.50	2.42	7.2845	35.5	126.0	90.5	0.0704
65	3.50	2.42	7.2845	36.0	127.0	91.0	0.0699
70	3.50	2.42	7.2845	36.0	128.0	92.0	0.0692
75	3.50	2.42	7.2845	36.0	129.0	93.0	0.0685
80	3.50	2.42	7.2845	36.0	129.0	93.0	0.0685

TABLA 5.15 CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL PAMSL EN LA SEGUNDA PRUEBA

min θ	volt V	amper I	Kcal/h Q	$^{\circ}\text{C}$ T_1	$^{\circ}\text{C}$ T_3	$^{\circ}\text{C}$ ΔT	Kcal/(h)(m ²)($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) K
0	5.33	3.45	15.8148	35.0	150.0	115.0	0.1202
5	5.20	3.45	15.4291	40.0	161.0	125.0	0.1079
10	5.20	3.45	15.4291	44.0	176.0	132.0	0.1022
15	5.20	3.45	15.4291	50.0	185.0	135.0	0.0999
20	5.20	3.45	15.4291	52.0	192.0	140.0	0.0963
25	5.20	3.45	15.4291	55.0	198.0	143.0	0.0943
30	5.20	3.45	15.4291	57.0	203.0	146.0	0.0924
35	5.20	3.45	15.4291	57.0	206.0	149.0	0.0905
40	5.33	3.55	16.2732	58.0	209.0	151.0	0.0942
45	5.33	3.55	16.2732	59.0	214.0	155.0	0.0918
50	5.33	3.55	16.2732	59.5	216.0	156.5	0.0909
55	5.33	3.55	16.2732	60.0	218.0	158.0	0.0900
60	5.33	3.55	16.2732	60.0	220.0	160.0	0.0889
65	5.33	3.55	16.2732	61.0	222.0	161.0	0.0884
70	5.33	3.55	16.2732	61.5	223.0	161.5	0.0881
75	5.33	3.55	16.2732	62.0	224.0	162.0	0.0878
80	5.33	3.55	16.2732	62.0	224.0	162.0	0.0878

TABLA 5.16 CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL PAMSIL EN LA TERCERA PRUEBA

min θ	volt V	amper I	Kcal/h Q	°C T ₁	°C T ₃	°C ΔT	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
0	7.20	4.58	28.3607	37.0	230.0	193.0	0.1285
5	7.00	4.58	27.5729	40.0	253.0	213.0	0.1132
10	7.00	4.58	27.5729	42.0	268.0	226.0	0.1066
15	7.00	4.58	27.5729	43.0	280.0	237.0	0.1017
20	7.00	4.58	27.5729	44.0	290.0	246.0	0.0980
25	7.00	4.58	27.5729	50.0	298.0	248.0	0.0972
30	6.95	4.57	27.3162	61.0	305.0	244.0	0.0979
35	6.95	4.57	27.3162	74.0	310.0	236.0	0.1012
40	6.95	4.57	27.3162	81.0	314.0	233.0	0.1025
45	6.95	4.57	27.3162	85.0	318.0	233.0	0.1025
50	6.95	4.57	27.3162	85.5	320.0	234.5	0.1018
55	6.95	4.57	27.3162	86.0	322.0	236.0	0.1012
60	6.70	4.50	25.9302	87.0	324.0	237.0	0.0956
65	6.70	4.50	25.9302	87.0	324.0	237.0	0.0956
70	6.70	4.50	25.9302	87.0	324.0	237.0	0.0956
75	6.70	4.50	25.9302	87.5	325.0	237.5	0.0954
80	6.70	4.50	25.9302	87.5	325.0	237.7	0.0954

TABLA 5.17 CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL VITROFORM EN LA PRIMERA PRUEBA

min θ	volt V	amper I	Kcal/h Q	°C T_1	°C T_3	°C ΔT	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
0	2.30	1.50	2.9671	26.0	90.0	64.0	0.0405
5	2.30	1.50	2.9671	28.0	102.0	74.0	0.0350
10	2.30	1.50	2.9671	30.0	112.0	82.0	0.0316
15	2.30	1.50	2.9671	31.0	118.0	87.0	0.0298
20	2.30	1.50	2.9671	33.0	123.0	90.0	0.0288
25	2.30	1.50	2.9671	35.0	128.0	93.0	0.0279
30	2.30	1.50	2.9671	36.0	131.0	95.0	0.0273
35	2.30	1.50	2.9671	37.0	134.0	97.0	0.0267
40	2.30	1.50	2.9671	37.0	140.0	103.0	0.0252
45	2.30	1.50	2.9671	38.0	142.0	104.0	0.0249
50	2.30	1.50	2.9671	38.5	143.0	104.5	0.0248
55	2.30	1.50	2.9671	38.5	143.0	104.5	0.0248
60	2.30	1.50	2.9671	39.0	144.0	105.0	0.0247
65	2.30	1.50	2.9671	39.5	145.0	105.5	0.0246
70	2.30	1.50	2.9671	39.5	145.0	105.5	0.0246
75	2.30	1.50	2.9671	40.0	146.0	106.0	0.0245
80	2.30	1.50	2.9671	40.0	146.0	106.0	0.0245

TABLA 5.18 CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL VITROFORM EN LA SEGUNDA PRUEBA

min	volt	amper	Kcal/h	°C	°C	°C	Kcal/(h)(m ²)(°C/m)
θ	V	I	Q	T ₁	T ₃	ΔT	K
0	3.50	2.38	7.1641	29.0	142.0	113.0	0.0554
5	3.50	2.38	7.1641	32.0	159.0	127.0	0.0493
10	3.50	2.38	7.1641	33.0	171.0	138.0	0.0454
15	3.50	2.38	7.1641	34.0	181.0	147.0	0.0426
20	3.50	2.38	7.1641	36.0	189.0	153.0	0.0409
25	3.50	2.38	7.1641	37.0	195.0	158.0	0.0393
30	3.50	2.38	7.1641	38.0	199.0	161.0	0.0389
35	3.50	2.38	7.1641	39.0	203.0	164.0	0.0382
40	3.50	2.38	7.1641	39.0	206.0	167.0	0.0375
45	3.50	2.38	7.1641	39.0	208.0	169.0	0.0371
50	3.50	2.38	7.1641	39.5	210.0	170.5	0.0367
55	3.50	2.38	7.1641	39.5	211.0	171.5	0.0365
60	3.50	2.38	7.1641	40.0	212.0	172.0	0.0364
65	3.50	2.38	7.1641	40.5	214.0	173.5	0.0361
70	3.50	2.38	7.1641	40.5	215.0	174.5	0.0359
75	3.50	2.38	7.1641	41.0	216.0	175.0	0.0358
80	3.50	2.38	7.1641	41.0	216.0	175.0	0.0358

TABLA 5.19 TABULACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

VERMICULITA

Kcal/h Q	°C T ₁	°C T ₂	°C T ₃	°C ΔT ₁	°C ΔT ₂	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
7.1942	43.5	57.5	128.0	84.5	70.5	0.0744
15.6773	57.0	72.0	210.0	153.0	138.0	0.0895
24.5412	81.5	122.0	322.0	240.5	200.0	0.0892

PAMSIL

Kcal/h Q	°C T ₁	°C T ₂	°C T ₃	°C ΔT ₁	°C ΔT ₂	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
7.2845	36.0	51.0	129.0	93.0	78.0	0.0685
16.2732	62.0	74.0	224.0	162.0	150.0	0.0878
26.2759	87.5	107.0	325.0	237.5	218.0	0.0954

VITROFORM

Kcal/h Q	°C T ₁	°C T ₂	°C T ₃	°C ΔT ₁	°C ΔT ₂	Kcal/(h)(m ²)(°C/m) K
2.9671	40.0	54.0	146.0	106.0	92.0	0.0245
7.1641	41.0	79.0	216.0	175.0	137.0	0.0358

C A P I T U L O V I

" A N A L I S I S E C O N O M I C O
 D E L A S
P R U E B A S R E A L I Z A D A S "

6.1 CONDUCCION DE CALOR A TRAVES DE TUBERIAS

En la industria química y otros lugares, es común el manejo y transporte de fluidos a temperaturas altas, razón por la cual, el estudio de pérdidas de calor a través de tuberías, es primordial, ya que ello repercutirá grandemente en la economía de la industria.

En el paso de calor a través de una pared plana, el área a través de la cual el calor fluye, es constante en toda la trayectoria del flujo de calor (11). Consideremos un tubo de unidad de longitud, que se muestra en la Fig. 6.1. El tubo conduce un fluido a temperatura t_1 , mayor que la temperatura ambiente t_a . De

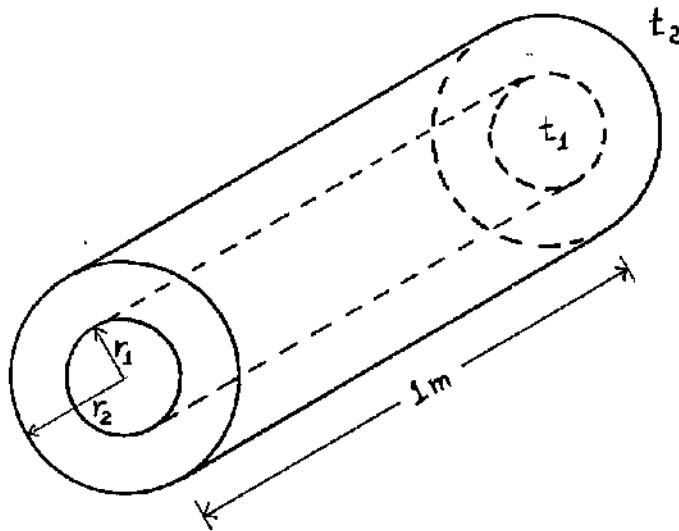


Fig. 6.1 Flujo de calor a través de la pared de un tubo. (12)

manera que, el flujo de calor será de t_1 a t_a . El área de la trayectoria del flujo de calor a través de la pared del tubo ---

aumenta con la distancia de la trayectoria desde r_1 a r_2 . El área a cualquier radio r es dada por $2\pi rL$, y si el calor fluye hacia afuera del cilindro el gradiente de temperatura para el incremento de longitud dr es (dt/dr) . La Ec. 1.15 se transforma en

$$dQ = k dA (-dt/dr) \text{ Kcal/h} \quad (6.1)$$

Integrando

$$t = - \frac{Q}{2 \pi k L} \ln r \quad (6.2)$$

Donde

$$r = r_i = D_i/2$$

$$t = t_i$$

i = superficie interna

o = superficie externa

y cuando

$$r = r_o = D_o/2$$

$$t = t_o$$

entonces

$$Q = \frac{2 \pi k L (t_i - t_o)}{2.3 \log (D_o/D_i)} \quad (6.3)$$

donde

Q = Flujo de calor en Kcal/h

k = Conductividad térmica en Kcal/(h)(m²)(°C/m)

t_i y t_o = Temperaturas interior y exterior en °C

D_i y D_o = Diámetros interior y exterior en m

Si $D_i > 0.75 D_o$, entonces se puede utilizar el promedio de los dos, y la Ec. 6.3 queda

$$Q = \frac{t}{R} = \frac{t}{La/KaAm} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{(D_2 - D_1)/2}{Ka (D_1 + D_2)/2}} \quad (6.4)$$

Donde $(D_2 - D_1)/2$ es el grueso del tubo. Dentro de las limitaciones establecidas para la razón D_2/D_1 . La Ec. 6.4 difiere de la Ec. 6.3 por cerca del 1%.

6.2 PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE UNA TUBERIA

En una tubería que conduce un fluido caliente en su interior la temperatura de la pared exterior no solo depende del flujo de calor a través de la pared, sino que también, de la habilidad de la atmósfera más fría que lo rodea para remover el calor que llega a la superficie externa (19). Considere un tubo como el que se muestra en la Fig. 6.2, cubierto con un aislante de lana mineral que lleva vapor a la temperatura t_s considerablemente arriba de la temperatura atmosférica, t_a . La diferencia total de tempera-

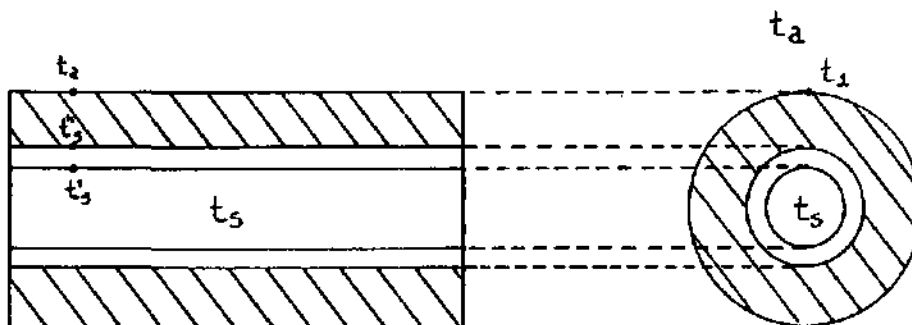


Fig. 6.2 Pérdida de calor de un tubo aislado. (9)

tura que origina el flujo de calor hacia afuera del tubo es $t_s - t_a$. Las resistencias al flujo de calor tomadas en orden son:

- 1.- La resistencia del vapor al condensarse y dar su calor a la superficie interna del tubo, resistencia que experimentalmente se ha encontrado muy pequeña, de manera que t_s y t'_s son casi las mismas.
- 2.- La resistencia del tubo metálico, que es muy pequeña, excepto para tuberías gruesas, de manera que, t'_s y t''_s son casi las mismas.
- 3.- La resistencia del aislante de lana mineral.
- 4.- La resistencia del aire que lo rodea para eliminar el calor de la superficie externa.

Esta última es apreciable, aún cuando la remoción de calor se efectúa por convección natural del aire ambiente en adición a la radiación; y tiene como origen la diferencia de temperatura entre la superficie exterior y el aire frío. La convección natural resulta del entibiamiento del aire adyacente a la tubería, por lo tanto, reduce su densidad. El aire tibio sube y continuamente se reemplaza por aire frío (9).

El calor perdido hacia el exterior a través de un tubo al aire libre o aislado es afectado no solamente por condiciones de convección alrededor del tubo, sino también por radiación del tubo caliente hacia los alrededores fríos del tubo. Para hacer uso de las ecuaciones ordinarias de convección en tuberías y cuando las pérdidas por radiación son apreciables se hace uso de factores de película determinados experimentalmente y que incluyen ambos efectos de convección y radiación designados por $f_c + f_r$. Para esta condición, los factores dependen de las condiciones de con-

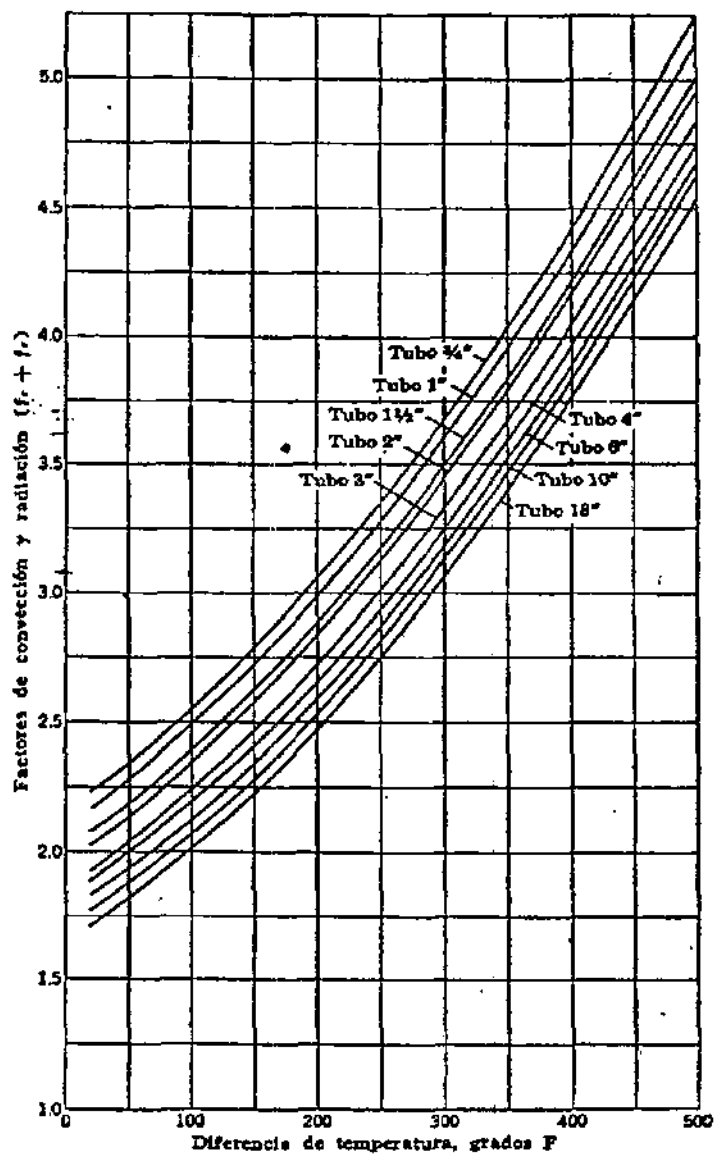


FIG 6.3 Valores de ($f_c + f_r$) para cálculo de pérdida de calor en tuberías de hierro sin aislamiento. (11)

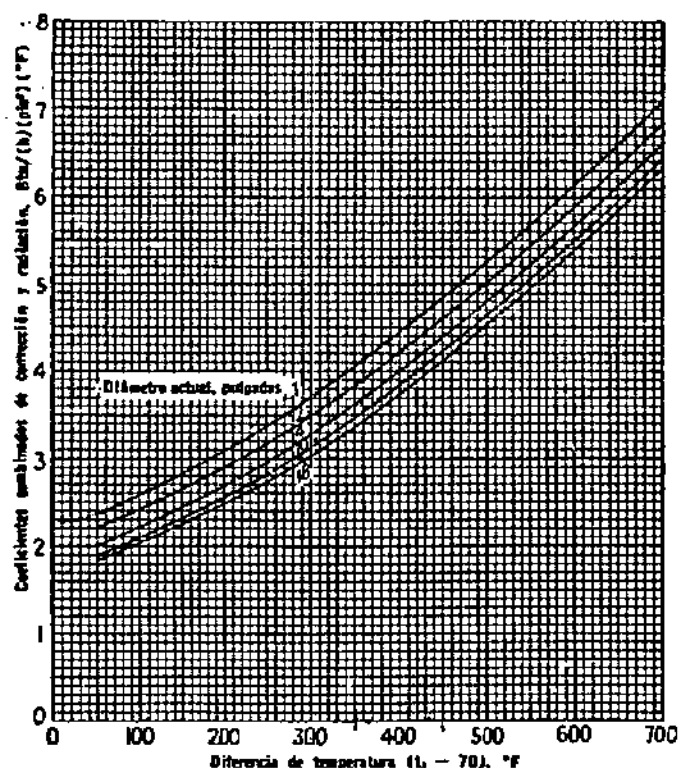


FIG. 6.4 Transferencia de calor por convección y radiación de tubos horizontales a temperatura t_1 a aire a 70°F (9)

vección, diferencia de temperaturas y también del tamaño del tubo. Algunos de estos valores basados en trabajos experimentales de Hellman (11)(9) se encuentran en las figs. 6.3 y 6.4.

Las cuatro resistencias ya discutidas en forma de ecuación, son:

Condensación del vapor:

$$q = h_s \pi D'_s (t_s - t'_s) \quad (6.5)$$

Pared del tubo:

$$q = \frac{2 \pi k_b}{2.3 \log (D''_s / D'_s)} (t'_s - t''_s) \quad (6.6)$$

Aislante:

$$q = \frac{2 \pi k_c}{2.3 \log (D_1 / D_s'')} (t_s'' - t_1) \quad (6.7)$$

Radiación y convección al aire:

$$q = h_a \pi D_1 (t_1 - t_a) \quad (6.8)$$

Combinando:

$$t_s - t_a = q \left(\frac{1}{h_s \pi D_s'} + \frac{2.3}{2 \pi k_b} \log \frac{D_s''}{D_s'} + \frac{2.3}{2 \pi k_c} \log \frac{D_1}{D_s''} \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{h_a \pi D_1} \right)$$

El término adentro del paréntesis son la cuatro resistencias, y de éstas, las primeras dos usualmente se desprecian. La ecuación se reduce a:

$$q = \frac{\pi (t_s - t_a)}{\frac{2.3}{2 k_c} \log \frac{D_1}{D_s''} + \frac{1}{h_a D_1}} \quad (6.9)$$

En donde:

K_c = Conductividad térmica del aislante, Kcal/(h)(m²)(°C/m)

h_a = Coeficiente superficial de transferencia, Fig. 6.4.

D_1 = Diámetro exterior del tubo, m.

D_s'' = Diámetro actual ($D_1 + 2$ espesores del aislante), m.

t_s = Temperatura interior, °C.

t_a = Temperatura ambiente, °C.

A medida que el diámetro del aislante aumenta, el área superficial de la cual se remueve el calor, también aumenta y en consecuencia la cantidad de calor perdida también aumenta, perdiendo - de esta manera eficiencia el aislante.

La resistencia del aislante, según la Fig. 6.5, es:

$$R_{\text{aislante}} = \frac{1}{2 \pi k_a} \ln \frac{r}{r_1} \quad (6.10)$$

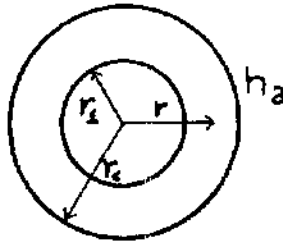


Fig. 6.5 El radio crítico. (12)

Y la resistencia del aire por metro lineal de tubería, está dada por:

$$R_{\text{aire}} = \frac{1}{h_a 2 \pi r} \quad (6.11)$$

La resistencia total será:

$$R_{total} = \frac{1}{2\pi k_a} \ln \frac{r}{r_1} + \frac{1}{h_a 2\pi r} \quad (6.12)$$

Cuando la resistencia es un mínimo, las pérdidas de calor es un máximo y en consecuencia:

$$\frac{dR_{total}}{dr} = 0 \quad (6.13)$$

Por consiguiente, al derivar la Ec. 6.12, e igualar a cero se tiene:

$$\frac{dR_t}{dr} = \frac{1}{2\pi k_a r} - \frac{1}{h_a 2\pi r^2} = 0$$

de donde:

$$\frac{1}{2\pi k_a r} = \frac{1}{h_a 2\pi r^2}$$

Despejando r

$$r = r_c = \frac{k_a}{h_a} \quad (6.14)$$

La Ec. 6.14, nos muestra que la máxima pérdida de calor por una tubería aislada tiene lugar cuando el radio crítico iguala a la razón de la conductividad térmica del aislante y el coeficiente superficial de transferencia de calor. Por esto, al aplicar un aislante se procurará usar un material de baja conductividad térmica, de manera que el radio crítico sea menor que el radio del tubo.

$$r_c < r_1$$

El grueso óptimo de un aislante se puede determinar por consideraciones puramente económicas (5)(7). Si un tubo descubierto fuera a conducir un fluido caliente, se perderá una cierta cantidad de calor por hora y metro lineal de tubería, cuyo costo será:

$$\text{COSTO DE PERDIDA DE CALOR} = [q \text{ (kcal/(h)(m}^2\text{)(}^\circ\text{C/m))}] [\text{\$ } 0.02486 \text{Kcal}]$$

Donde \$0.02486 Kcal, es el costo de producir una kilocaloría de vapor en la planta (Valor en noviembre de 1988 del Grupo --- I.D.E.S.A.).

Supongamos que colocamos un aislante térmico que recubre las tuberías que conducen fluido frío o caliente en una planta. Tendremos menos pérdidas de calor, por consiguiente, el costo de pérdidas de calor (C.P.C.) disminuirá, pero tendremos ahora un costo adicional. A menor pérdida de calor, mayor grueso del aislante y mayor costo inicial, y mayores cargos fijos anuales (mantenimiento y depreciación), los que deben añadirse a la pérdida anual de calor. Los cargos fijos en el aislante de la tubería serán cerca del 15 al 20% del costo inicial del aislante instalado.

Un análisis completo del costo del aislamiento más económico requiere que por lo menos sean asignadas 20 variables; las cuales se pueden agrupar en cuatro grupos principales:

FACTORES DE AISLAMIENTO

- 1.- Costo del aislamiento instalado, del espesor e , por pie lineal $C_I(e)$.
- 2.- Conductividad térmica del aislamiento, K_I .
- 3.- Resistencia nominal de la tubería, R_s .

- 4.- Diámetro nominal de la tubería, d_1 .
- 5.- Temperatura ambiente, t_a .
- 6.- Velocidad del aire ambiente.
- 7.- Temperatura de la tubería, t_s .
- 8.- Periodo de amortización del aislamiento, n .
- 9.- Factor de complejidad de la tubería.
- 10.- Costos de mantenimiento y depreciación.

Por simplicidad nosotros asumiremos un factor de complejidad de tubería unitario, ignorar los costos de mantenimiento y depreciación, y asumiremos una velocidad del viento de cero.

FACTORES DE COMBUSTIBLE

- 11.- Tipo de combustible y costo, C_F .
- 12.- Alza de precio anual esperado del combustible expresado como un decimal, f .

FACTORES DE PRODUCCION DE CALOR

- 13.- Eficiencia de la conversión de combustible a calor, E .
- 14.- Número de horas de operación por año, N .
- 15.- Capital invertido en la producción de calor de la planta.
- 16.- Periodo de amortización de la producción de calor de la --- planta.

Por simplicidad ignoraremos algunos aspectos económicos de la producción de calor y consideraremos que \$ 0.02486/Kcal es el costo de producir una kilocaloría de calor en la planta. La existencia del aislamiento puede reducir la magnitud de la producción

de calor que la planta requiere, y esto representa un incremento positivo de flujo de efectivo.

FACTORES ECONOMICOS

- 17.- Costo de la inversión del aislamiento requerido, i.
- 18.- Tasa de impuesto.
- 19.- Costo para financiar la producción de calor de la planta.
- 20.- Modelo económico utilizado para determinar el espesor económico del aislamiento (7).

De aquí que, para un grosor determinado de aislante, tendremos los siguientes costos:

- a).- COSTO DE PERDIDAS DE CALOR = $\left(\frac{\$ 0.02486}{\text{Kcal}} \right) \left(q \frac{\text{Kcal}}{(h)(m')(^{\circ}\text{C}/m)} \right)$
- b).- COSTOS FIJOS = COSTO INICIAL + COSTO DE INSTALACION
- c).- COSTO TOTAL = C.P.C. + COSTOS FIJOS

La metodología que seguiremos para calcular el costo total en pérdidas de calor a través de tuberías con aislante es la siguiente:

- 1.- Se da el grosor del aislante, asimismo se calcula el diámetro actual (diámetro exterior del tubo más dos veces el espesor del aislante).
- 2.- Se calcula Δt de acuerdo a los datos obtenidos de las pruebas realizadas, y con el diámetro actual se obtiene el coeficiente superficial de transferencia de calor (h_a), de la Fig. 6.4. Así también, como la conductividad térmica del aislante.

- 3.- Con h_a y los datos necesarios, se calcula el flujo de calor q , mediante la Ec. 6.9.
- 4.- Calculando q , se calcula el C.P.C.
- 5.- Con el costo inicial del aislante utilizado y con su costo de instalación se calcula el costo fijo.
- 6.- Se calculan los costos totales con la suma del costo de pérdida de calor más los costos fijos.
- 7.- Se tabulan los datos obtenidos.

Primero calcularemos las pérdidas de calor a través de la tubería al aire ambiente. Los cálculos se hicieron en base a las condiciones existentes, es decir, considerando vapor saturado de 21 kg/cm² (300 lb/plg²) a 214°C (417.33°F), fluyendo a través de una tubería de hierro fundido de 3/4" nominal cedula 40, y una temperatura ambiente de 21°C (70°F).

Diámetro exterior del tubo = 1.05 plg = 2.667 cm = 0.02667 m

Superficie exterior = 0.275 pie²/pie = 0.08382 m²/m

Temperatura interior, t_s = 214°C = 417.33°F

Temperatura exterior, t_1 = 21°C = 70°F

Diferencia de temperatura, $t_s - t_1$ = 347.33°F

(fr + fc), de la Fig. 6.3 = 4.10 Btu/(h)(pie²)(°F/pie)

$$4.10 \frac{\text{Btu}}{(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F/pie})} \times \frac{1.49 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m}^2)(^\circ\text{C/m})}{\text{Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F/pie})}$$

Por lo tanto:

$$(\text{fr} + \text{fc}) = 6.1090 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m}^2)(^\circ\text{C/m})$$

Sustituyendo en la Ec. 6.15

$$q = (f_r + f_c)(A)(t_s - t_1) \quad (6.15)$$

$$q = [6.109 \text{ Kcal}/(h)(m^2)(^{\circ}\text{C}/m)][0.08382 \text{ m}^2/m][214 - 21 ^{\circ}\text{C}]$$

$$q = 98.8269 \text{ Kcal}/(h)(m \text{ lineal})$$

El costo de pérdida de calor es:

$$\text{C.P.C.} = [98.827 \text{ Kcal}/(h)(m)][\$ 0.02486/\text{Kcal}]$$

$$\text{C.P.C.} = \$ 2.4568 / (h)(m)$$

A continuación calcularemos el costo por pérdida de calor de los materiales aislantes utilizados.

MATERIAL: VERMICULITA

- 1.- Espesor del aislante = 1" = 2.54 cm = 0.0254 m
Diámetro externo del tubo = 1.05 plg = 0.02667 m
Diámetro actual = 0.02667 + (2 x 0.0254) = 0.07747 m
- 2.- Temperatura interior, $t_s = 210^{\circ}\text{C} = 410^{\circ}\text{F}$
Temperatura exterior, $t_1 = 57^{\circ}\text{C} = 135^{\circ}\text{F}$
Temperatura ambiente, $t_a = 21^{\circ}\text{C} = 70^{\circ}\text{F}$
Conductividad térmica = 0.0895 kcal/(h)(m²)(°C/m)
Diferencia de temperatura, $t_1 - t_a = 135 - 70 = 65^{\circ}\text{F}$
A 65°F, de la Fig. 6.4, h_a es igual a:
 $h_a = 2.5 \text{ Btu}/(h)(\text{pie}^2)(^{\circ}\text{F}/\text{pie}) = 3.725 \text{ Kcal}/(h)(m^2)(^{\circ}\text{C}/m)$
- 3.- Sustituyendo en la Ec. 6.9

$$q = \frac{\pi (t_s - t_a)}{\frac{2.3}{2k_c} \log \frac{D_1}{D_s''} + \frac{1}{h_a D_1}}$$

$$q = \frac{3.1416 (210 - 21)}{\frac{2.3}{2(0.0895)} \log \frac{0.07747}{0.02667} + \frac{1}{(3.7256)(0.07747)}}$$

$$q = \frac{593.7610}{5.9551 + 3.4653}$$

$$q = 63.029 \text{ Kcal}/(h)(m \text{ lineal})$$

4.- El costo por pérdida de calor es:

$$C.P.C. = [63.029 \text{ Kcal}/(h)(m)][\$ 0.02486/\text{Kcal}]$$

$$C.P.C. = \$ 1.5669 / (h)(m \text{ lineal})$$

5.- Considerando un metro lineal de caña de VERMICULITA de 3/4" de diámetro interior y 1" de espesor, con un costo de --- \$ 11,517.00/m lineal. El metro lineal de aislante se colocará en una hora, sin considerar acabado final.

El costo de instalación será:

Sueldo mínimo diario = \$ 7,225.00 (Enero del '89)

Costo de instalación = \$ 903.00/(h)(m lineal)

COSTOS FIJOS = COSTO DEL AISLANTE + COSTO DE INSTALACION

COSTOS FIJOS = \$ 11,517/(h)(m) + \$ 903.125/(h)(m)

$$C.F. = \$ 12,420.125 / (h)(m \text{ lineal})$$

6.- COSTO TOTAL = C.P.C. + COSTOS FIJOS

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 1.567 / (h)(m) + \$ 12,420.125 / (h)(m)$$

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 12,421.692 / (h)(m)$$

MATERIAL : PAMSIL

1.- Espesor del aislante = 1" = 2.54 cm = 0.0254 m

Diámetro externo del tubo, $D_s'' = 1.05 \text{ plg} = 0.02667 \text{ m}$

Diámetro actual, $D_1 = 0.02667 + (2 \times 0.0254) = 0.07747 \text{ m}$

2.- Temperatura interior, $t_s = 224^\circ\text{C} = 435^\circ\text{F}$

Temperatura exterior, $t_1 = 62^\circ\text{C} = 144^\circ\text{F}$

Temperatura ambiente, $t_a = 21^\circ\text{C} = 70^\circ\text{F}$

Diferencia de temperatura, $t_1 - t_a = 74^\circ\text{F}$

Conductividad térmica = 0.0878 Kcal/(h)(m²)(°C/m)

A 74°F, de la Fig.6.4, h_a es igual a:

$$h_a = 2.55 \text{ Btu}/(h)(\text{pie}^2)(^\circ\text{F}/\text{pie}) = 3.7995 \text{ Kcal}/(h)(\text{m}^2)(^\circ\text{C}/\text{m})$$

3.- Sustituyendo en la Ec. 6.9

$$q = \frac{\pi (t_s - t_a)}{\frac{2.3}{2k_c} \log \frac{D_1}{D_s''} + \frac{1}{h_a D_1}}$$

$$q = \frac{3.1416 (224 - 21)}{\frac{2.3}{2(0.0878)} \log \frac{0.07747}{0.02667} + \frac{1}{(3.7995)(0.07747)}}$$

$$q = \frac{637.7433}{6.0658 + 3.3973}$$

$$q = 67.3926 \text{ Kcal/(h)(m lineal)}$$

4.- El costo por pérdida de calor es:

$$\text{C.P.C.} = [67.3926 \text{ Kcal/(h)(m)}][\$ 0.02486/\text{Kcal}]$$

$$\text{C.P.C.} = \$ 1.6754/(\text{h})(\text{m lineal})$$

5.- Considerando un metro lineal de caña de PAMSIL de 3/4" de --
diámetro interior y 1" de espesor, con un costo de \$ 10,461--
por metro lineal, el cuál se instalará en una hora, sin con-
siderar acabado final.

El costo de instalación será:

$$\text{Sueldo mínimo diario} = \$ 7,225.00 \text{ (Enero del '89)}$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 903.125/(\text{h})(\text{m lineal})$$

$$\text{COSTOS FIJOS} = \text{COSTO DEL AISLANTE} + \text{COSTO DE INSTALACIÓN}$$

$$\text{COSTOS FIJOS} = \$ 10,461.00/(\text{h})(\text{m}) + \$ 903.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$\text{C.F.} = \$ 11,364.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$6.- \text{COSTO TOTAL} = \text{C.P.C.} + \text{COSTOS FIJOS}$$

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 1.6754/(\text{h})(\text{m}) + \$ 11,364.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 11,365.80 / (\text{h})(\text{m})$$

MATERIAL : VITROFORM

1.- Espesor del aislante = 1" = 2.54 cm = 0.0254 m

Diámetro externo del tubo, $D_s'' = 1.05 \text{ plg.} = 0.02667 \text{ m}$

Diámetro actual, $D_1 = 0.02667 + (2 \times 0.0254) = 0.07747 \text{ m}$

2.- Temperatura interior, $t_s = 216^\circ\text{C} = 421^\circ\text{F}$

Temperatura exterior, $t_1 = 41^\circ\text{C} = 106^\circ\text{F}$

Temperatura ambiente, $t_a = 21^\circ\text{C} = 70^\circ\text{F}$

Diferencia de temperatura, $t_1 - t_a = 36^\circ\text{F}$

Conductividad térmica, $k_c = 0.0358 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m}^2)(^\circ\text{C}/\text{m})$

A 36°F , de la Fig. 6.4 h_a es igual a:

$h_a = 2.40 \text{ Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F}/\text{pie}) = 3.576 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m}^2)(^\circ\text{C}/\text{m})$

3.- Sustituyendo en la Ec. 6.9

$$q = \frac{\pi (t_s - t_a)}{\frac{2.3}{2k_c} \log \frac{D_1}{D_s''} + \frac{1}{h_a D_1}}$$

$$q = \frac{3.14216 (216 - 21)}{\frac{2.3}{2(0.0358)} \log \frac{0.07747}{0.02667} + \frac{1}{(3.5760)(0.07747)}}$$

$$q = \frac{612.6106}{14.8765 + 3.6096}$$

$$q = 33.1389 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m lineal})$$

4.- El costo por pérdida de calor es:

$$\text{C.P.C.} = [33.1389 \text{ Kcal}/(\text{h})(\text{m})] [\$ 0.02486/\text{Kcal}]$$

$$\text{C.P.C.} = \$ 0.8238/(\text{h})(\text{m lineal})$$

5.- Considerando un metro lineal de caña de VITROFORM de 3/4" de diámetro interior y 1" de espesor, con un costo de \$ 8,910.0 por metro lineal, el cuál se instalará en una hora, sin considerar acabado final.

El costo de instalación será:

$$\text{Sueldo mínimo diario} = \$ 7,225.00 \text{ (Enero del '89)}$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 903.125/(\text{h})(\text{m lineal})$$

$$\text{COSTOS FIJOS} = \text{COSTO DEL AISLANTE} + \text{COSTO DE INSTALACION}$$

$$\text{COSTOS FIJOS} = \$ 8,910.00/(\text{h})(\text{m}) + \$ 903.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$\text{C.F.} = \$ 9,813.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$6.- \text{COSTO TOTAL} = \text{C.P.C.} + \text{COSTOS FIJOS}$$

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 0.8238/(\text{h})(\text{m}) + \$ 9,813.125/(\text{h})(\text{m})$$

$$\text{COSTO TOTAL} = \$ 9,813.9488/(\text{h})(\text{m})$$

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados de este análisis-económico, además en la Tabla 6.2 se da a conocer el costo total - del equipo construido.

TABLA 6.1 ANALISIS ECONOMICO COMO RESULTADO DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

MATERIAL AISLANTE	CONDUCTIVIDAD TERMICA (k) kcal/(h)(m ²)(°C/m)	C.P.C. \$ / (h)(m)	COSTOS FIJOS		COSTO TOTAL
			MATERIAL	INSTALACION	
			\$ / (h)(m)		
TUBO	-----	2.4568	-----	-----	-----
VITROFORM	0.0358	0.8238	8,910.00	903.00	9,813.95
PANSIL	0.0878	1.6754	10,461.00	903.00	11,365.81
VERMICULITA	0.0895	1.5669	11,517.00	903.00	12,421.69

TABLA 6.2

COSTO DEL EQUIPO

MATERIAL	COSTO
1.- ALAMBRE DE NICHROMME No. 26 (1m)	\$ 10,000.00
2.- AMPERIMETRO FIMESA MOD. 118, 0 - 5A/A.C.	\$ 15,500.00
3.- BUJE DE HULE	\$ 100.00
4.- CABLE TW #18	\$ 2,400.00
5.- CABLE DE LINEA	\$ 1,200.00
6.- CHASIS DE METAL	\$ 22,000.00
7.- FUSIBLE DE 1A/125V	\$ 336.00
8.- FUSIBLE DE 5A/125V	\$ 550.00
9.- FOCO PILOTO	\$ 500.00
10.- INTERRUPTOR 1 POLO, 2 TIROS	\$ 6,000.00
11.- INTERRUPTOR 2 POLOS, 2 TIROS	\$ 4,000.00
12.- INTERRUPTOR 1 POLO, 1 TIRO	\$ 1,600.00
13.- PORTAFUSIBLE	\$ 820.00
14.- PORTAFUSIBLE DE TAPON	\$ 1,665.00
15.- SOPORTE DE MADERA	\$ 3,000.00
16.- TABLILLA PARA CONEXIONES	\$ 4,105.00
17.- TAPONES DE CORCHO	\$ 500.00
18.- TERMOMETRO DE -10 A 110°C	\$ 15,700.00
19.- TERMOMETRO DE -20 A 150°C	\$ 15,700.00
20.- TERMOMETRO DE -20 a 400°C	\$ 20,640.00
21.- TERMINALES 42566-0	\$ 900.00
22.- TOMACORRIENTE PARA CHASIS	\$ 1,800.00
23.- TORNILLOS	\$ 800.00

TABLA 6.2

COSTO DEL EQUIPO (CONTINUACION)

MATERIAL	COSTO
24.- TRANSFORMADOR 6V-C.T./3A	\$ 45,000.00
25.- TRANSFORMADOR 9V-C.T./5A	\$ 13,300.00
26.- TOPES DE HULE	\$ 400.00
27.- TUBO DE VIDRIO PYREX	\$ 14,000.00
28.- VOLTIMETRO FIMESA MOD. 118, 0 - 5V/A.C	\$ 14,600.00
29.- ZAPATAS TERMINALES	\$ 1,400.00
TOTAL	\$ 218,516.00

C O N C L U S I O N E S

CONCLUSIONES

En base a las experiencias y observaciones realizadas durante las pruebas, se concluye con un análisis objetivo de los resultados obtenidos, los cuales se muestran en las tablas 5.19 y 6.1.

A partir de estos datos, se puede observar que el material aislante que presenta más baja conductividad térmica, es el VITROFORM. Sin embargo, no obstante de tener el más bajo costo total, debe restringirse su operación a temperaturas inferiores a los 200°C, ya que arriba de ésta sufre deterioro.

Para tuberías que operan hasta temperaturas de 260°C, el PAMSIL, es el material aislante más adecuado, por sus características encontradas. Para temperaturas mayores, la VERMICULITA, presenta conductividades térmicas más bajas.

De esta forma, en base a los estudios aquí realizados, aunado con el conocimiento de las condiciones de trabajo, medio ambiente, costos de acabado final, así como disponibilidad en el mercado, se podrá realizar una selección óptima del aislante térmico más adecuado para un proceso dado.

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

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

- 1.- "American Standard for Testing Materials", part five (1961) C-592, pág. 321.
- 2.- Badger y Banchemo, " Introducción a la Ingeniería Química " 1ª edición, Mc Graw Hill Book Company, España (1966), págs. 129, 139, 154.
- 3.- Baumeister and Marks, " Standard Handbook for Mechanical -- Engineers ", seventh edition, Mc Graw Hill; october (1968), 4-90, 6-203.
- 4.- Botero C. y Montaña R., " Refrigeración y aire acondiciona-- do ", edit. Prentice Hall International, Colombia (1981), - pág. 21.
- 5.- Chemical Engineering, " How to select insulation thickness-- for hot pipes ", a Mc Graw Hill publication, Vol. 82 No. 15 July 21 (1975), pág. 88-96.
- 6.- Chemical Engineering, " Thermal insulation ", Vol. 84 No. - 27, December 19 (1972), Mc Graw Hill publication, pág. 62 - 76.
- 7.- Chemical Engineering, " Insulation without economics ", a-- Mc Graw Hill publication, Vol. 89 No. 9, May 3 (1982), pág. 70 - 79.
- 8.- Croft T. Carr C. & Watt J., " American Electricianst Hand-- book ", ninth edition, Mc Graw Hill (1970), pág. 10.
- 9.- Donald Q. Kern, " Procesos de transferencia de calor ", 18ª edición, Mc Graw Hill Book Company, Nueva York (1984), pág. 13, 19, 89, 98, 106.

- 10.- Holman J.P., " Transferencia de calor ", edit. C.E.C.S.A., (1987), pág. 17 - 22.
- 11.- Jenning & Lewis, " Aire acondicionado y refrigeración ", - 2ª edición, edit. C.E.C.S.A. (1984), pág. 117 - 174.
- 12.- Karlekal B.V. & Desmond R.M., " Introducción a la transferencia de calor ", 2ª edición, edit. Interamericana (1986) , págs. 7 - 11.
- 13.- Kirk R.E. & Othmer D.F., " Enciclopedia de la Tecnología - Química ", Nueva York (1963), edit. Intercience.
- 14.- Mc Cabe & Smith, " Operaciones básicas de Ingeniería Química ", Mc Graw Hill Book Company, edit. Reverté (1981), - págs. 291, 418.
- 15.- Mc Adams, " Heat Transmission ", Mc Graw Hill Book Company . Nueva York (1954), pág. 219.
- 16.- Perry. R.H. y Chilton C.H., " Manual del Ingeniero Químico " 2ª edición, México (1982), 10 - 10.
- 17.- Petróleos Mexicanos, " Normas para proyecto de obras de -- aislamiento térmico para alta temperatura ", Norma 2.616.0 2ª edición (1974).
- 18.- Resnick & Holliday, " Física, parte II ", 6ª edición, edit. C.E.C.S.A., México (1983).
- 19.- Rohsenow & Hartnett, " Handbook of Heat Transfer ", Mc -- Graw Hill (1973), 3 - 2.

- 20.- Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos,~
Febrero de 1975, pág. 16-22.