



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

192
Zejun

FACULTAD DE INGENIERIA

FALLA DE ORIGEN

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA PARA AISLANTES"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:
ALFREDO VELASCO RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS
ING. JOSE ADRIAN VALERA NEGRETE

MEXICO, D.F.

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi esposa Sara:

***Por el profundo apoyo y amor que me brindó
e hicieron posible el alcanzar uno de los mas
importantes objetivos de mi vida.***

A mis hijos Néstor y Vadim:

Por su comprensión.

Este proyecto fue desarrollado en el Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, bajo la dirección del Ing. José Adrian Valera Negrete, a quien agradezco su apoyo y el constante asesoramiento para el logro de esta tesis.

I N D I C E

	PAGINA
TEMA I. TRANSFERENCIA DE CALOR	1
I.1 CONDUCCION	1
I.2 CONVECCION	11
I.3 RADIACION	13
TEMA II. AISLAMIENTOS TERMICOS	16
II.1 INTRODUCCION	16
II.1.1 IMPORTANCIA DEL AISLAMIENTO TERMICO EN LA INDUSTRIA	16
II.1.2 SELECCION DE UN MATERIAL AISLANTE	17
II.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS AISLANTES	18
II.2.1 INFLUENCIA DE LA POROSIDAD	18
II.2.2 INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA	19
II.2.3 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD	19
II.2.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA	19
II.2.5 INFLUENCIA DE LA PRESION	20
II.3 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES	20
II.3.1 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES EN BASE A SU ORIGEN	20

II.3.2	CLASIFICACION DE AISLANTES EN BASE A SU ESTRUCTURA	20
II.3.3	CLASIFICACION DE LOS AISLANTES EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE UTILIZACION	22
II.4	NORMALIZACION	23
TEMA III.	TERMOPARES	32
III.1	INTRODUCCION	32
III.2	FUNCIONAMIENTO DE LOS TERMOPARES	32
III.3	TIPOS DE TERMOPARES	34
III.3.1	TERMOPARES MAS USADOS EN LA PRACTICA	34
III.3.2	SELECCION DE LOS TERMOPARES	36
III.3.3	RECOMENDACIONES PARA LA INSTALACION, SELECCION Y MANTENIMIENTO DE TERMOPARES	36
III.3.4	CABLES DE EXTENSION	37
TEMA IV.	DESARROLLO Y ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE MEDIDORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA	38
IV.1	INTRODUCCION	38
IV.2	"ANALISIS DE AISLAMIENTOS TERMICOS"	38
IV.3	"DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MUESTRAS DE ROCA"	41

IV.3.1	CONDUCTIVIMETRO TERMoeLECTRICO	41
IV.3.2	SISTEMA DE CONTROL Y REGISTRO DE TEMPERATURA	44
IV.3.3	SISTEMA DE PRESION	44
IV.3.4	PROCEDIMIENTO DE CALCULO	45
IV.4	"MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y RESISTENCIA DE CONTACTO, DEL PAPEL Y MATERIALES DE PELICULA DELGADA"	45
IV.4.1	METODO EXPERIMENTAL	45
IV.4.2	METODOLOGIA DE CALCULO	47
TEMA V.	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ALTERNATIVA SELECCIONADA	49
V.1	INTRODUCCION	49
V.2	OBJETIVO DEL PROYECTO	49
V.3	FASES EN EL DISEÑO DEL MEDIDOR	49
V.4	CRITERIOS BASICOS DEL DISEÑO	50
V.4.1	TIPO DE FLUJO DE CALOR	50
V.4.2	TIPO DE FUENTE DE ENERGIA	51
V.4.3	RANGO DE TEMPERATURA DE OPERACION	51
V.4.4	EQUIPO DE MEDICION DE TEMPERATURA	54
V.5	CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL AISLANTE BAJO PRUEBA	54
V.6	COMPONENTES DEL EQUIPO DE MEDICION	55

TEMA VI. CALIBRACION DEL MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA	67
VI.1 MEDICION DE LA TEMPERATURA	67
VI.2 CALIBRACION DEL EQUIPO	68
VI.2.1 ALTERNATIVAS PARA LA CALIBRACION DEL EQUIPO	70
VI.3 DETERMINACION DE LAS CURVAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS AISLANTES	73
TEMA VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFIA	80
ANEXO A.- ESPECIFICACIONES	82
ANEXO B.- CALCULOS	92
ANEXO C.- DATOS Y LECTURAS	107

I. TRANSFERENCIA DE CALOR

El conocer la transferencia de calor de un sistema implica obtener la distribución de temperatura, ya que siempre hay flujo de calor cuando exista un gradiente de temperatura. Una vez que se conoce la distribución de temperatura, se determine rápidamente por la ley correspondiente de acuerdo al tipo de flujo de calor que relaciona la diferencia de temperatura. Este flujo de calor es la cantidad de calor transferido.

La energía se transfiere, siempre que existe un gradiente de temperatura en un sistema o cuando se ponen en contacto dos sistemas a diferentes temperaturas. Así, el proceso por el cual tiene lugar el transporte de la energía, se conoce como transferencia de calor. En otras palabras, la transferencia de calor se puede definir como la transmisión de energía de una región a otra, resultado de la diferencia de temperatura existente entre ellas.

En el estudio de la transferencia de calor se suelen considerar tres formas distintas de transferencia: conducción, convección y radiación.

En realidad, la distribución de temperatura en un medio se controla por los efectos combinados de estas tres formas de transferencia de calor, por lo tanto no es realmente posible aislar por completo una forma de las otras dos, sin embargo para simplificar el análisis se puede considerar solamente la conducción por ejemplo, cuando es despreciable la transferencia de calor por convección y radiación.

La conducción y radiación dependen para su operación, solo de la existencia de una diferencia de temperatura, por lo que están clasificados como procesos de solo transferencia de calor.

Mientras que la convección, no cumple estrictamente con la definición de transferencia de calor, porque para su operación también depende del transporte mecánico de masa. Pero debido a que existe una transmisión de energía desde regiones de temperatura más alta a regiones de temperatura más baja, ha sido generalmente aceptada dentro del proceso de transferencia de calor.

A continuación se presenta una descripción de estas tres formas:

1.1 CONDUCCION

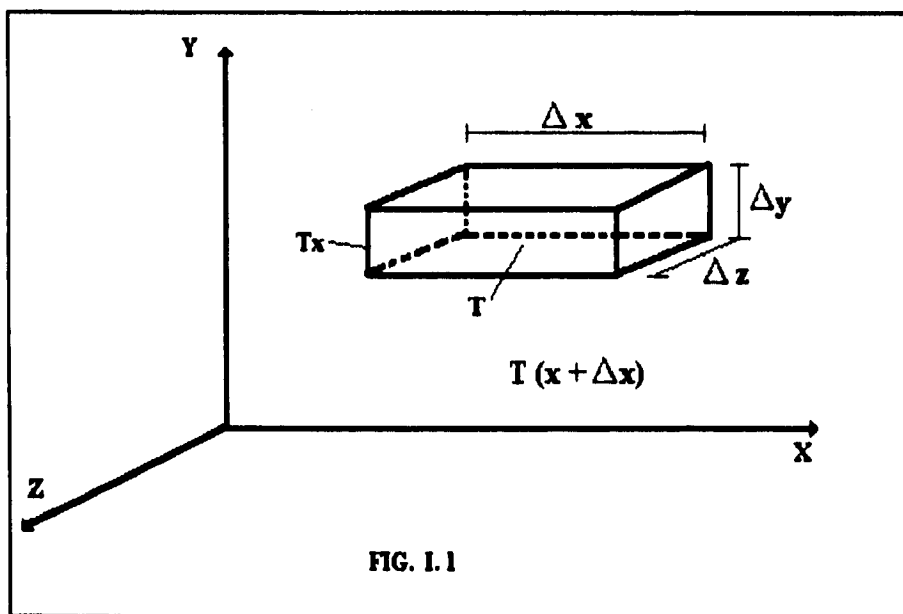
La conducción es la forma de transferencia de calor en el cual el intercambio de energía ocurre de la región de mayor a la de menor temperatura por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como en el caso de los metales. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

En los sólidos, predominantemente la propagación del calor por conducción corresponde a un intercambio de energía entre moléculas adyacentes cuando éstas se encuentran en vibración por efectos térmicos. En un sólido, que es un buen conductor eléctrico un número grande de electrones libres se mueve alrededor de una estructura atómica, por esta razón los materiales que son buenos conductores eléctricos son generalmente buenos conductores del calor (p. ej. el cobre, la plata, etc.). La conducción se realiza bajo la influencia de un "gradiente de temperatura" sin desplazamiento sensible de las partículas que forman el cuerpo conductor; en algunos sólidos transparentes, al mismo tiempo que se realiza la propagación de energía térmica por conducción también existe radiación de energía; en los líquidos y gases aunque existe propagación del calor por conducción y por radiación predomina la convección; no obstante lo anterior la conducción se desarrolla en dirección normal a la corriente del fluido.

La ley básica de la conducción del calor basada en observaciones experimentales proviene de Biot, pero en general se conoce con el nombre del físico matemático francés JOSEPH FOURIER quien la aplicó en su teoría analítica del calor:

$$q_x = kA \frac{\delta T}{\delta x}$$

Para la obtención de la ecuación de Fourier en tres dimensiones, se considera un sistema de ejes cartesianos en un cuerpo isotrópico y considerando un pequeño paralelepípedo rectangular de aristas Δx , Δy y Δz como se observa en la figura 1.1



Considérese que a través de este elemento está ocurriendo, una transferencia de calor por conducción, y que la temperatura en el centro del paralelepípedo la denotaremos como T .

Como la temperatura es diferente para cada punto del elemento seleccionado será necesario como un primer paso expresar el valor de dicha temperatura en cualquier cara del paralelepípedo. La temperatura en dichas caras será mayor o menor que el valor de T , dependiendo del sentido en que tenga lugar la transferencia de calor.

La magnitud en que la temperatura cambia para el caso de las caras $\Delta y \Delta z$ puede ser escrita como:

$$\frac{1}{2} \frac{\delta T}{\delta x} \Delta x$$

Ya que el gradiente de temperatura a lo largo del eje Ox es $\delta T / \delta x$ y la distancia que hay del centro del paralelepípedo a las caras $\Delta y \Delta z$ es evidentemente $\Delta x / 2$. De acuerdo a lo visto se puede decir que las temperaturas de las caras del lado izquierdo y del lado derecho son:

$$T_x = T - \frac{1}{2} \frac{\delta T}{\delta x} \Delta x$$

$$T_{(x+\Delta x)} = T + \frac{1}{2} \frac{\delta T}{\delta x} \Delta x$$

Usando la ecuación $q_x = kA \frac{\delta T}{\delta x}$ se puede decir que el flujo térmico a través de la cara del lado izquierdo es:

$$q_x = -k \Delta y \Delta z \frac{\delta}{\delta x} \left[T - \frac{1}{2} \frac{\delta T}{\delta x} \Delta x \right]$$

y a través de la cara del lado derecho:

$$q_{(x+\Delta x)} = -k \Delta y \Delta z \frac{\delta}{\delta x} \left[T + \frac{1}{2} \frac{\delta T}{\delta x} \Delta x \right]$$

La diferencia entre estas dos cantidades es evidentemente el aumento en energía del paralelepípedo debido únicamente a la componente en x del flujo de calor, o sea:

$$\text{Aumento de energía del paralelepípedo} = q_x \cdot q_{(x + \Delta x)} = \Delta E_x$$

$$\Delta E_x = -k\Delta y\Delta z \frac{\delta T}{\delta x} + \frac{1}{2} \Delta x\Delta y\Delta z k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k\Delta y\Delta z \frac{\delta T}{\delta x} + \frac{1}{2} \Delta x\Delta y\Delta z k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

$$\Delta E_x = k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \Delta x\Delta y\Delta z$$

Expresiones similares pueden ser deducidas para los otros dos pares de caras, teniéndose lo siguiente:

$$\Delta E_y = k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \Delta x\Delta y\Delta z$$

$$\Delta E_z = k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \Delta x\Delta y\Delta z$$

De tal forma que el aumento total de energía del elemento considerado será:

$$\begin{aligned} \Delta E_T &= k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \Delta x\Delta y\Delta z + k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \Delta x\Delta y\Delta z + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \Delta x\Delta y\Delta z \\ &= k \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \Delta x\Delta y\Delta z \end{aligned}$$

ec. 1.1

Este aumento de la energía se puede poner en función del calor específico, de la densidad y de la variación que experimenta la temperatura con el tiempo debido al incremento en la energía del paralelepípedo, o sea:

$$\Delta E = c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{ec. 1.2}$$

en donde:

c = calor específico

ρ = densidad

$\Delta x\Delta y\Delta z$ = volumen

Igualando las ecuaciones 1.1 y 1.2 anteriores, se tendrá:

$$c\rho \frac{\delta T}{\delta t} = k \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right]$$

como: $\alpha = k/c\rho$

por lo tanto:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right]$$

Que también se puede escribir:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \nabla^2 T$$

ec. 1.3

Esta es conocida como ECUACION DE FOURIER, la cual expresa las condiciones que gobiernan el flujo de calor en un cuerpo, y la solución de cualquier problema particular de conducción de calor debe satisfacer esta ecuación, ya sea en la forma como está establecida o en una forma modificada.

Para el caso en que la conductividad térmica varía de punto a punto del material, la ecuación de FOURIER queda de la siguiente manera:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{1}{c\rho} \left[\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) \right]$$

La solución de prácticamente todos los problemas de calor incluyen la determinación de la temperatura "T" como una función del tiempo y coordenadas espaciales. Tal valor de "T" es una función continua y finita de x,y,z y T y debe satisfacer no solamente la ecuación general de conducción o alguna de sus modificaciones, sino también ciertas ecuaciones de condiciones que son características de cada problema particular.

A continuación se analizarán algunos casos que se pueden presentar en la práctica con el objeto de encontrar la ecuación aplicable a cada uno de ellos, a partir de la ecuación general de CONDUCCION:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right)$$

1er. Caso:

Transferencia de calor en régimen permanente y tres dimensiones.

Régimen permanente. Indica que la temperatura o cualquier otra variable no sufre cambios con el tiempo, o sea:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = 0$$

De tal suerte que la ecuación de FOURIER quedará:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = 0$$

2do. Caso:

Transferencia de calor en régimen permanente y una dimensión.- Para este caso:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = 0$$

que también se puede escribir como derivado total:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

Esta es el caso más frecuente de suponer para facilitar el análisis de la transferencia de calor.

Una forma más conocida de la ecuación de Fourier es la siguiente:

$$\frac{dQ}{dt} = k A \frac{dT}{dx}$$

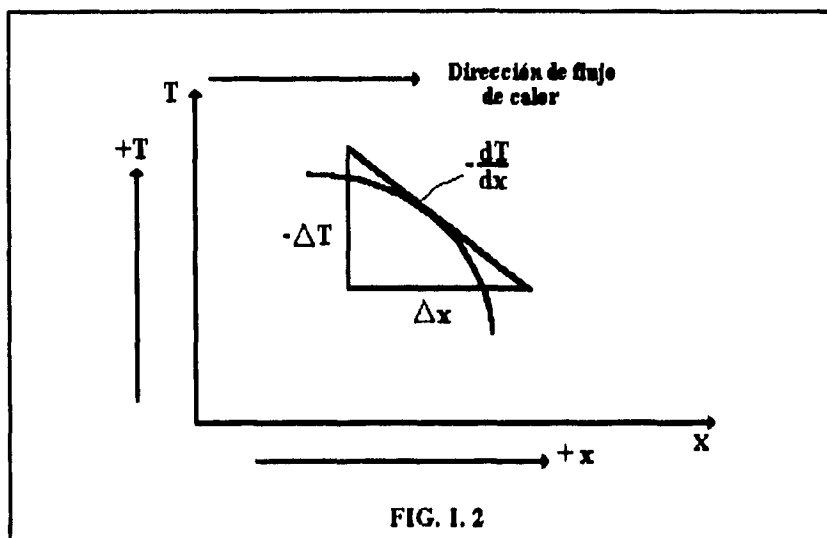
ec. 1.4

En la ecuación anterior el flujo de calor es inestable porque la temperatura varía con el tiempo. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable y con frecuencia pueden resolverse únicamente por métodos aproximados. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, se presentan durante el calentamiento de hornos, calderas y turbinas o en el tratamiento térmico y en la eliminación de esfuerzos de los metales fundidos.

A continuación se considerará la conducción del calor en estado estable, a través de sistemas simples en los que la temperatura y el flujo de calor son funciones de una sola coordenada.

Para escribir la ecuación de conducción del calor en forma matemática, se debe adaptar una convención de

signos. Se especifica que la dirección en que se incrementa la distancia "x" es la dirección del flujo de calor positivo. Entonces puesto que de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica el calor fluiría automáticamente desde los puntos de más alta temperatura a los puntos de más baja temperatura, el flujo de calor será positivo cuando el gradiente de temperatura sea negativo, como se muestra en la siguiente figura:



Consecuentemente, la ecuación elemental para conducción en una dimensión en estado estable será:

$$q = -k A \frac{dT}{dx}$$

ec. 1.5

En la ec. 1.4 se representa una cantidad de calor como dQ , el intervalo de tiempo se representa por dt , el cociente de ambos conceptos se le conoce como FLUJO TÉRMICO y se representa como:

$$Q = \frac{dQ}{dt}$$

La superficie de la sección transversal cruzada por el flujo térmico se representa con "A"; y a la relación entre el flujo térmico y la superficie de la sección transversal cruzada por el mismo se llama Densidad de Flujo Térmico:

$$q = \frac{dQ}{dA}$$

A la relación entre la diferencia de temperatura y la longitud "x" recorrida por el flujo térmico se llama Gradiente de Temperatura:

$$\nabla T = \frac{dT}{dx}$$

La conductividad térmica "k" es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de una área unitaria si el gradiente de temperatura es la unidad.

Siendo la conductividad térmica una variable importante en la transferencia de calor por conducción, a continuación se harán algunas observaciones sobre valores de dicha variable para sólidos, líquidos y gases.

Conductividad térmica de sólidos.- Un análisis de los valores de "k" muestra que éstos varían desde 0.0242 W/m°C para el aerogel de sílice, el conductor más pobre (el mejor aislante), hasta 392.336 W/m°C para el cobre puro y 425.58 W/m°C para la plata pura.

En general las conductividades térmicas de los metales puros son altas a bajas temperaturas y disminuyen a medida que la temperatura aumenta, mientras que con las aleaciones ocurre generalmente lo contrario. Los experimentos indican que cuando existen en los metales puros cantidades muy pequeñas de impurezas, éstos hacen disminuir grandemente la conductividad térmica, por ejemplo: Unas pequeñas trazas de arsénico en el cobre reducirán la conductividad térmica a la tercera parte de la del cobre puro; una comparación entre el cobre y el latón muestra que la adición del 10% de Zinc que tiene una conductividad térmica del orden de 112.5 W/m°C al cobre puro que tiene una conductividad térmica de 391.20 W/m°C da como resultado un latón que tiene una conductividad térmica del orden de 103.86 W/m°C. Se aprecia por lo tanto, que la conductividad de una aleación no es igual a la suma de las conductividades térmicas de sus componentes; hay pruebas experimentales definitivas en el sentido de que para los metales la conductividad térmica y el efecto de la temperatura sobre la misma son influidos grandemente por cambios en la estructura cristalina. Es de esperarse en consecuencia, que la conductividad térmica de cualquier metal o aleación dependerá del tipo de tratamiento térmico y del tipo de esfuerzo a que ha estado sometido, así como de la temperatura.

Hay otros factores que influyen sobre la conductividad térmica de los materiales, tales como la densidad y el contenido de humedad, la composición, la estructura cristalina y la temperatura.

Conductividad térmica de materiales aislantes.- Cualquier material que ofrece una alta resistencia a la transferencia de calor por conducción, radiación o convección, puede servir como aislante. Un buen material

aislante además de una alta resistencia a la transferencia de calor, debe tener otras características relacionadas con la aplicación que se le dé. Puede considerarse que los materiales aislantes consisten en pequeños espacios de aire rodeados de paredes sólidas; la baja conductividad térmica de estos materiales puede atribuirse a la baja conductividad térmica del aire encerrado en los intersticios y en la extensión superficial relativamente pequeña del material sólido a través del cual puede ser llevado el calor por conducción.

Conductividad térmica de los fluidos.- A temperaturas ordinarias el valor de "k" para líquidos no metálicos queda dentro del intervalo que va de 0.08 W/m°C hasta aproximadamente 0.69 W/m°C, mientras que para los gases el alcance de "k" es desde 0.0086 hasta 0.02 W/m°C.

Así pues, el más alto valor de "k" para los gases es menor que un tercio del valor mínimo de "k" para los líquidos, en la mayor parte de los casos la conductividad térmica de los líquidos disminuye con el aumento de temperatura, en cambio para el agua que es el mejor conductor entre los líquidos no metálicos, el valor de "k" aumenta hasta una temperatura de 115°C. Para temperaturas mayores la conductividad térmica del agua disminuye a medida que la temperatura aumenta.

Los metales líquidos así como algunas soluciones acuosas tienen conductividades térmicas superiores a la del agua, el mercurio líquido por ejemplo tiene una "k" de 8.39 W/m°C; algunos otros ejemplos son el aluminio con una "k" de 88.28 W/m°C y el plomo fundido cuya "k" es de 15.05 W/m°C.

La conductividad térmica de un gas aumentará con el incremento de la temperatura y es virtualmente independiente de la presión, siempre que ésta no se aleje demasiado de las condiciones atmosféricas.

Por medio de consideraciones puramente teóricas MAXWELL dedujo, aplicando la teoría cinética de los gases, una expresión para el cálculo de la conductividad térmica de un gas en función de la viscosidad y del calor específico, dicha ecuación es la siguiente:

$$k = a\mu C_v$$

donde:

C_v = calor específico a volumen constante

μ = viscosidad absoluta

a = constante, que tiene los siguientes valores teóricos:

2.45 para gases monoatómicos

1.90 para gases diatómicos

1.70 para gases triatómicos

1.2 CONVECCION

La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla, tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas.

La transferencia de energía por convección desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que la rodea o viceversa, se realiza en varias etapas, por ejemplo: primero el calor fluye por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes de fluido, la energía así transferida servirá para incrementar la temperatura y la energía interna de las partículas del fluido, entonces esas partículas se moverán hacia una región del fluido con temperatura más baja donde se mezclarán y transferirán una parte de su energía a otras partículas del fluido.

El flujo en este caso es de fluido y de energía, realmente la energía es almacenada en las partículas del fluido y transportada como resultado del movimiento de masa. Para su operación este mecanismo no depende únicamente de la diferencia de temperatura y por lo tanto, como habíamos dicho anteriormente no está estrictamente de acuerdo con la definición de transferencia de calor, sin embargo el efecto neto es un transporte de energía y puesto que éste ocurre en la dirección de un gradiente de temperatura está clasificado como una forma de transferencia de calor y conocido como flujo de calor por convección.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido, como consecuencia un estudio de la transferencia de calor por convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

Uno de los aspectos más importantes del análisis hidrodinámico es establecer cuando es laminar o turbulento el movimiento del fluido.

En el flujo laminar o sin remolinos, el fluido se mueve en capas y cada partícula de fluido sigue una trayectoria uniforme y continua, las partículas de fluido en cada capa conservan una secuencia ordenada sin pasarse unas a otras.

Cuando un fluido fluye con movimiento laminar sobre una superficie diferente a la del fluido, el calor se transfiere únicamente por conducción molecular tanto dentro del fluido como en la capa intermedia entre el fluido y la superficie.

Por otro lado, en el flujo turbulento el mecanismo de conducción está modificado y ayudado por innumerables remolinos que acarrean masas de fluido a través de las líneas de corriente, estas partículas de fluido actúan como transportes de energía y la transfieren al mezclarse con otras partículas del fluido; por lo tanto, un incremento en la rapidez de mezclado (o turbulencia) incrementará también la rapidez del flujo de calor por convección.

De la descripción del mecanismo de transporte de energía por convección, se recuerda que tanto la conducción como el transporte de masa juegan un papel importante; puesto que la conductividad térmica de los fluidos es relativamente pequeña excepto para los metales líquidos, la rapidez de la transferencia de energía depende principalmente del movimiento de mezcla de las partículas del fluido.

Cuando la velocidad del fluido y la turbulencia son pequeñas materialmente, el transporte de energía no es ayudado por las corrientes de mezcla a escala macroscópica. Por otro lado, cuando la velocidad es grande, la mezcla entre los fluidos caliente y frío contribuye sustancialmente a la transferencia de energía, el mecanismo de conducción se vuelve menos importante, en consecuencia para transferir calor por convección a través de un fluido a una rapidez dada, se necesita un gradiente de temperatura mayor en una región de baja velocidad que en una región de alta velocidad.

El movimiento del fluido puede inducirse por dos procesos, el fluido puede ponerse en movimiento como un resultado de la diferencia de densidades debida a la variación de temperaturas en el fluido, este mecanismo se llama convección libre o natural. La convección forzada se realiza cuando el movimiento es ocasionado por algún agente externo, tal como una bomba o un ventilador. Cuando la rapidez del flujo de calor en un sistema no varía con el tiempo (es decir, cuando es constante), la temperatura de cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones del estado estable: bajo las condiciones del estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema debe ser igual a la rapidez con la que entra dicho flujo y no puede tener lugar ningún cambio de energía interna. La mayoría de los problemas de transferencia de calor en la ingeniería están relacionados con sistemas en estado estable.

La rapidez de calor transferido por convección entre una superficie y un fluido, fue originalmente propuesta por el científico Isaac Newton, puede calcularse por la relación:

$$q_c = h A (T_s - T_o)$$

ec. 1.6

donde:

q_c = rapidez de calor transferido por convección

A = área de transferencia

T = diferencia entre la temperatura de la superficie T_s , y la temperatura del fluido T_o , en algún punto específico (usualmente lejos de la superficie)

h = *unidad de conductancia térmica promedio para la convección (coeficiente de transferencia de calor en la convección)*

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor de la convección es difícil, debido a que la convección es un fenómeno muy complejo.

El valor numérico del coeficiente de transferencia de calor por convección en un sistema depende de la geometría de la superficie y de la velocidad, así como de las propiedades físicas del fluido y frecuentemente también de la diferencia de temperatura, en vista de que estas cantidades no son necesariamente constantes sobre una superficie, el coeficiente de transferencia de calor en la convección puede también variar de punto a punto, por esta razón se debe distinguir entre un coeficiente local de transferencia de calor en la convección y un coeficiente promedio.

1.3 RADIACION

La radiación es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura, cuando estos están separados por un espacio que incluso puede ser el vacío.

La radiación se aplica generalmente a todas las clases de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas, la transmisión de energía tiene lugar en forma de pequeñas pero finitas unidades de energía conocidas como cuantos; su frecuencia depende completamente de la naturaleza de su fuente, para este estudio lo que nos interesa es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura llamada radiación térmica.

Como hemos visto anteriormente, la importancia relativa de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor de un cuerpo a otro depende mucho de la temperatura; los fenómenos de conducción y convección son afectados primordialmente por la diferencia de temperaturas y muy poco por el nivel térmico, mientras que los intercambios por radiación crecen rápidamente con el aumento del nivel térmico, se deduce de ello que a temperaturas relativamente bajas la conducción y convección son las que contribuyen en mayor proporción al calor total transferido, y a temperaturas muy altas la radiación es el factor que controla la transmisión térmica.

La expresión de radiación térmica se refiere de una manera general a la energía radiante emitida como consecuencia de la temperatura del cuerpo, y más específicamente a la cantidad y calidad de radiación que exclusivamente depende de la temperatura y no de la naturaleza del cuerpo emisor.

El poder de emisión es la cantidad total de radiación emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo, depende de la temperatura y de las características de la superficie del cuerpo; cuando la radiación incide sobre un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, dicha relación puede escribirse de la siguiente forma:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

ec. 1.7

donde:

α = absorcividad

ρ = reflectividad

τ = transmisividad

Los cuerpos que no transmiten radiación se llaman cuerpos opacos, por lo que la ec. 1.7 queda de esta forma:

$$\alpha + \rho = 1$$

Un cuerpo negro o radiador ideal puede definirse ya sea como un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que no refleja o transmite ninguna, o como un radiador que emite a cualquier temperatura especificada la máxima cantidad posible de radiación térmica en todas las longitudes de onda; el cuerpo negro se usa como una medida con la que se comparan las características de radiación de otros cuerpos, Kirchhoff estableció que en equilibrio térmico la razón del poder de emisión de una superficie a su absorcividad, es la misma para todos los cuerpos:

$$\epsilon = \alpha$$

La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante, depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza del cuerpo, un radiador o cuerpo negro emite energía radiante desde su superficie a una rapidez:

$$e_b = \sigma T^4$$

Ecuación conocida como la ley de Stefan-Boltzmann, donde:

e_b = Potencia emisiva

T = Temperatura de la superficie (absoluta)

$\sigma =$ Constante de Stefan-Boltzmann $= 5.669 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

II. AISLAMIENTOS TERMICOS

II.1 INTRODUCCION

Un material termoisolante es todo aquel que nos evite la pérdida o ganancia de calor de un sistema determinado, está compuesto de materiales básicos con un coeficiente de conductividad térmica bajo, conformados de tal forma que queden atrapados celdillos de aire en reposo rodeados de paredes sólidas.

El objetivo del aislamiento térmico es la reducción de los flujos de calor, sin embargo, en la mayoría de los casos, el aislamiento representa una necesidad importante que deriva de factores económicos, técnicos y/o humanos.

Los factores económicos provienen del interés que representa el ahorro de energía desperdiciada.

Los factores técnicos aparecen en los procesos en los cuales una temperatura debe conservarse constante para mantener ciertas propiedades físicas.

Los factores humanos resultan de la necesidad de efectuar trabajos en la cercanía de fuentes de calor o de frío, donde la temperatura sería insostenible o peligrosa para el operario.

II.1.1 IMPORTANCIA DEL AISLAMIENTO TERMICO EN LA INDUSTRIA

Son muchas las razones que podemos exponer para justificar la importancia del aislamiento en la industria, las más importantes son:

a) Ahorro de energía.- Por medio de las ecuaciones de flujo de calor y comparando el costo de la energía perdida contra el costo del aislamiento instalado puede determinarse fácilmente su rentabilidad dado el caso, calcularse exactamente el espesor de aislamiento más económico.

b) Control de temperatura.- En procesos que se llevan a cabo a temperaturas inferiores al ambiente o en la conservación o transporte de productos a una determinada temperatura, el aislamiento térmico es un elemento importante del equipo de producción u operación; la necesidad de instalarlo es independiente de justificaciones económicas.

c) Condensación superficial.- La humedad contenida en el aire ambiente se condensa sobre la superficie de todo equipo que se encuentra a temperatura inferior a la del punto de rocío de dicho aire ambiente, cuando la temperatura superficial del equipo es inferior a los 0° C puede formarse hielo; para evitar los problemas que

ocasiona la condensación del hielo se instala un aislamiento de un espesor calculado para que la temperatura de su superficie sea superior a la del punto de rocío en las condiciones atmosféricas usuales, normalmente el espesor del aislamiento requerido para evitar la condensación superficial es mayor que aquel determinado como el más económico.

II.1.2 SELECCION DE UN MATERIAL AISLANTE

Para la selección de un material aislante debemos tener presente los siguientes factores:

a) La temperatura de operación del equipo o tubería, ya que los materiales aislantes tienen sus limitaciones en cuanto al rango de temperatura en el cual son aplicables con un alto grado de eficiencia o simplemente son operables, esto se debe a la composición de los materiales básicos con los que están compuestos.

b) El espesor seleccionado de un material aislante, para la buena operación de un equipo o tubería es otro factor íntimamente ligado con la temperatura de operación del sistema, se debe tener presente que para la selección del tipo de aislamiento y cálculo del espesor del mismo debe tomarse como base la temperatura máxima de operación y no la de diseño del equipo.

La selección del espesor adecuado puede obtenerse por dos métodos: aplicando la fórmula de transmisión de calor, en donde interviene el factor de conductividad térmica del material, el área de superficie transmisora de calor, las pérdidas de calor permisibles para el caso por analizar, y las temperaturas del lado caliente y frío del aislamiento, o por las gráficas tabuladas por los fabricantes de materiales aislantes.

La buena selección del espesor de un material es de primordial importancia porque a través de él se puede lograr una alta eficiencia térmica en una tubería o equipo, y las pérdidas de calor se pueden disminuir.

Muchas veces es necesario realizar un balance económico para ver si es más conveniente realizar una mayor inversión aumentando el espesor del aislamiento sobre el recomendado, con tal de obtener mejor eficiencia térmica y menores pérdidas de calor.

c) El medio ambiente es un factor muy importante que debemos conocer y tener presente en la selección de un material aislante y de acabado.

Un buen material aislante además de una alta resistencia a la transmisión de calor, debe tener otras características relacionadas con la aplicación que se le dé.

En algunas aplicaciones como el aislamiento de hornos, el material debe ser capaz de resistir altas temperaturas sin deteriorarse; en el aislamiento de aviones debe tener cualidades como: cierta robustez estructural, capacidad de resistir la vibración y muy poco peso.

Los materiales aislantes deben ser inodoros y no absorber olores, deben ser resistentes a la putrefacción o

desintegración y no servir de alimento a roedores o insectos, esto es particularmente cierto para el aislamiento de edificaciones o almacenes de alimentos, además deben ser resistentes a la humedad o estar protegidos contra la misma; hay otros medios sumamente corrosivos, para lo cual es necesario colocar sobre el equipo o tubería algún material anticorrosivo para protección tanto del equipo como del aislamiento térmico.

En la selección de un material aislante y sus acabados, es importante saber si éstos se van a colocar a la intemperie o bajo cubierta, en el primer caso no se puede dejar el material al descubierto, ya que se debe proteger contra las inclemencias del medio ambiente con un impermeabilizante, o si el caso lo permite con lámina galvanizada o de aluminio, o con cementos plásticos; si el sistema por aislar está bajo techo y no hay problemas de deterioro por causas humanas o sustancias perjudiciales, se puede dejar el material sin ningún acabado, procurando dejar un sello perfecto en sus juntas, uniones o traslapes para evitar pérdidas de calor, sin embargo, se debe procurar proteger en parte el material aislante para aumentar la vida útil del mismo.

II.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS AISLANTES

La conductividad de un material considera la existencia de distintos procesos de transferencia de calor:

- Conducción gaseosa por el gas ocluido en celdas del material.*
- Convección gaseosa por este gas.*
- Conducción sólida a través del material.*
- Radiación entre los materiales a temperaturas distintas.*

Procesos ya mencionados en el capítulo anterior, aquí nos limitaremos a reportar la influencia de los factores fisicoquímicos que determinan la importancia respectiva de los procesos anteriores.

Estos factores son entre otros:

- Porosidad y masa volumétrica aparente.*
- Composición química.*
- Humedad del material.*
- Temperatura media.*
- Presión del gas.*

II.2.1 INFLUENCIA DE LA POROSIDAD

Tratándose de un cuerpo poroso es lógico pensar que su coeficiente de conducción térmica tiene un valor intermedio entre los valores de los coeficientes de conducción térmica del material sólido y del fluido contenido en los poros. En la primera aproximación depende del volumen de los poros, es decir del peso específico del aislante.

II.2.2 INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA

La composición química de la materia sólida y del gas ocluido en sus poros, tiene una gran influencia sobre la conductividad térmica del material:

a) Composición química de la parte sólida.

La conductividad de cuerpos cristalinos es muy superior a ciertas temperaturas a la de ese mismo material cuando se encuentra en forma amorfa, demostrándose la importancia de la estructura del material a emplear.

b) Naturaleza del gas ocluido en los poros.

El coeficiente de conductividad del aislante varía de acuerdo al gas que contenga en sus poros, por ejemplo, en la industria de la refrigeración, al reemplazar al aire ocluido en el poliuretano expandido por gas freón, se abate la conductividad aparente a 20°C en un 40%.

II.2.3 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD

El reemplazo del aire seco ($k = 0.034 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) por aire saturado ($k = 0.09 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) tiene una influencia considerable sobre la conductividad térmica de un material aislante a medida que aumenta el contenido del agua, el incremento es consecuencia por una parte a un fenómeno de difusión del vapor de agua en los poros (vaporización y condensación) que depende fuertemente de la temperatura y por otra parte, a la conducción por el agua en los canales capilares.

II.2.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

En forma general el coeficiente de conductividad térmica de los materiales aislantes aumenta con la temperatura, este aumento se debe a la importancia del proceso de transferencia de calor por radiación que varía con la cuarta potencia de la temperatura.

En los materiales porosos, por esa misma razón, el diámetro de los poros es un factor importante en la medida que influya sobre el gradiente de temperatura entre granos, y por lo tanto sobre la energía intercambiada por radiación.

II.2.5 INFLUENCIA DE LA PRESION

Aunque la contribución de los gases a la conductividad térmica de los materiales sólidos es generalmente poco importante, en el caso de los aislantes, su influencia es crítica; en efecto, cuando la trayectoria libre media del gas intersticial es del orden de las distancias entre las paredes del material, la conducción por el gas disminuye considerablemente, reduciendo asimismo la conductividad aparente del material. Esta propiedad es manejada en la obtención de los polvos aislantes utilizados en la industria criogénica.

II.3 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES

Existen muchos y muy variados tipos de aislantes empleados en la industria, y por lo tanto, varias posibilidades para llevar a cabo su clasificación; se han escogido tres criterios de clasificación aceptables dentro de los muchos existentes.

- 1. Clasificación en base al origen.*
- 2. Clasificación en base a la estructura.*
- 3. Clasificación en función de la temperatura de utilización.*

II.3.1 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES EN BASE A SU ORIGEN

Como cualquier material, los aislantes pueden separarse en tres categorías que son determinados por su origen:

- Aislantes de origen biológico: fibras, corcho, balsa, etc.*
- Aislantes de origen mineral: asbestos, tierra de diatomea, vermiculita, etc.*
- Aislantes de origen sintético: espumas, superaislantes, etc.*

II.3.2 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES EN BASE A SU ESTRUCTURA

Para una aplicación industrial, el conocimiento de la estructura es mucho más importante, ya que ésta condicione la tecnología de su utilización.

En base a la estructura pueden distinguirse las siguientes categorías:

- a) Aislantes en polvo**
- b) Aislantes fibrosos**
- c) Espumas**
- d) Aislantes compuestos y superaislantes**

a) Aislantes en polvo.- Estos materiales son obtenidos por aglomeración de pequeñas partículas cuyo diámetro fluctúa de algunos micrones a algunos milímetros, con intersticios entre granos llenos de aire o de algún otro gas.

El proceso de transferencia de calor resulta de los contactos directos entre partículas y de los fenómenos de convección y conducción gaseosa y en ciertos casos interviene también el proceso de transferencia por radiación; por lo tanto, además de la conductividad térmica del material y del gas, la forma de los granos y sus propiedades mecánicas son importantes. La conductividad térmica de estos materiales se usa principalmente en instalaciones estacionarias en las cuales los riesgos de compactación son reducidos.

Bajando la presión del gas se reduce la convección gaseosa y solamente intervienen los procesos de conducción y radiación, este último proceso puede ser también reducido en forma substancial incluyendo en el polvo un cierto porcentaje de partículas metálicas (alrededor de un 35%), que reflejan la radiación infrarroja.

b) Aislantes fibrosos.- Estos materiales generalmente de origen vegetal o mineral son obtenidos de una infinidad de fibras unidas entre sí con un aglomerante, por lo tanto las propiedades térmicas de este material dependen de los mismos factores que en el caso de los polvos, pero son anisotrópicos, es decir, que el proceso de transferencia en el sentido de las fibras es distinto al proceso de transferencia en dirección perpendicular. Estas propiedades, aunadas a mejores propiedades mecánicas permiten una utilización industrial mas versátil, como en la industria de la construcción; podemos citar como ejemplo a la fibra de vidrio y fibra mineral.

c) Espumas.- Estos materiales de origen sintético, son obtenidos por la expansión de un gas que deja una infinidad de celdas abiertas o cerradas en la masa del material; el proceso de transferencia de calor es principalmente por medio de conducción sólida y conducción gaseosa en las celdas, teniendo este último proceso una importancia mayor; entre las espumas sintéticas más utilizadas se encuentran: los poliestirenos, los poliuretanos y los policloruros de vinilo. El envejamiento que resulta de la difusión del gas ocluido en las celdas no es despreciable, sin embargo su degradación en el tiempo puede ser mantenida en límites muy inferiores a las que resulta de la deterioración mecánica de los polvos o de las fibras aislantes. Además, estos materiales permiten la prefabricación de elementos de estructura aislante con una muy grande precisión, lo cual favorece la utilización industrial en serie.

Como ejemplo de espumas aislantes tenemos las siguientes:

POLIURETANO.- Generalmente éste material se surte en placas con recubrimiento de cartón asfaltado, tiene bajo factor de conductividad y aún cuando algunos fabricantes han emprendido intensas campañas publicitarias para promoverlo, se observa que entre los constructores mas conocedores de la materia ha tenido poco éxito, esto se debe fundamentalmente a las siguientes razones:

El espesor de las placas no es uniforme, particularmente cerca de las orillas de la placa dicho espesor tiende a disminuir.

No permite que la superficie queda totalmente aislada, en aquellos casos en los que se surte con recubrimiento de cartón con mucha frecuencia queda un hueco entre el cartón y el aislamiento dejando una superficie prácticamente sin aislar.

Al igual que otras espumas plásticas el poliuretano es combustible.

Se alarga, se contrae y se tuerce con los cambios de temperatura y ésta es una característica que también comparte con otras espumas plásticas.

***POLIESTIRENO.** Este material tiene problemas aún más graves que al poliuretano ya que comparte con él desventajas como: combustibilidad, carencia de estabilidad dimensional; además de lo cual se funde a temperaturas relativamente bajas, por esta razón es necesario instalar la impermeabilización en frío, ya que los materiales asfálticos comúnmente usados en impermeabilizaciones podrían provocar la fusión del material y con ello la nulificación de sus propiedades aislantes. Los solventes de algunos materiales lo afectan y finalmente su factor de conductividad es más alto que el poliuretano.*

d) Aislantes compuestos y superaislantes. Esta denominación corresponde a materiales heterogéneos obtenidos mediante un proceso fisicoquímico que une entre sí a ciertos elementos aislantes en forma más o menos rígida.

Entre los compuestos aislantes rígidos podemos mencionar los refractarios, semirefractarios y los concretos aislantes.

Los materiales heterogéneos no rígidos están constituidos por sistemas de multicapas que se utilizan principalmente a baja temperatura y a baja presión; estos materiales comúnmente llamados superaislantes están constituidos por capas reflectoras y por capas aislantes, a manera de disociar los procesos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

La utilización de n capas reflectoras térmicamente aisladas permite reducir la transferencia de calor en un factor $n+1$; limitando también los procesos de conducción gaseosa y sólida, se obtienen valores de conductividad térmica muy bajos.

Estos materiales se utilizan especialmente en la industria criogénica.

II.3.3 CLASIFICACION DE LOS AISLANTES EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE UTILIZACION

Es costumbre considerar tres clases de materiales aislantes:

- *Aislantes refractarios susceptibles de trabajar a temperaturas superiores de 1600°C.*
- *Aislantes semirefractarios capaces de soportar hasta 1000°C.*
- *Aislantes ordinarios capaces de soportar hasta 700°C.*

Sin embargo para el manejo que nos interesa, preferimos definir cuatro zonas de temperatura de utilización:

- *La zona de altas temperaturas arriba de 700°C.*
- *La zona de las temperaturas industriales que se extiende desde la temperatura ambiente hasta 700°C.*
- *La zona de las bajas temperaturas desde -50°C, hasta +50°C.*
- *La zona de las temperaturas criogénicas.*

Obviamente no existe una transición claramente marcada entre los diferentes rangos de temperatura, son embargo, esta clasificación permite distinguir grupos de materiales.

II.4 NORMALIZACION

Las normas que a continuación se exponen han sido elaboradas por instituciones como CANACINTRA, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD y PETROLEOS MEXICANOS, las cuales rigen la fabricación de los aislantes nacionales, mismos que se fundamentan en las normas internacionales de la ASTM (AMERICAN STANDAR TESTING MATERIALS):

**NORMA C-230-1985 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION · MATERIALES TERMOAISLANTES
· FIBRAS MINERALES · ESPECIFICACIONES · (CANACINTRA)**

**NORMA C-125-1982 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION · MATERIALES TERMOAISLANTES
DE FIBRAS MINERALES · ESPESOR Y DENSIDAD · DETERMINACION
(CANACINTRA)**

**NORMA D4500-04 AISLAMIENTO TERMICO
ESPECIFICACION
(COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD)**

**NORMA 2-616-01 AISLAMIENTO TERMICO PARA ALTA TEMPERATURA
(PETROLEOS MEXICANOS)**

**NORMA 2-616-02 AISLAMIENTO TERMICO PARA BAJA TEMPERATURA
(PETROLEOS MEXICANOS)**

**NORMA C-230-1985 (CANACINTRA)
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-MATERIALES TERMOAISLANTES-FIBRAS MINERALES-ESPECIFICACIONES.**

1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta norma mexicana establece las especificaciones mínimas de calidad de fibras minerales obtenidas a partir de roca, escoria o vidrio; ya sea en forma de bloque, placa, colchoneta y rollo rígidas y semirígidas o flexibles, para usarse como termoislantes sobre superficies a temperaturas desde -84 hasta 750°C.

2. CLASIFICACION

2.1 Por su temperatura máxima de operación:

Clase I Para usarse hasta 232°C

Clase II Para usarse hasta 454°C

Clase III Para usarse hasta 538°C

Clase IV Para usarse hasta 750°C

2.2 Por su composición

Tipo A Fibra de vidrio con aglutinante de resina orgánica.

Tipo B Fibra de vidrio con aglutinante de aceite soluble en agua.

Tipo C Lana mineral de roca o escoria aglutinada.

Tipo D Lana mineral de roca o escoria con aglutinante de resina orgánica.

Tipo E Lana mineral de roca o escoria con aglutinante de aceite soluble en agua.

2.3 Por sus características mecánicas:

Pueden ser rígidas, semirígidas o flexibles.

3.- ESPECIFICACIONES

3.1 Los productos objeto de esta norma deben cumplir con las especificaciones señaladas en las tablas 1,2,3 y 4 que se muestran en el anexo A.

3.2 Composición.

La fibra debe ser de sustancias minerales tales como roca, escoria o vidrio, procesado a partir de un estado de fusión a formación de fibras.

3.3 Adsorción de humedad.

Cuando se prueben los termoaislantes para usarse a bajas temperaturas no deben aumentar más de lo indicado en las tablas antes señaladas.

3.4 Densidad.

Para material de entrega, la densidad debe ser la especificada con una tolerancia de $\pm 10\%$.

**NORMA C-125-1982 (CANACINTRA)
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-MATERIALES TERMOAISLANTES DE FIBRAS MINERALES-ESPESOR Y
DENSIDAD-DETERMINACION.**

1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma mexicana establece los métodos de prueba para la determinación del espesor y la densidad de los materiales termoaislantes de fibras minerales que pueden tener la presentación de colchoneta armada, rollos y placas afelpadas con o sin recubrimiento superficial o reforzados.

2. REFERENCIAS

NOM-C-127 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-MATERIALES TERMOAISLANTES-MUESTREO"

3. APARATOS Y EQUIPO

-Calibrador de profundidad del tipo comercial.- Este tiene un disco que debe permanecer perpendicular a la aguja y debe tener un dispositivo de fricción para sujetar a ésta a menos que se mueva intencionalmente, la aguja debe ser lo suficientemente larga para la medida del espesor del material.

-Regla de acero graduada en mm.

-Balanza adecuada a la masa del espécimen de prueba con una precisión de más o menos 0.5% de la masa de este.

-Estufa de calor seco (con circulación de aire).

4. PREPARACION DEL ESPECIMEN DE PRUEBA

El tamaño del espécimen de prueba no debe limitarse, procurando siempre que sea práctico, usar el tamaño comercial tal como se recibe, este debe estar libre de impurezas.

5. PROCEDIMIENTO.

5.1 Dimensiones

5.1.1 Espesor

Se seleccionan por lo menos tres áreas aproximadamente iguales a lo largo del espécimen que correspondan a 30 ó 60 cm de largo y se hace una medición del espesor en el centro de cada una de ellas.

5.1.2 Largo y ancho:

Se mide el largo y el ancho del espécimen en mm. En el caso de materiales que tengan refuerzos superficiales o recubrimientos, la longitud y el ancho se miden en el aislamiento y no en el recubrimiento superficial.

5.2 Determinación de la masa.

Al espécimen se le determina la masa con aproximación de más o menos 0.5%. Además en el caso de material con revestimiento, se determina la masa del aislamiento sin este.

6.- INFORME

El informe debe incluir lo siguiente:

El promedio, el máximo y el mínimo de los valores obtenidos en las mediciones del espesor del espécimen de prueba, en cm.

La densidad del aislamiento como se recibe, expresada en g/cm³.

NORMA D4500-04 (C.F.E.) AISLAMIENTO TERMICO-ESPECIFICACION.

1.- OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta especificación establece las características y los requisitos de compra que debe reunir el aislamiento térmico y los accesorios de sujeción y acabado que se adquieran para instalarse en centrales termoeléctricas con unidades turbogeneradores de 160 y 350 MW que adquiere la COMISION FEDERAL.

2.- CARACTERISTICAS DE DISEÑO

2.1 Pérdidas de calor.- La pérdida de calor debe ser calculada en base a las siguientes fórmulas:

a) Para superficies planas:

$$q = \frac{A(t_0 - t_a)}{\frac{e}{k} + \frac{1}{f}}$$

b) Para superficies circulares:

$$Q = \frac{T_0 - T_a}{\frac{Eeq}{k} + \frac{1}{f}}$$

Donde:

- q** = Cantidad de calor transmitido.
- Q** = Pérdida de calor en la superficie aislada.
- t₀** = Temperatura de operación.
- t_a** = Temperatura ambiente.
- Eeq** = $r_2 \ln(r_2/r_1)$ = Esesor equivalente.
- e** = Esesor para superficies planas.
- 1/f** = Coeficiente de película.
- r₂** = Radio externo del aislamiento.
- r₁** = Radio interno del aislamiento.
- k** = Conductividad térmica.

2.3 Espesor del aislamiento. Al establecer el espesor se consideraron las temperaturas de operación indicadas para las tuberías y los equipos, considerando una temperatura ambiente promedio de 24°C y una temperatura máxima de superficie de 60°C.

3.- CARACTERISTICAS DE FABRICACION

Todo el material de aislamiento debe estar de acuerdo con los requisitos del ASTM Vol.18 y lo descrito en esta especificación. El material aislante debe ser químicamente inerte, estable y a prueba de fuego y no debe causar corrosión en la tubería.

NORMA 2-616-01 (PETROLEOS MEXICANOS) AISLAMIENTO TERMICO PARA ALTA TEMPERATURA.

1.- OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta norma tiene por objeto seleccionar los materiales de aislantes para recipientes, equipo y tubería en servicio de alta temperatura, cubriendo los requisitos generales de diseño y en especial, el espesor y la composición del aislamiento destinado a la conservación del calor y/o a la protección del personal en este servicio; considerándose dentro de esta norma "Alta temperatura" a la temperatura superior a 35°C.

2.- GENERALIDADES

Los aislamientos cubiertos por esta norma se clasifican según el servicio en:

- Aislamiento para conservación de calor.**
- Aislamiento para protección del personal.**

3.- LIMITACIONES

Todo recipiente, equipo o tubería que requiera aislamiento y que tenga una temperatura de operación normal de 35°C o menor se aislará de acuerdo con la norma 2-616-02 "Aislamientos Térmicos para Baja Temperatura" que se menciona posteriormante. Para temperaturas de operación superior a 35°C, deberán aislarse de acuerdo

con esta norma según las siguientes condiciones:

- De 36 a 65°C: Aislamiento para estabilidad en la operación.*
- De 66 a 80°C: Aislamiento para conservación del calor y estabilidad en la operación.*
- De 81 a 1500°C: Aislamiento para protección de personal, conservación de calor y estabilidad en la operación.*

4. TEMPERATURA DE DISEÑO

Para la selección del tipo de aislamiento y cálculo del espesor del mismo, debe tomarse como base la temperatura máxima de operación y la temperatura exterior recomendada de la superficie del aislamiento descrito en la tabla 5 del anexo A.

5. TEMPERATURA EXTERIOR DE AISLAMIENTO

En la misma tabla 5 se muestran las temperaturas exteriores de aislamiento, que como máximo se deben obtener con el espesor calculado del aislamiento seleccionado.

Las aplicaciones que tienen estos materiales aislantes en plantas de proceso, se encuentran descritas en la tabla 6 del mismo anexo A.

NORMA 2-616-02 (PETROLEOS MEXICANOS) AISLAMIENTO TERMICO PARA BAJA TEMPERATURA

Esta norma tiene por objeto seleccionar los materiales de aislamiento para recipientes, equipo y tubería en servicio de baja temperatura; la norma cubre los requisitos generales de diseño y en especial el espesor y la composición del aislamiento destinado a conservar una temperatura baja y/o evitar condensación de la humedad atmosférica. Considerándose dentro de esta norma "Baja Temperatura", a las temperaturas comprendidas entre 35°C y menores.

1. GENERALIDADES

Los aislamientos en esta norma se clasifican según su servicio en:

- 1.- Aislamiento para conservación de baja temperatura.**
- 2.- Aislamiento para evitar la condensación de humedad atmosférica.**

2.- LIMITACIONES

Todo recipiente, equipo o tubería que requiere aislamiento y que tenga una temperatura de operación de 35°C o menor, se aislará de acuerdo con la norma 2-616-02. Aquellos que requieran aislamiento y operen a temperaturas superiores de 35°C se aislarán de acuerdo con la norma 2-616-01. Aislamientos Térmicos para Alta Temperatura, descrita anteriormente.

En la tabla 7 (anexo A) de esta norma se resumen las aplicaciones que tiene algunos materiales en plantas de proceso.

III. TERMOPARES

III.1 INTRODUCCION

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medición están definidas según su aplicación, precisión, velocidad de captación de la temperatura, tipo de instrumento indicador, etc., por lo que es importante señalar que es esencial una comprensión clara de los distintos métodos de medida con sus ventajas y desventajas para lograr una selección óptima del sistema más adecuado.

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

- a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos.- sólidos, líquidos o gases.*
- b) Variación de resistencia de un conductor.- sondas de resistencia.*
- c) Variación de resistencia de un semiconductor.- termistores.*
- d) F. e. m. (fuerza electromotriz) creada en la unión de dos metales distintos.- Termoparas.*
- e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo.- pirómetros de radiación.*
- f) Otros fenómenos utilizados en laboratorios.- velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia en un cristal, etc.*

Para lo cual se emplean los instrumentos siguientes: termómetros de vidrio, termómetros bimetalicos, elementos primarios de bulbo y capilar rallanos de líquidos, gas o vapor, pirómetros de radiación, termómetros de resistencia, termómetros ultrasónicos de cristal de cuarzo, y los termopares, los cuales se ampliaeren para la medición de la conductividad térmica del presente trabajo; su generalidad se describe a continuación.

III.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS TERMOPARES

El termoper se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, que consiste en un circuito formado por dos alambres de distinto material empalmados por sus dos extremos y se calienta una de las unionas mientras

la otra se mantiene a la temperatura ambiente, se produce en el circuito una corriente eléctrica. Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier y el efecto Thompson, ver figura III.1.

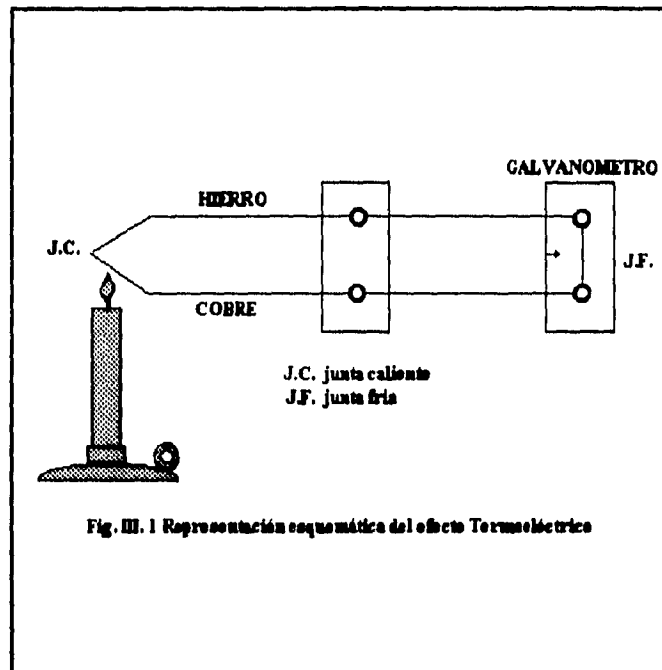


Fig. III. 1 Representación esquemática del efecto Termoeléctrico

Por lo que un termopar está formado simplemente por dos alambres de diferente composición metalúrgica conectados en ambos extremos para completar un circuito eléctrico, la fuerza electromotriz (f.e.m.) generada depende de la diferencia de temperaturas entre la junta caliente (comúnmente llamada junta de referencia) y la junta fría.

El efecto principal denominado Peltier controla la f.e.m. que resulta del contacto de los dos metales distintos y su magnitud varía con la temperatura en el punto de contacto; la f.e.m. que resulta de un efecto menor llamado Thompson, es aquel que se produce cuando se sujeta un alambre o conductor a un gradiente de temperatura a lo largo del mismo.

La combinación de estos dos efectos Peltier y Thompson, son la causa de la circulación de la corriente al cerrar el circuito en el termopar.

Los materiales usados en la fabricación de termopares de tipo comercial se seleccionan de tal manera que el efecto Thompson pueda ser despreciado, es decir que el valor de los milivoltajes generados debido a este efecto puedan ser ignorados por su escaso valor, así pues el milivoltaje generado dependerá únicamente del efecto Peltier.

III.3 TIPOS DE TERMOPARES

La selección de los termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo costo y de baja resistencia eléctrica y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de éste sea (aproximadamente) proporcional al aumento de la temperatura.

III.3.1 TERMOPARES MAS USADOS EN LA PRACTICA

- 1.- Cobre-constantano (tipo T)**
- 2.- Hierro-constantano (tipo J)**
- 3.- Cromel-constantano (tipo E)**
- 4.- Cromel-alumel (tipo K)**
- 5.- Platino-platino más 13% rodio (tipo R)**
Platino-platino más 10% rodio (tipo S)

Se han desarrollado otros termopares que se usan en aplicaciones especiales como son los siguientes:

- 6.- Renio-molibdeno**
- 7.- Renio-tungsteno**
- 8.- Iridio-iridio rodio**
- 9.- Tungsteno-tungsteno renio**
- 10.- Platino rodio-platino rodio**

Las características más importantes de los termopares antes mencionados son:

1.- Cobre-constantano (tipo T).- Estos termopares tienen un alambre de cobre puro como conductor positivo y un alambre de aleación cobre-níquel (constantano), como conductor negativo. Se utilizan para medir temperaturas entre -180°C a 320°C y son de un precio bajo, además ofrecen alta resistencia a la corrosión en atmósferas húmedas; pueden ser usados en atmósferas reductoras y oxidantes. Estos termopares tienen una exactitud superior dentro de su gama de temperatura recomendada en comparación con los otros termopares, ver tabla 8 del anexo A.

2.- Hierro-constantano (tipo J).- Tienen como conductor positivo un alambre de hierro y como conductor negativo un alambre de constantano, se aplica normalmente para temperaturas que van desde -18°C hasta 750°C , dependiendo de su calibre. Son recomendables para usarse en atmósferas donde existe deficiencia de oxígeno libre, y para atmósferas reductoras y tienen un precio relativamente bajo.

3.- Cromel-constantano (tipo E).- Estos termopares tienen un alambre de cromel como conductor positivo y un alambre de constantano como conductor negativo; se aplica para la medición de temperaturas de -18°C hasta 550°C y se emplean primordialmente para atmósferas oxidantes, no se corroe a temperaturas bajo cero.

4.- Cromel-alumel (tipo K).- Los termopares de este tipo consisten de un alambre de aleación cromo-níquel (cromel) como conductor positivo y un alambre de aleación níquel-aluminio (alumel) como conductor negativo; la gama de temperatura recomendada es desde 280°C a 580°C de acuerdo con el calibre del alambre usado. Este tipo de termopares presta un servicio óptimo en atmósferas oxidantes aunque también se puede usar en atmósferas reductoras o alternativamente oxidantes y reductoras, siempre y cuando se use un tubo de protección apropiado y ventilado. Sus precios son algo más elevados que los de tipo J.

5.- Platino-plotino rodio (tipo R y S).- Estos tienen como conductor negativo un alambre de platino puro y como conductor positivo un alambre de 87% de platino y 13% de rodio (tipo R), o un alambre de 90% de platino y 10% de rodio (tipo S); si cuentan con una protección adecuada, sirven para la medición de temperaturas hasta de 1650°C en atmósferas oxidantes. Estos termopares se conteminan con facilidad cuando se usan en cualquier otra atmósfera a menos que se tomen las precauciones del caso con tubos de protección adecuados. Los vapores metálicos, el hidrógeno y los silicenos son veneno para este tipo de termopares. Su precio es alto y su f.e.m. pequeña por lo que su aplicación está restringida únicamente para altas temperaturas.

Los termopares anteriormente descritos tienen una amplia aplicación como termopares normales de calibración debido a sus siguientes propiedades:

- a) Sus curvas de calibración son fácilmente reproducibles.
- b) Consisten de metales metalúrgicamente puros.
- c) Gran estabilidad química de los metales.
- d) Alta exactitud a través de una amplia gama de temperaturas. Ver tabla 9 anexo A, límites de temperatura para termopares.

III.3.2 SELECCION DE LOS TERMOPARES

Frecuentemente se tiene que seleccionar un determinado tipo de termopar de acuerdo con las necesidades de medición y control de temperatura; la selección, por supuesto está basada en varios factores tales como el rango de temperatura de operación, exactitud requerida, respuesta térmica elevada de fuerza electromotriz y el medio ambiente en el cual el termopar va a ser instalado, para lo cual es importante tener como referencia los límites recomendados de temperatura y de error descrito en las tablas 8 y 9 del anexo A.

III.3.3 RECOMENDACIONES PARA LA INSTALACION, SELECCION Y MANTENIMIENTO DE TERMOPARES

Las siguientes consideraciones destacan las precauciones que se deben tener para obtener buenos resultados en el manejo de los termopares:

- 1.- Debe instalarse normalmente el termopar protegido por medio de una funda o tubo protector en el proceso, ya que las altas temperaturas, agentes químicos, etc., pueden llegar a afectar la vida y calibración del termopar.*
- 2.- La exactitud de medición y control de temperatura mediante un pirómetro (instrumento de medición) no puede ser mejor que la exactitud que se logre por las propiedades inherentes del termopar y del cable de extensión usado.*
- 3.- Dependiendo del tipo de termopar usado, estos son costosos y se debe tratar de reducir al mínimo su reemplazo, dándole una protección correcta.*
- 4.- Un termopar, en la medición requiere de un circuito eléctrico, para lo cual un defecto en las conexiones significaría una falla en el sistema de medición entero, por lo que es recomendable hacer conexiones firmes y observar que las polaridades se apliquen correctamente.*
- 5.- Escoger con cuidado la localización del termopar y la profundidad de inserción para evitar zonas muertas donde la temperatura no es representativa del proceso que se quiere controlar.*
- 6.- Asegurarse de que las conexiones eléctricas estén perfectamente limpias antes de apretar para obtener un buen contacto eléctrico.*
- 7.- Cuando se miden temperaturas muy elevadas, instalar si es posible, el termopar en posición vertical para evitar que el mismo se doble.*

8.- Cuando se reinstala un termopar después de una revisión o una reparación, asegurarse que quede colocado exactamente en la misma posición sin variar la profundidad de inserción.

9.- Si es posible, se recomienda controlar al termopar sin moverlo de su posición.

10.- No utilizar el termopar a temperaturas mayores de las recomendadas en cada caso.

11.- No es recomendable conectar un mismo termopar a dos instrumentos, para evitar posibles interferencias y retroalimentación de los mismos que pueden originar lecturas erróneas.

III.3.4 CABLES DE EXTENSION

El cable de extensión esta constituido generalmente de dos conductores y está provisto con una clase de aislante de acuerdo con las condiciones de servicio particulares. Es conveniente que en lugar de los cables de extensión se podrían usar los mismos alambres de los cuales consisten los termopares, sin embargo no serían económico hacerlo (ejemplo: termopares de platino-platino rodio) por lo cual se usan otros metales para construir los cables de extensión que tengan propiedades termoelectricas iguales o semejantes a la de los termopares originales. Su objetivo en sí, es extender el termopar hasta la junta de referencia del instrumento de medición.

IV. DESARROLLO Y ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE MEDIDORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

IV.1 INTRODUCCION

Sobre la investigación que existe para la medición de conductividad térmica se encuentran varios artículos de publicación nacional y extranjera sobre el tema; de éstos se mencionan a continuación los que se consideran de más trascendencia, tanto por su aportación técnica como por su desarrollo físico (construcción).

IV.2 "ANALISIS DE AISLAMIENTOS TERMICOS"

Artículo publicado en la Habana, Cuba por los ingenieros César Cisneros R. y Juan Fiorenzano B., en éste se expone la descripción de un aparato que consiste en analizar aislantes mediante un método comparativo. Para ello es necesario un material cuyas condiciones y características como aislante son conocidas incluyendo su conductividad térmica. En este trabajo no se utiliza un material patrón, si no que se compararon los resultados de las muestras entre sí; la utilización del material patrón sirve únicamente para obtener los resultados en función de los parámetros de éste; el material patrón se coloca en el interior en uno de cuatro tubos analizadores, de acuerdo a la figura IV.1, en los restantes tubos se colocan de igual manera las muestras que van a ser analizadas; por la tubería superior se hace pasar vapor hacia los cuatro tubos analizadores, los parámetros del vapor (P y T) son medidos con el manómetro y el termómetro, respectivamente. Las válvulas inferiores se cierran haciéndose pasar vapor hacia los tubos; a medida que pasa el tiempo y como producto de la pérdida de calor al medio ambiente, el vapor que se encuentra dentro de los tubos se condensa; el condensado que se obtiene es determinado en los medidores de nivel de cada tubo. Para una misma cantidad de condensado se mide el tiempo transcurrido en cada tubo. En el tubo donde se encuentra el mejor aislante para una misma cantidad de condensado, el tiempo transcurrido será mayor.

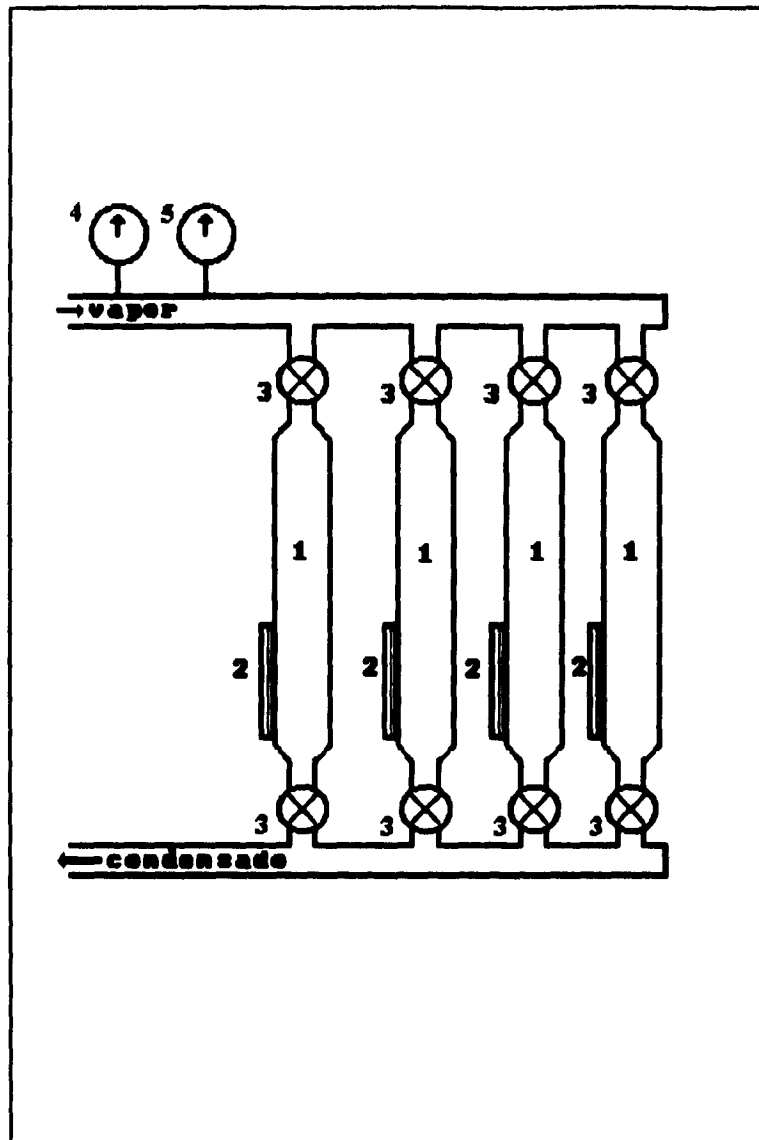


Fig.IV.1 Esquema de instalación

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| 1.- Tubos | 4.- Manómetro |
| 2.- Niveles | 5.- Termómetro |
| 3.- Válvulas | |

IV.2.1 METODOLOGIA DEL CALCULO

- **En tablas de vapor con P (presión) se halla el calor latente "r"**
- **Cálculo de la masa de condensado:**

$$G = \rho \frac{V}{t} \text{ (Kg/seg)}$$

donde:

ρ = Densidad del condensado

V = Volumen del condensado

t = Tiempo

- **Calor cedido a través del aislante:**

$$Q = G \times r$$

- **Calor cedido a través del aislante por unidad de longitud:**

$$Q_1 = \frac{Q}{L}$$

donde:

L = Longitud del aislante

- **Conductividad térmica del material aislante:**

$$k = \frac{Q_1 L_n (d_2 / d_1)}{2\pi (T_1 - T_2)}$$

d_1 = Diámetro interior del aislante

d_2 = Diámetro exterior del aislante

Las temperaturas T_1 y T_2 son medidas con termómetros de dilatación, estas temperaturas son de la superficie del tubo (interior del aislante) y de la superficie exterior del aislante.

IV.3 "DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MUESTRAS DE ROCA"

Artículo publicado en la Cd. de México por el Ingeniero R. Ramos del Instituto Mexicano del Petróleo, en el cual se describe la operación de un aparato para medir la conductividad térmica de las rocas secas. El aparato utiliza una muestra de referencia de conductividad térmica conocida, es decir trabaja como comparador, empleando el método de régimen permanente de flujo de calor.

El equipo de experimentación se divide en: un conductivímetro termoelectrónico, un sistema de control y registro de temperaturas, y un sistema de presión. Véase figura IV.2.

IV.3.1 CONDUCTIVIMETRO TERMOCLECTRICO

Constituye la parte principal del equipo de medición y está formado por los siguientes elementos:

- 1. Portamuestras de teflón donde van alojadas la muestra-prueba y una muestra-patrón de acero inoxidable.*
- 2. Muestra-patrón de acero inoxidable.*
- 3. Muestra de roca, a la cual se le pretende determinar la conductividad térmica.*
- 4. Discos de cobre donde van colocados los termopares.*
- 5. Calentador superior.*
- 6. Calentador inferior.*

- 7.- *Placa de cobre, para fijar el termopar inferior de la muestra de roca y uniformizar la salida del flujo de calor.*
- 8.- *Pieza de aluminio que sirve para disipar calor a la atmósfera.*
- 9.- *Base de baquelita, sirve como aislante de la parte inferior del aparato y como soporte del mismo.*
- 10.- *Cubierta aislante de fibra de vidrio, evita las fugas de calor hacia el medio ambiente a partir de la cubierta de teflón.*

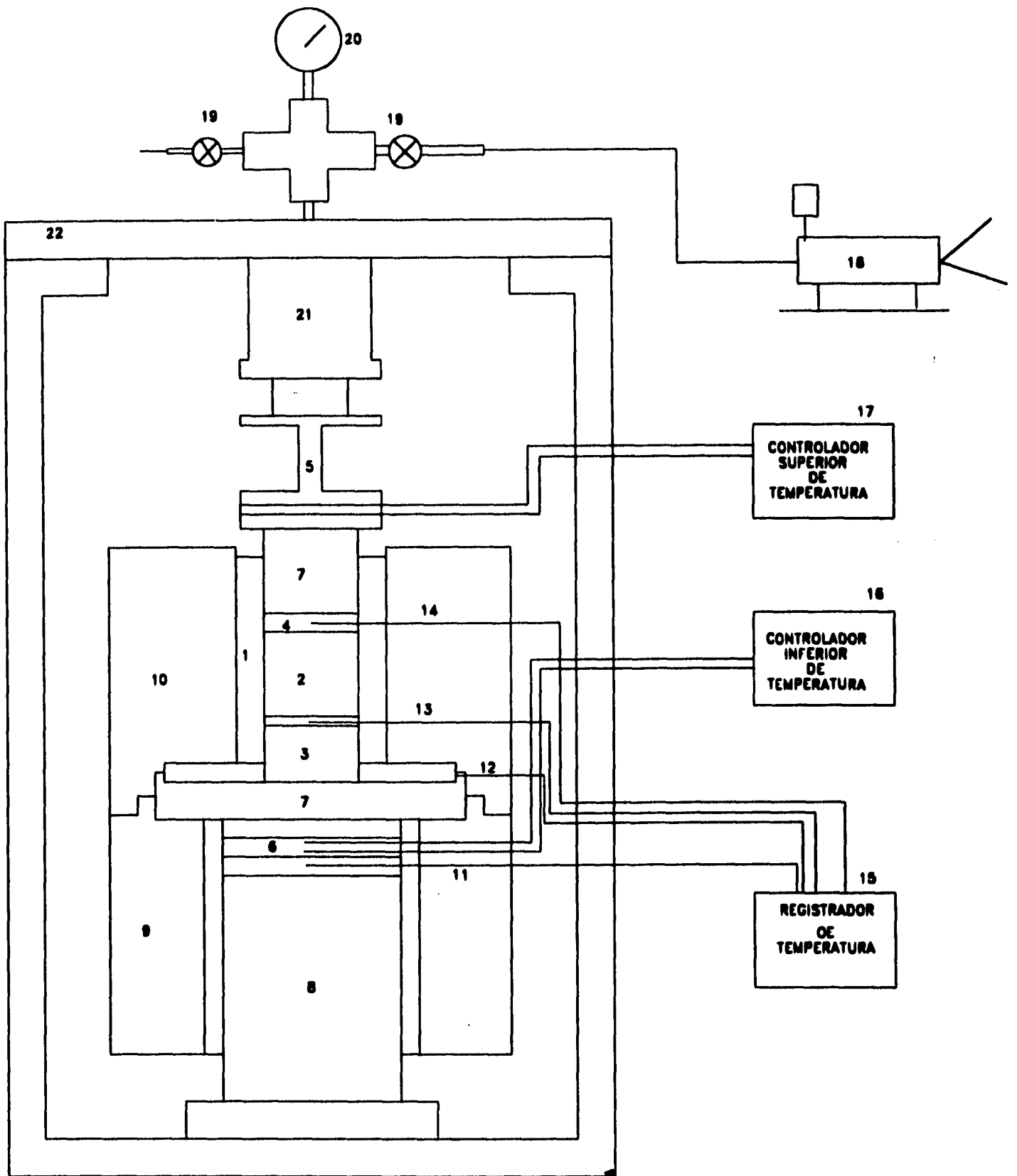


Fig. IV.2 Esquema de la instalación

IV.3.2 SISTEMA DE CONTROL Y REGISTRO DE TEMPERATURA

El sistema de control se basa en el funcionamiento de un circuito electrónico transistorizado tipo puente de Wheatstone y en el de una válvula electrónica llamada tiristor.

Los elementos del sistema de control y registro de temperatura se describen a continuación:

- 11,12,13 y 14.- Termopares hierro-constante tipo J. Para medir temperaturas de hasta 300°C.**
- 15.- Graficador Speedomax W Leeds and Northrup de seis canales, con un sistema automático de compensación a cero, para un rango de temperatura de 0 a 300°C y para termopares tipo J; al registro se hace en una gráfica de temperatura contra tiempo.**
- 16.- Controlador inferior de temperatura, controla con una variación de 0.3°C en el rango de temperaturas de trabajo y está constituido por un circuito transistorizado.**
- 17.- Controlador superior de temperatura, similar al anterior.**

IV.3.3 SISTEMA DE PRESION

Este sistema fue diseñado con la finalidad de proporcionar un buen contacto antra los elementos de la pila conductora y para disponer de cierta flexibilidad en cuanto a la presión de referencia para la medición de la conductividad térmica, a continuación se describen los elementos que constituyen a dicho sistema:

- 18.- Bombe para suministrar presión hidráulica.**
- 19.- Válvulas de aguja.**
- 20.- Manómetro de bourdon con rango 0 - 100 kg/cm².**
- 21.- Pistón de acero al carbón, accionado hidráulicamente, para proporcionar presión axial y lograr un buen contacto entre los discos de cobre y los núcleos de acero y roca.**
- 22.- Marco de acero, para proporcionar un apoyo rígido al pistón al aplicar la presión, y al sistema en general.**

IV.3.4 PROCEDIMIENTO DE CALCULO

El cálculo consiste en igualar y resolver para la conductividad térmica, las ecuaciones de flujo de calor de Fourier en condiciones de estado permanente y lineal, tanto para la muestra patrón, como para la muestra-roca en estudio.

IV.4 "MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y RESISTENCIA DE CONTACTO, DEL PAPEL Y MATERIALES DE PELICULA DELGADA"

Este artículo publicado en Ontario Canadá por D.J. Sanders y R.C. Forsyth, describe las mediciones de la conductividad térmica y la resistencia de contacto del papel y otros materiales de películas delgadas, el equipo de medición contiene un pistón hidráulico para aplicar presiones arriba de 117 bar (1700 psi) a la muestra, la cual está situada entre las superficies de unas berras de bronce.

IV.4.1 METODO EXPERIMENTAL

La medición de la conductividad térmica se determina por la técnica de estado estable. Se suministra una cantidad de calor conocida que fluye a través de una muestra de geometría conocida y se mide la diferencia de temperaturas (ΔT) que se da en la superficie superior a inferior de la misma; el sistema proporciona simultáneamente calor y enfriamiento, así lo cual, la temperatura promedio de la muestra puede ser mantenida en la cámara contenedora del sistema.

Una muestra de papel en forma de disco se coloca entre dos superficies pulidas de unas columnas de bronce, ver figure VI.3; el calor se suministra por la parte superior por medio de un calentador eléctrico y simultáneamente se enfría por medio de la columna inferior en la cual circula agua. Las columnas de bronce están aisladas con camisas de fibra de vidrio para evitar que el calor fluya lateralmente por estas paredes.

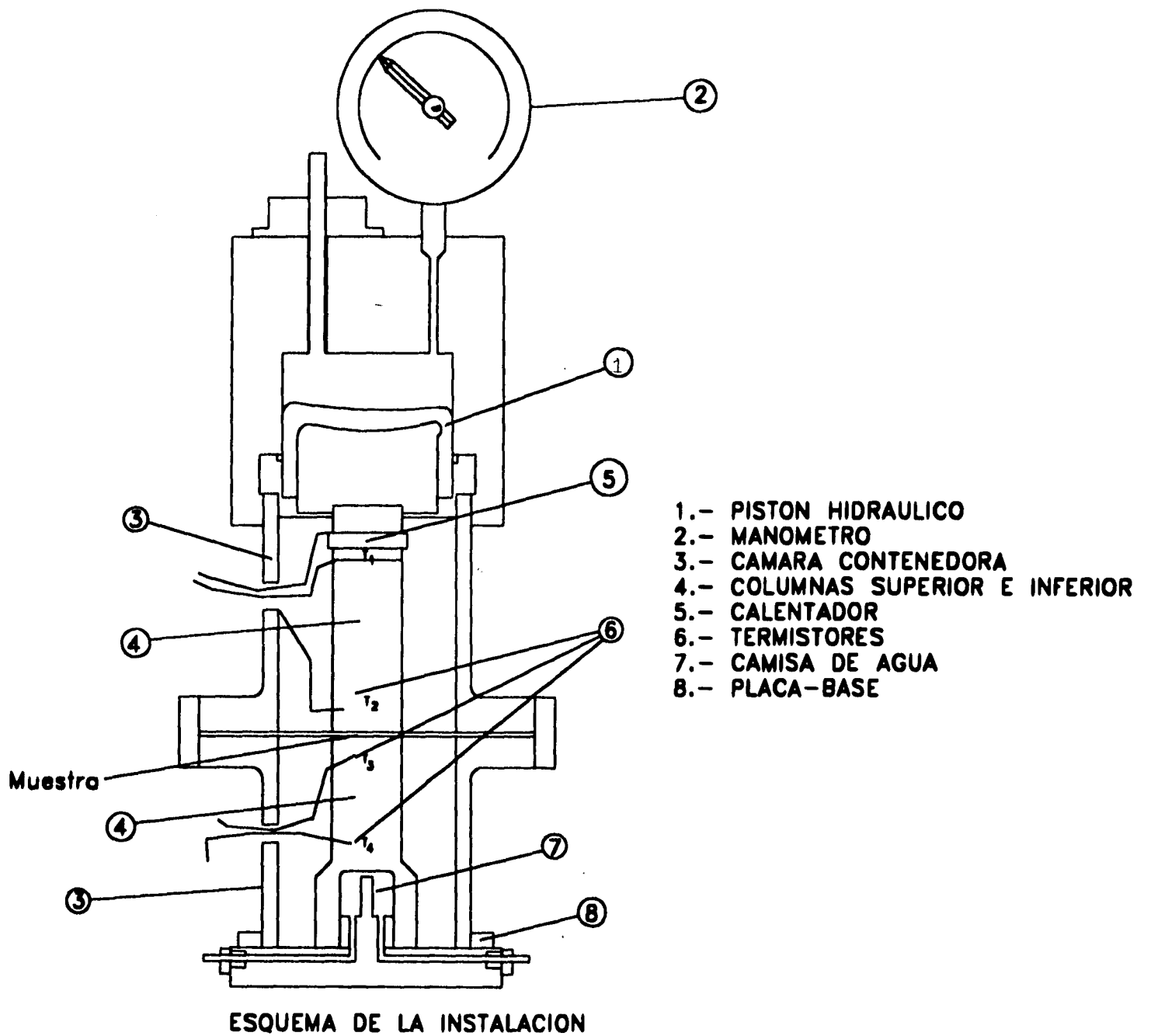


Fig. IV.3 Esquema de la instalación

IV.4.2 METODOLOGIA DE CALCULO

Una vez compactada la muestra entre las dos columnas de bronce y circular calor a través de esto, conjuntamente operando el sistema de enfriamiento en la parte inferior del sistema, se obtiene una caída de temperaturas. El calor Q fluyendo hacia abajo es determinado del voltaje aplicado y de las mediciones de corriente.

La conductividad térmica puede ser expresada como:

$$k_B = \left(\frac{L}{A} \right) Q / \Delta T$$

donde:

k_B = Conductividad de las columnas de bronce

$$= 120 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right) \pm 10\%$$

L = Longitud entre termistores.

A = Area de la sección transversal de la columna.

Q = Calor aplicado.

ΔT = Diferencia de temperaturas, determinadas en los termistores (ΔT_{12} y ΔT_{34}).

Los termistores T_2 y T_3 están a cada 0.5 cm de cada superficie de las columnas de bronce. Por lo tanto, por extrapolación las temperaturas de las superficies calientes (T_H) y fría (T_c) son:

$$T_H = T_2 \cdot 0.1 \Delta T_{12} \quad y \quad T_c = T_3 \cdot 0.1 \Delta T_{34}$$

respectivamente.

Para la muestra de papel entre las dos superficies su conductividad térmica esta dada por:

$$k = \left(\frac{t}{A} \right) Q / \Delta T$$

donde:

t = espesor del papel.

$\Delta T = T_H - T_c =$ caída total de temperatura entre las superficies del bronce.

Para la muestra de papel entre las dos superficies su conductividad térmica esta dada por:

$$k = \left(\frac{t}{A} \right) Q / \Delta T$$

donde:

t = espesor del papel.

$\Delta T = T_H - T_c =$ caída total de temperatura entre las superficies del bronce.

V. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ALTERNATIVA SELECCIONADA

V.1 INTRODUCCION

Por la gran transferencia de calor en las líneas de conducción y de equipos de la industria y de uso en general que manejan temperaturas considerables, ocurren pérdidas de energía hacia el medio ambiente que se traducen en altos costos. La utilización de apropiados aislantes térmicos se hace necesario para reducir fugas o ganancias de calor; es por ello que este trabajo establece un sistema de medición de la conductividad térmica, permitiendo determinar o verificar lo especificado por los fabricantes de aislantes.

El proyecto consiste en diseñar y construir un medidor de la conductividad térmica de aislantes térmicos; en base al análisis de alternativas ya descritos en el tema anterior, se determinó el diseño que permitiera un mínimo costo de operación y una simplicidad en su manejo.

El método base utilizado para determinar la conductividad térmica de los aislantes, es el considerar un estado estable en el proceso de medición; a través de una fuente calorífica que proporcione una cantidad de calor a un aislante de prueba de geometría dada, sujeta a una diferencia de temperaturas, aplicando la ley de Fourier puede ser calculada su conductividad térmica, teniendo como referencia el mismo calor que se transfiere a través de un material de conductividad térmica conocida (material patrón).

V.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

A través de una investigación en el mercado, se puede comprobar que no se cuenta con un aparato de fabricación nacional que mide la conductividad térmica de los aislantes, ya que la mayoría de los fabricantes no cuentan con equipo para comprobar el "k" que ellos muestran en sus catálogos publicitarios; por lo que el diseño y construcción del aparato permitirá medir la conductividad térmica de los aislantes en un rango de temperatura de 0 a 550°C, rango seleccionado en base a las temperaturas de operación de la mayoría de los aislantes nacionales (Fig. V.1).

V.3 FASES EN EL DISEÑO DEL MEDIDOR

Primeramente se llevó a cabo una búsqueda extensa para conocer diferentes modos de medir la conductividad

térmica, además de identificar los aislantes térmicos de mayor demanda hechos en México, sus propiedades físicas más importantes, y su relación con las normas nacionales.

De esta manera, se requirió un análisis de las alternativas para seleccionar el diseño que permita un mínimo costo de operación y una simplicidad en su manejo, no olvidando la característica estética del mismo.

Para el diseño seleccionado, se calculó a la condición crítica con dos aislantes tanto de máxima como de mínima conductividad, a fin de seleccionar los componentes del medidor, tomando en cuenta el tener una instrumentación en nuestro sistema para la medición y control de las temperaturas, además de una protección para evitar las pérdidas de calor por convección; que permita llevar a cabo las pruebas de calibración y propiamente la determinación de la conductividad térmica de los diferentes aislantes.

Finalmente con el aparato construido, se obtendrán las curvas de conductividad térmica en función de la temperatura que permitirán su comparación con las curvas de los fabricantes logrando apoyar técnicamente tanto al usuario como a los mismos fabricantes de aislantes térmicos, redundando así en beneficio del ahorro de energía.

V.4 CRITERIOS BASICOS DEL DISEÑO

De los diferentes alternativas de desarrollo para una mejor selección intervinieron los siguientes conceptos más importantes:

- Tipo de flujo de calor.*
- Tipo de fuente de energía.*
- Rango de temperatura de operación.*
- Equipo de medición de temperatura.*

V.4.1 TIPO DE FLUJO DE CALOR

En la determinación del flujo de calor para la medición de la conductividad térmica se consideró estado estable, esto es, conociendo una cantidad de calor que fluye a través del aislante de prueba o muestra y por su geometría conocida, la conductividad puede ser calculada de las mediciones del diferencial de temperatura (ΔT) que se crea a través de dicho muestra, por lo que en el registro de temperaturas correspondientes a la

medición (T_1 , T_2 , T_3) no se observe cambio alguno respecto al tiempo, es decir, que las curvas de temperatura contra tiempo se estabilicen hasta ser paralelas.

La cara superior de la resistencia eléctrica proporcionará el flujo de calor en esa dirección, ya que en las caras laterales y en la inferior estará limitado por un aislante térmico que impedirá la fuga de calor por esos lados, por lo que el cálculo del flujo de calor se reduce a aproximarlo a un análisis unidimensional debido al diseño de construcción. La ecuación diferencial de la transferencia de calor se reduce a la ley de Fourier:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

V.4.2 TIPO DE FUENTE DE ENERGIA

La fuente de energía se determinó considerando la mejor forma de controlarla, por la facilidad de su manejo y su disponibilidad; se analizó la posibilidad de que la fuente de energía fuera el VAPOR, el cual se dispone en el Laboratorio de Máquinas Térmicas, para tratar de aprovechar los recursos de que dispone el Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental de la Facultad de Ingeniería; pero para evitar problemas de dependencia ya que su manejo se efectúa en horas hábiles de martes a sábados por el uso que se le da en las prácticas del laboratorio, además de evitar una infraestructura física más complicada como lo son las líneas de vapor y el aislamiento de ellas, se descartó esta posibilidad.

La otra alternativa era el uso de la energía ELECTRICA analizándose que ésta no ofrece dependencia an su uso respecto a otros equipos o procesos del departamento, contándose además con conexiones trifásicas que permiten alcanzar las temperaturas requeridas, por lo que su fácil instalación y adaptación al diseño de construcción se seleccionó el uso de una RESISTENCIA ELECTRICA como fuente de energía.

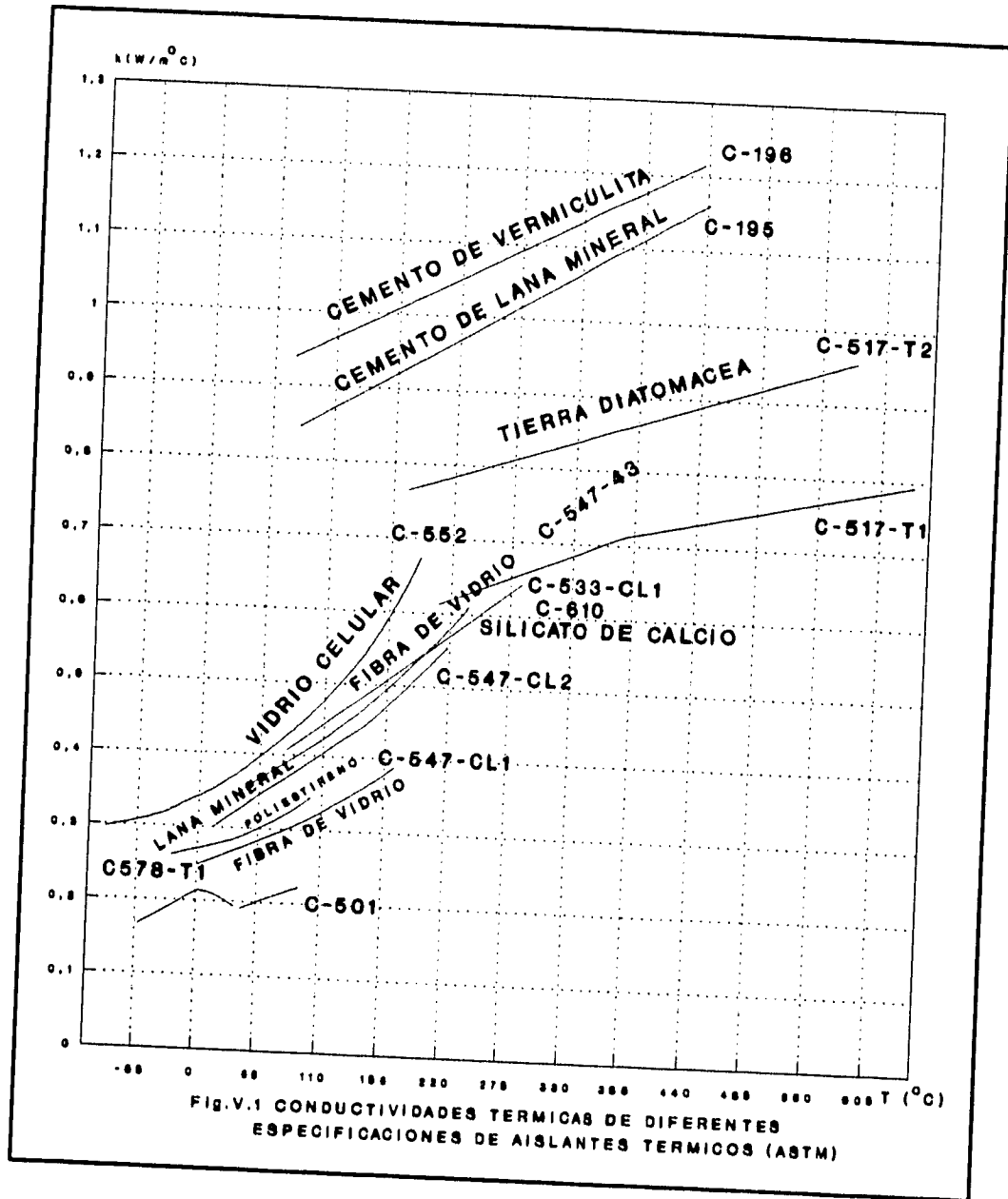
V.4.3 RANGO DE TEMPERATURA DE OPERACION

En la selección de la temperatura máxima de trabajo para la fuente de calor se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Para tener un conocimiento del rango de temperatura de servicio en que operan los aislantes térmicos se investigaron las normas que rigen su fabricación en México: Normas mexicanas, ya mencionadas en el tema II.4, mismas que están basadas de entre las principales normas ASTM descritas en la figura V.1. De éstas, la norma "Aislamiento térmico para alta temperatura" de PEMEX (2-616-01), especifica un rango de

temperatura de servicio de 35°C como mínimo y 1040 °C como máximo para la fabricación de materiales termoaislantes (fig. V.2), la cual es aceptable en el mercado nacional. Considerando lo anterior para el diseño y funcionamiento de la resistencia eléctrica en nuestro sistema, se consultaron a varios fabricantes que pudieran garantizar que la fuente de calor suministrará una temperatura dentro de dicho rango.

Para el diseño del medidor de conductividad térmica se optó por un rango de temperatura media de operación en los aislantes de 0 a 550°C, ya que la producción nacional de aislantes que aunque maneja rangos mayores, la frecuencia del uso de éstos en su operación es muy similar a dicha media.



NORMA 2-616-01 DE PETROLEOS MEXICANOS.

PRESENTACION COMERCIAL: BLOQUES, MEDIAS CAÑAS Y PLACAS.

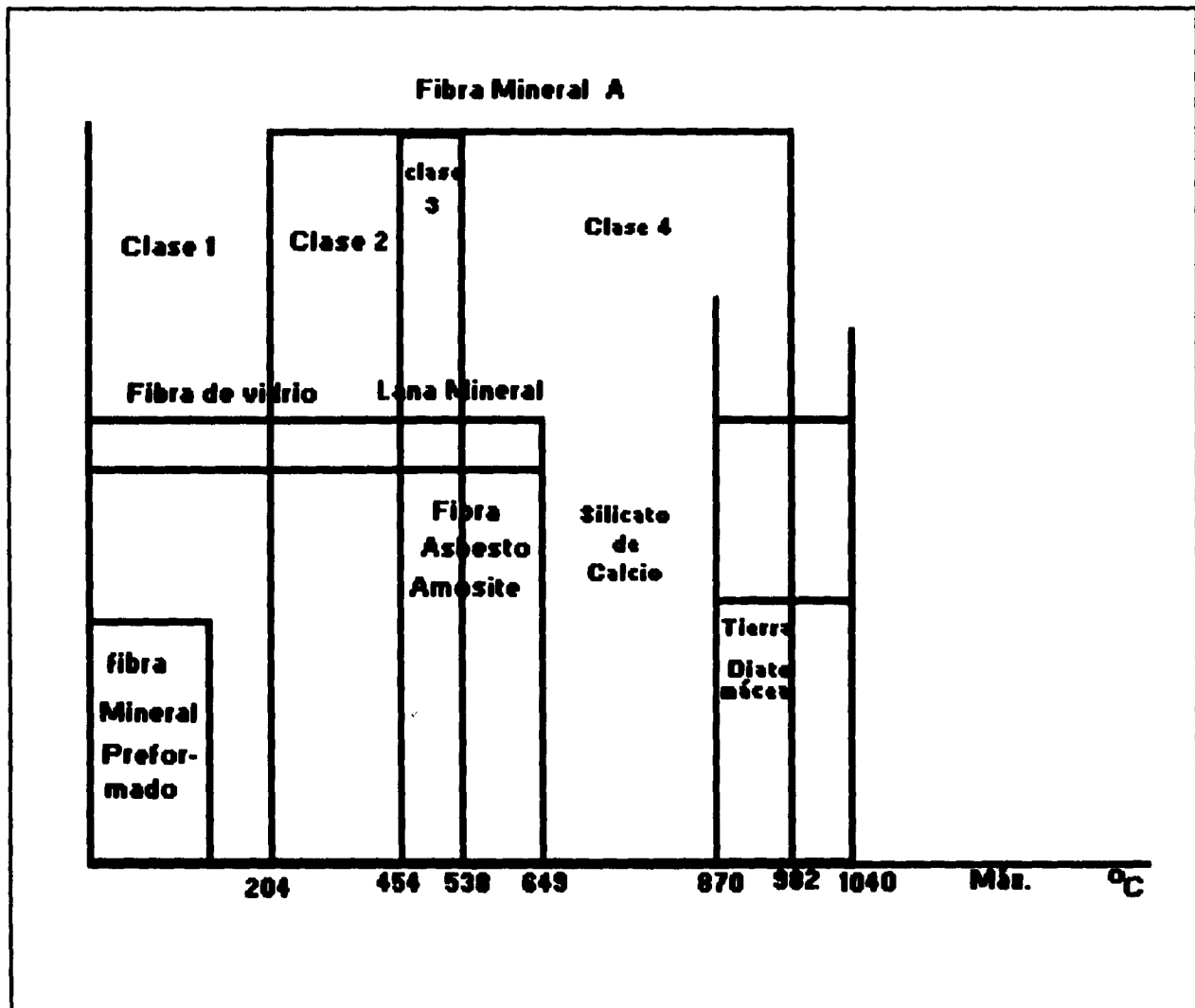


Fig. V.2 RANGO DE TEMPERATURA DE OPERACION - AISLAMIENTOS TERMICOS

V.4.4 EQUIPO DE MEDICION DE TEMPERATURA

Para efectuar las mediciones de temperatura se trató de aprovechar el equipo existente en el laboratorio del Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental, pero debido al uso continuo que se le da en otros proyectos y prácticas que se desarrollan, se desechó esta posibilidad, por lo que en función de la disponibilidad de un presupuesto para el proyecto, se trató de emplear un equipo de medición propio.

Nota: Debido a que el equipo de medición adquirido estuvo incompleto, provisionalmente se tuvo que emplear el del laboratorio, y posteriormente una vez complementado se integrará al diseño.

V.5 CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL AISLANTE BAJO PRUEBA

Al operar el sistema de medición de conductividad térmica se requiere el acomodo de termopares alineados verticalmente, para la determinación de temperaturas donde así se considera el mismo flujo de calor generado por la resistencia eléctrica; dado al estado permanente unidimensional se aplica la ley de Fourier y se calcula la conductividad de prueba a partir de conocer la conductividad de un material patrón:

$$q = -k_p A_p \frac{\Delta T_p}{L_p}$$

donde:

q = Flujo de calor.

k_p = Conductividad térmica del material patrón.

A_p = Area de la sección transversal del material patrón.

ΔT_p = Diferencial de temperatura del material patrón.

L_p = Espesor del material patrón.

y por otra parte:

$$q = -k_m A_m \frac{\Delta T_m}{L_m}$$

donde:

k_m , A_m , ΔT_m y L_m mismos valores que los anteriormente descritos, pero para el aislante-prueba.

Si:

$A_m = A_p$, e igualamos las dos ecuaciones anteriores, tenemos:

$$k_m = k_p \frac{\Delta T_p}{\Delta T_m} \frac{L_m}{L_p}$$

ec. V.1

V.6 COMPONENTES DEL EQUIPO DE MEDICION

En base a las consideraciones ya mencionadas, se determinó que el equipo estuviera constituido por los siguientes elementos que se muestran en la fig. V.3; los cuales se describen a continuación:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1.- Pistón hidráulico. | 7.- Cámara contenedora del sistema. |
| 2.- Resistencia eléctrica. | 8.- Selector de canales. |
| 3.- Referencia patrón. | 9.- Registrador de temperatura. |
| 4.- Aislante de prueba. | 10.- Regulador de temperatura. |
| 5.- Disipador de calor. | 11.- Bobina del regulador de temperatura. |
| 6.- Cámara aislante. | |

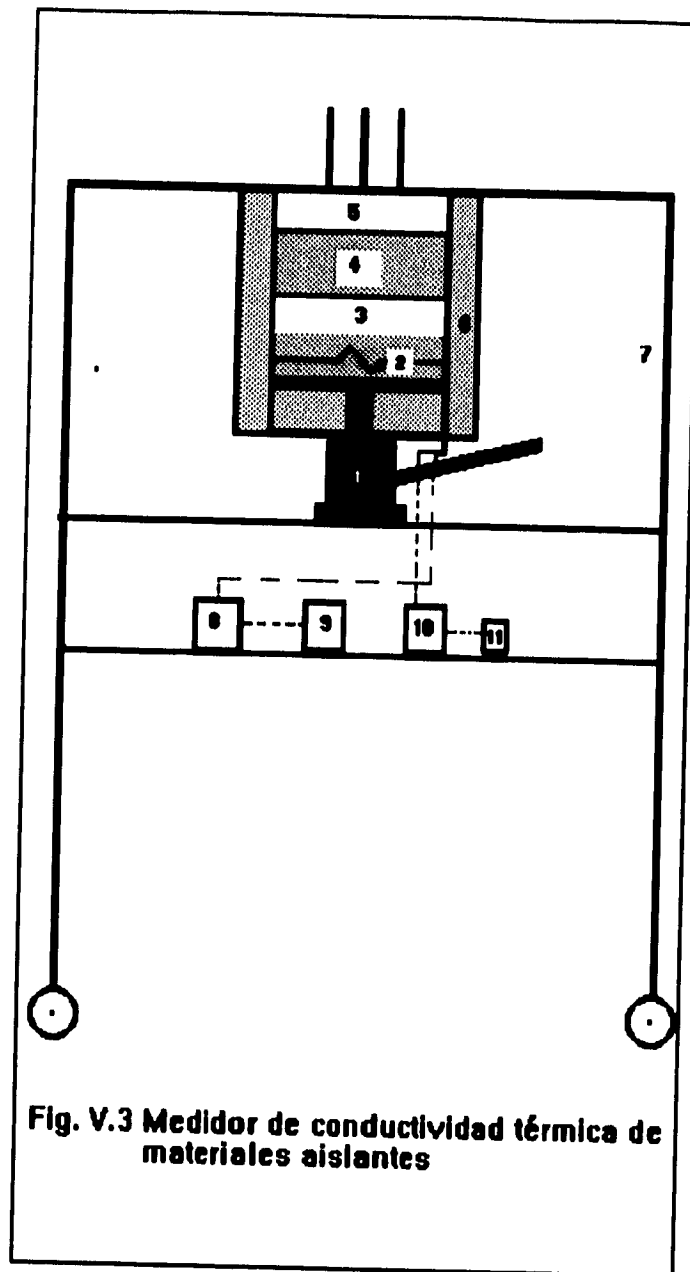


Fig. V.3 Medidor de conductividad térmica de materiales aislantes

1.- PISTON HIDRAULICO.-

La función de éste elemento es proporcionar la presión que permita comprimir el conjunto, a fin de reducir la resistencia de contacto producida por aire existente entre las superficies de los elementos del sistema de medición (resistencia, aislante de prueba, referencia patrón, etc.) que pueda alterar los resultados. El pistón hidráulico marca Mikel's, tipo botalla es de 1/2 ton. de capacidad.

En la parte superior, unida a la cabeza del pistón hidráulico va colocada una placa de acero convencional que permita uniformizar a toda el área el esfuerzo que proporciona el pistón para evitar una carga puntual y posibles deformaciones, logrando un contacto homogéneo con la siguiente superficie; sus dimensiones son: 20 x 20 x 0.5 cm.

2. RESISTENCIA ELECTRICA.

Es la fuente de calor que tiene la finalidad de proporcionar la energía requerida para alcanzar hasta temperaturas de 550 °C en la cara superior de la misma, considerando la caída de temperatura en el acero para cumplir con el rango de operación definido en la medición de la conductividad de los aislantes a prueba, la potencia es de 1500 W con entrada trifásica y 220V, está encamisada en placas de acero para resistir una presión axial máxima de 3.75 kg/cm², tipo plana, interiormente se encuentra encapsulada en cerámica con resistencia tipo bobina aislada en fibra de vidrio en su cara inferior y caras laterales, lo cual permite que su flujo principal sea dirigido en un sólo sentido.

Dimensiones: Área cuadrada, teniendo por lado 20 cm, y un espesor de 5 cm.

3. REFERENCIA PATRON.

Inicialmente se experimentó como material de referencia-patrón al acero inoxidable 304, debido a la estabilidad y homogeneidad de sus propiedades físicas al operar en rangos de temperatura elevado, a la vez de su fácil adquisición en el mercado nacional e identificación de sus principales propiedades:

TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m°C)
0	13.48
100	16.27
300	18.83
500	21.46
PESO ESPECIFICO (kg/m³)	8027
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg°C)	0.12

En la selección del espesor de la referencia-patrón, una vez ya identificadas sus características, se procedió

a efectuar los cálculos correspondientes para diferentes caídas de temperatura en ella: $\Delta T=10$, $\Delta T=20$, $\Delta T=30$ grados centígrados (ver anexo B.1), y cuyos resultados se describen a continuación:

ΔT ($^{\circ}C$)	L (ESPESOR, cm)
10	0.70
20	1.40
28	1.96
30	2.10

Utilizando la ecuación de Fourier de transferencia de calor por conducción y considerando un 20% de pérdida de calor de la resistencia eléctrica, vemos en el cuadro anterior que mientras la ΔT sea menor, el espesor de la placa también será menor.

De los cálculos obtenidos resulta seleccionada una $\Delta T = 28^{\circ}C$ dada la facilidad de ser detectable en el aparato de medición; consecuentemente se adquiere comercialmente una placa de acero de 1.9 cm (3/4").

Las dimensiones de área de la placa de acero son iguales a las de la resistencia eléctrica, para que la conducción de calor sea uniforme en su superficie, quedando lo siguiente:

Dimensiones: Área cuadrada de 20 cm por lado, con un espesor de 1.9 cm (3/4").

Peso: 6.95 kg.

4. AISLANTE DE PRUEBA.

Los aislantes a examinar se obtendrán del mercado nacional, los cuales serán sometidos a prueba en el aparato para determinar su conductividad térmica.

Dimensiones: Área cuadrada de 20 cm por lado y con un espesor (L) que variará entre 1.27 cm (1/2") e 10.16 cm (4").

5. FUENTE DE DISIPACION DE CALOR.

Para la selección de la fuente de disipación de calor, se analizaron varios metales de entre los cuales se mencionan los de mayor conductividad térmica y son los siguientes:

Plata: $k = 418 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Cobre: $k = 387 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Oro: $k = 292 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Aluminio: $k = 230 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Tanto por sus características físicas, bajo costo y fácil adquisición en el mercado, se analizó el cobre y el aluminio. Posteriormente para poder determinar cual de los dos metales se seleccionaba, y de acuerdo a la tabla V.1 se efectuaron los cálculos de disipación de calor en la cara exterior de la fuente de disipación: aluminio o cobre (ver anexo B.2). Comprobándose en base a los cálculos obtenidos (ver tabla V.2) que en ambos metales el calor generado desde la resistencia eléctrica (temperatura de operación) hasta la cara exterior del disipador es el mismo, y en la temperatura exterior de la fuente de disipación resultaron similares.

Por otro lado dado el menor precio y mejor disponibilidad del aluminio en el mercado, respecto al cobre, se seleccionó el primero como fuente de disipación del sistema.

Una vez elegido el aluminio como la fuente de disipación, se efectuaron los cálculos (ver anexo B.3) para seleccionar el espesor óptimo, mostrándose los resultados en la tabla V.3, donde se aprecia un espesor de .0254 m (1") como el óptimo, ya que no existe una variación notable del calor total y de la temperatura exterior obtenida con respecto a los otros espesores que complementan la tabla, además del costo reducido que representa por mínimo espesor comercial.

TABLA V.1 CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES AISLANTES TERMICOS EN EL MERCADO NACIONAL

ESPECIFICACION DEL PRODUCTO	CONDUCTIVIDAD TERMICA k(W/m°C)	TEMPERATURA DE OPERACION (°C)	DENSIDAD (Kg/m³)
FIBRA BLANCA (F.VIDRIO)			
RW - 4100	.0396	538	16
RW - 4150	.036	538	24
RW - 4200	.0338	538	32
RW - 4300	.033	538	48
AISLAMIENTO TERMOACUSTICO			
H T 22	.033	538	40
H T 23	.034	538	32
COLCHONETA ARMADA			
RW - 4300	.032	538	48
RW - 4600	.033	538	96
AISLAMIENTO PREFORMADO P/TUBERIAS			
VITROFORM 85A R F - 3000	.0323	MAX 454, MIN -84	80
AISLAMIENTO FLEXIBLE			
RF - 3075	.042	MAX 232, MIN -84	12
RF - 3100	.0387	MAX 232, MIN -84	16
RF - 3150	.0338	MAX 232, MIN -84	24

TABLA V.1 CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES AISLANTES TERMICOS EN EL MERCADO NACIONAL
(Continuación)

ESPECIFICACION DEL PRODUCTO	CONDUCTIVIDAD TERMICA k(W/m °C)	TEMPERATURA DE OPERACION (°C)	DENSIDAD (Kg/m³)
VITROFORM 450 FIBRA DE VIDRIO	.0323	MAX 232, MIN -84	80
AISLHOGAR			
RF - 4000, RF - 7000	.0460	232	10.9
A. RIGIDOS Y SEMIRIGIDOS			
RF - 4100	.0396	232	16
RF - 4150	.0306	232	24
RF - 4200	.0338	232	32
RF - 7400	.035	232	64
RF - 7600	.032	232	96
A. FLEXIBLE RF - 3000			
RF - 3075	.042	MAX 232, MIN -84	12
RF - 3100	.0387	MAX 232, MIN -84	16
RF - 3150	.0338	MAX 232, MIN -84	24
ESPUMA DE POLIURETANO	.0215	116	
ESPUMA DE POLIESTIRENO	.0314	70	

AISLANTE	CONDUCTIVIDAD $k(W/m^{\circ}C)$	ESPESOR $L (m)$	TEMP. DE OPERACION $(^{\circ}C)$	FUENTE DE DISIPACION			
				ALUMINIO (ESPESOR .0254 m)		COBRE (ESPESOR .0254 m)	
				CALOR TOTAL $q(W)$	TEMP. T_s $(^{\circ}C)$	CALOR TOTAL $q(W)$	TEMP. T_s $(^{\circ}C)$
AISLHOGAR	.0460	.0127 (1/2")	232	60.46	131	60.47	131
	(MAXIMA)	.1016 (4")	232	8.99	53	8.99	53
COLCHONETA ARMADA	.032	.0127	538	44.52	107	44.53	107
		.1016	538	6.30	50	6.30	50
ESPUMA DE POLIURETANO	.0215	.0127	116	31.30	87	31.30	87
	(MINIMA)	.1016	116	4.26	47	4.26	47

TABLA V.2

Selección del espesor óptimo de la fuente de disipación (ALUMINIO) a condiciones críticas (considerando aislantes con conductividad térmica máxima y mínima representadas en la tabla V.1) del material aislante a prueba:

<u>ESPESOR</u> <u>L (m)</u>	<u>CALOR TOTAL DISIPADO</u> <u>q(W)</u>	<u>TEMPERATURA EXTERIOR</u> <u>T_e (°C)</u>
.0254 (1")	60.46	131.33
.0508 (2")	60.44	131.30
.0762 (3")	60.42	131.27
.1016 (4")	60.40	131.24

TABLA V.3

Diseño de las aletas.- Una vez seleccionadas las características de la fuente de disipación de calor (sumidero), nos encontramos en la necesidad de disipar la mayor cantidad de energía hacia el exterior, para ello se determinó el cálculo de aletas y su disipación (ver anexo B.4).

De los cálculos obtenidos tanto para aletas circulares como aletas cuadradas se observa una mejor disipación de calor en estas últimas. Considerando para este cálculo a tres aislantes con diferentes conductividades térmicas (máxima, media y mínima) tomadas de la tabla V.1 que permiten visualizar la mayor transferencia de calor en el proceso de selección, según se observe en los resultados descritos en las tablas V.4 y V.5.

El resumen de dichos cálculos aporta los siguientes resultados:

Aletas: de aluminio cuadradas.

Espesor: .001587 m (1/16").

Altura: 20 cm.

Longitud: 20 cm.

	AISLHOGAR		COLCHONETA ARMADA RW - 4300		ESPUMA DE POLIURETANO	
ESPEJOR DEL AISLANTE, L (m)=	.0127	.1016	.0127	.1016	.0127	.1016
DIAMETRO DE ALETA (D):	CALOR POR ALETA, q (W/ALETA)					
D = .00158 m (1/16")	.45	.06	.33	.05	.23	.03
D = .00476 m (3/16")	1.36	.19	1.00	.15	.70	.10
D = .00635 m (1/4")	3.09	.44	2.28	.34	1.60	.24
D = .0079 m (5/16")	4.00	.57	2.95	.44	2.07	.31
	TEMPERATURA EN LA ALETA CIRCULAR T(°C)					
D = .00158 m (1/16")	59	43	54	42	50	41
D = .00476 m (3/16")	115	51	95	48	78	46
D = .00635 m (1/4")	93	48	79	46	68	44
D = .0079 m (5/16")	98	48	83	46	70	44

TABLA V.4 ALETAS CIRCULARES DE ALUMINIO

AISLANTE	ESPEJOR L (m)	CALOR x ALETA q (W/ALETA)	TEMPERATURA EN LA ALETA RECTANGULAR T(°C)
AISLHOGAR	.0127	49.05	75
	.1016	7.01	45
COLCHONETA ARMADA RW-4300	.0127	36.11	66
	.1016	5.39	44
ESPUMA DE POLIURETANO	.0127	25.33	58
	.1016	3.77	43

**TABLA V.5 CALCULO DEL CALOR Y TEMPERATURA EN LA ALETA RECTANGULAR DE ALUMINIO CON ESPESOR DE:
t=.001587 m (1/16")**

6.- CAMARA AISLANTE.-

Formada por piezas planas unidas para formar una figura de sección cuadrada que se adapta entre sí. Su función es evitar al máximo la transferencia de calor hacia el exterior.

Se acondiciona en la parte frontal una cubierta removible, para permitir el cambio de la muestra de prueba, el material deberá cubrir el requisito de resistir el arduo manejo manual. Después de investigar entre los disponibles en el mercado, el mejor material de acuerdo a las necesidades del diseño y la posibilidad de armar de acuerdo a los requerimientos de resistencia y maniobrabilidad, se adquirieron bloques aislantes de lana mineral (SILAN 1800), fabricados a base de fibra de lana mineral granulada, cribada-prensada y moldeada al vacío con aglutinantes.

7.- CAMARA CONTENEDORA DEL SISTEMA.-

El aparato estará protegido de corrientes de aire que provocan inestabilidad en el sistema, por medio de una cámara de acrílico transparente de 4 mm de espesor que guarda al sistema; los cuatro costados laterales serán de dicho material, uno de éstos abrirá para dar acceso al sistema a fin de cambiar el material o realizar cualquier maniobra.

8.- SELECTOR DE CANALES.-

Dado de que se necesita al realizar las pruebas de la toma de por lo menos tres lecturas de temperatura a la vez, requerimos de un selector de puntos, evitando un aparato lector por cada termopar instalado. Esta función la desempeña un interruptor multicanal marca Yew, tipo 2815 con capacidad de 29 canales (del cual sólo se usarán tres), equipo conectado al registrador de temperatura el cual recibe la señal de los termopares.

9.- REGISTRADOR DE TEMPERATURA.-

Equipo que indica la temperatura de cada uno de los termopares en forma individual, proporcionando la lectura según la selección que se haga en el selector de canales. El registrador de temperaturas es un termómetro digital marca Yew, tipo 2572 con funciones para diferentes tipos de termopares (K, E, J, T, R, etc.), que tiene compensación del 0°C.

10.- REGULADOR DE TEMPERATURA.-

Marca Tamco, digital, 115 volts de operación, es la base para establecer el rango de temperaturas en que se desea someter al aislante bajo prueba, el cual consiste en suprimir y restablecer la corriente de la resistencia eléctrica en base a las señales del termopar, que se localiza en el mismo sitio que T, cuya temperatura medida será llamada temperatura de control (T).

11.- BOBINA.-

Al recibir la señal del regulador, ésta se magnetiza y conecta las entradas de la resistencia eléctrica a la corriente, cuando el regulador corta la señal por exceder la temperatura límite pre-establecida, la bobina suspende el paso de corriente a la resistencia. La bobina es marca Schrack de 110 V y 10 A.

VI. CALIBRACION DEL MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

VI.1 MEDICION DE LA TEMPERATURA

Al diseñar el sistema de medición de la conductividad térmica se consideró un flujo unidimensional para que los termopares se localizarán puntualmente sobre una línea vertical considerando el flujo de calor en estado permanente. Aplicando la ley de Fourier y calculando la conductividad del aislante bajo prueba a partir de conocer la conductividad de un material patrón, se tiene la ecuación V.1:

$$k_m = k_p \frac{\Delta T_p}{\Delta T_m} \frac{L_m}{L_p}$$

donde las variables ΔT_p y ΔT_m son diferenciales de temperatura de la referencia patrón y de la muestra a prueba:

$$\Delta T_p = T_2 - T_1 \quad \text{y} \quad \Delta T_m = T_3 - T_2$$

donde:

T_1 = Temperatura entre la resistencia eléctrica y la placa de la referencia patrón.

T_2 = Temperatura entre las placas de la referencia patrón y la muestra a prueba.

T_3 = Temperatura entre las placas de la muestra a prueba y el dissipador de calor (aluminio).

L_m y L_p = Espesor de la muestra y de la referencia patrón.

Antes de calibrar el equipo de medición de la conductividad térmica se efectuó lo siguiente:

- 1.- Previo a cada prueba efectuada para la determinación de la conductividad térmica de las diferentes muestras, se realizaron pruebas de calibración a los termopares adquiridos o construidos en cada caso, de la manera siguiente: en un recipiente conteniendo agua se introdujeron los termopares y éstos se conectaron al equipo de medición de temperatura, de igual manera en el mismo recipiente se introdujo un termómetro de inmersión. El recipiente se sometió a calor y se fueron registrando simultáneamente las temperaturas tanto del termómetro digital como del termómetro de inmersión, observándose diferencias de $\pm 1^\circ\text{C}$ en sus variaciones. Lo cual permite obtener confiabilidad en las mediciones de temperatura del equipo seleccionado.**
- 2.- En uno de los diferentes arreglos hechos al equipo de medición para la determinación de la**

conductividad térmica, se contempló la instalación de un ventilador para el sistema de enfriamiento (sumidero); observándose que los valores de las conductividades térmicas obtenidas sin el ventilador eran mejor, razón por la cual se desechó el uso de éste.

VI.2 CALIBRACION DEL EQUIPO

Para la calibración del equipo al obtener las curvas de conductividad térmica, se emplearon los siguientes aislantes de prueba:

- Fibra de vidrio RF - 7400
- Fibra de vidrio RF - 4200
- Lana mineral "LM"

De estos aislantes, sus propiedades proporcionadas por los fabricantes se describen en el anexo C.

Como referencia patrón se empleó el acero inoxidable 304, el cual tiene como característica principal su homogeneidad y estabilidad de sus propiedades físicas. A partir de la información de la conductividad térmica a ciertas temperaturas, obtenidas de los manuales de ingeniería para dicho acero (ver tabla VI.1) y aplicando el cálculo de aproximación funcional del método de mínimos cuadrados, se obtiene la siguiente ecuación:

$$k(T) = 14.082 + .015T$$

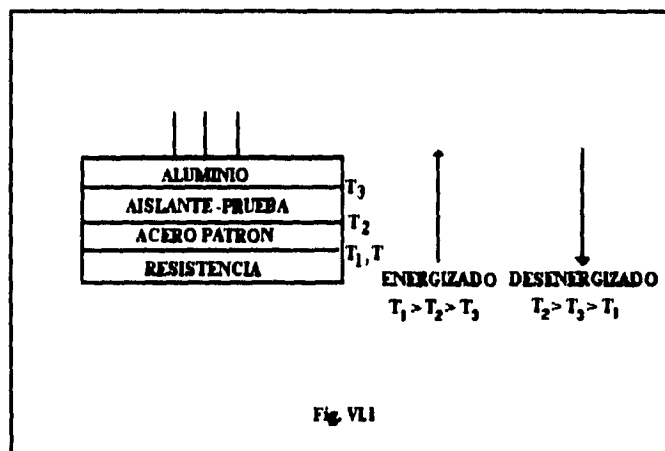
ec. VI.1

<u>T(°C)</u>	<u>k(W/m°C)</u>
0	13.48
100	16.27
300	18.83
500	21.46

TABLA VI.1

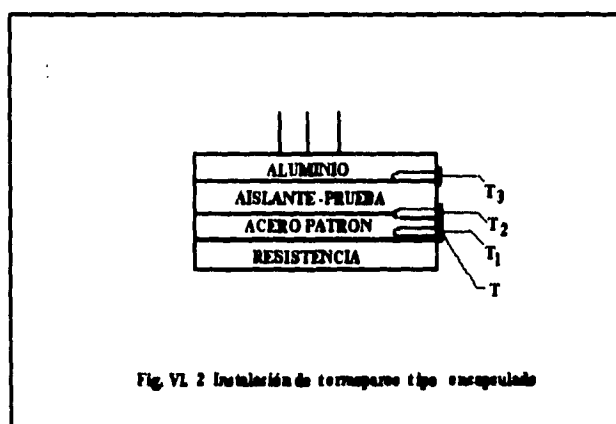
En base a la ecuación V.1 para la determinación de la conductividad térmica del material sometido a prueba, y con los datos del acero inoxidable 304, posteriormente se realizaron las pruebas respectivas con el equipo construido, encontrándose algunas dificultades técnicas tales como:

- a) *Al energizar el sistema del equipo de medición se generaba una cantidad de calor (q_p) hacia la parte superior del mismo (fig. VI.1), pero al desconectarse la corriente eléctrica al alcanzar la temperatura de control (T), y pretendiendo alcanzar la estabilidad del sistema en un tiempo dado para la toma de lecturas de las temperaturas T_1 , T_2 y T_3 , el calor se invertía hacia la parte inferior del sistema con la consecuente fuga de calor por este extremo, debido a que el aislamiento colocado en la parte inferior de la resistencia no fue suficiente. Para corregir lo anterior se reforzó la parte inferior con otro aislante, lana mineral que maneja temperaturas de operación de hasta 650°C .*



Por lo que nuevamente se procedió a realizar las mediciones y a determinar los valores de las curvas de conductividad térmica de los tres aislantes de prueba. Observándose que los resultados obtenidos fueron muy inferiores a los valores proporcionados por los fabricantes con una desviación de hasta un 88% en promedio.

- b) *Por otro lado, la instalación de termopares encapsulados tipo "J" que se encontraban directamente ensamblados entre las placas del sistema de medición (fig. VI.2), presentaron errores en la determinación de la conductividad térmica, por obtenerse seguramente temperaturas del aire atrapado entre estos termopares y las placas, y no de éstas propiamente debido a la falta de un contacto más estrecho entre sí, creándose resistencias térmicas adicionales que repercutieron negativamente en los resultados.*



VI.2.1 ALTERNATIVAS PARA LA CALIBRACION DEL EQUIPO

Dentro de las pruebas realizadas con el equipo de medición que se describen a continuación también se optó por incluir aparte de los aislantes sometidos a prueba, una segunda placa de acero inoxidable 304 como material de prueba, adquirida posteriormente, con el fin de obtener como resultado una conductividad térmica idéntica al mismo material patrón y obtener así confiabilidad en las mediciones que después nos permitieran calcular la conductividad térmica de los aislantes. De estas pruebas realizadas a la segunda placa se obtuvieron valores experimentales diferentes de los valores de la conductividad térmica del acero patrón, mostradas en la tabla VI.1. Ya que la segunda placa se examinó en el laboratorio de materiales y resultó no ser del todo idéntica, encontrándose diferencias cualitativas en el material (contenido de carbono, duraza, etc.) que repercutieron en tales resultados.

Por lo que el plantamiento se centralizó en el registro preciso de las temperaturas, para lo cual se modificó la instalación de los termopares, previa consulta y asesoramiento con personal de investigación de los Institutos de Ingeniería y Geofísica de la U.N.A.M., y con representantes técnicos de las casas comerciales involucrados en el manejo de termopares que sugirieron diferentes alternativas para mejorar los resultados; mencionando a continuación las más importantes:

- Introducir los termopares hasta la parte central de las placas, para obtener un mejor registro de la temperatura a través del sistema.*
- Entre las placas del sistema instalar láminas de cobre (cuya resistencia térmica es despreciable), conectando las puntas de los termopares a unas lengüetas de las mismas láminas. Estas láminas tienen la finalidad de buscar homogeneidad en el contacto de las superficies de los materiales, es decir, eliminar la resistencia térmica producida por el aire atrapado entre las placas.*
- Introducir micas de plástico laminadas y resistentes a la alta temperatura entre las placas del sistema y colocando los termopares entre dichas micas, evitando con lo anterior resistencias térmicas.*
- Colocar los termopares sobre capas de grasa de silicón para reducir efectos adversos en las mediciones tomadas entre las placas y los termopares, pretendiendo mejorar la exactitud en las lecturas de las temperaturas entre placas del sistema.*
- Instalar termopares de espesor pequeño (calibre 30 a 40) entre las placas y mejorar así la exactitud en las lecturas deseadas.*

Tomando en cuenta las recomendaciones anteriormente descritas, se hicieron las siguientes modificaciones en el equipo:

- 1.- Se probó primeramente la instalación de láminas de cobre puro entre las superficies de las placas, para lo cual previamente se hizo un análisis de su manejo y pérdidas de calor al emplear dichas láminas en el sistema de medición, pudiendo así seleccionar el espesor óptimo para su instalación. Los resultados de los cálculos de las pérdidas caloríficas originadas por la posibilidad de instalar estas láminas de cobre en el sistema, así como la facilidad en su manejo se describen en la siguiente tabla:*

INSTALACION DE LAMINAS DE COBRE		
ESPESOR	PERDIDAS VS. CALOR TOTAL GENERADO	MANIOBRABILIDAD
.004"(.1016mm)	.05%	MALA
.031"(.7874mm)	.386%	ACEPTABLE

En base a los anteriores resultados se optó por instalar la lámina de cobre con espesor de .031" (.7874 mm), por garantizar un mejor manejo y no representar un porcentaje significativo de pérdida (.386%) en el sistema respecto al calor suministrado por la resistencia eléctrica. Por lo que de esta manera se construyeron tres termopares tipo "K" con alambres de cromel y alumel calibre 20, que se adherieron con plastilina soldable e una lengüeta exterior de cada una de las láminas de cobre, las cuales fueron introducidas entre las placas para efectuar las mediciones correspondientes a T_1 , T_2 , y T_3 (fig. VI.3). Los resultados obtenidos en este arreglo de medición fueron poco satisfactorios, ya que se tenían desviaciones de hasta 120% al calcular las conductividades térmicas (k) de los muestras, debido posiblemente a la introducción en el sistema mismo de un elemento más en la transmisión de calor, afectando las mediciones de temperatura reales entre las placas y quizá de igual manera, a la falta de un contacto más directo entre los termopares y las placas del sistema.

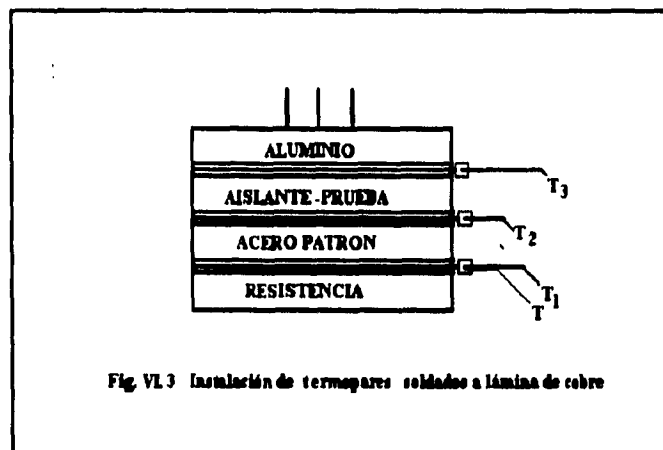


Fig. VI.3 Instalación de termopares soldados a lámina de cobre

- 2.- *Se construyeron termopares tipo "J" con alambres de hierro y constantan calibre 30, soldados mediante fusión de sus extremos con equipo de soldadura de punta eléctrica, mismos que se instalaron al centro de las caras internas de las placas del sistema, pretendiendo con ésto tener un contacto más directo con las mismas (fig. VI.4). Este tipo de instalación mejoró las temperaturas tomadas para la obtención de la conductividad térmica desconocida, teniéndose una desviación de un 60% con respecto*

a los valores presentados por los fabricantes, el resultado aunque más aceptable no es confiable, aunado a la limitante de que este tipo de cable por ser calibre 30 (muy delgado) tiene un rango de operación máximo de 350°C, además de que este tipo de instalación de termopares crea pequeños espacios de aire entre las placas a pesar del diámetro de éstos, que aunque mínimos, provocan resistencias térmicas adicionales. Cabe mencionar que se analizó que estos espacios se pudieran eliminar, barrenando las placas del acero y el aluminio, pero no se realizó hasta no agotar otras alternativas que evitaran maquinar éstas, y el riesgo de no lograr resultados satisfactorios.

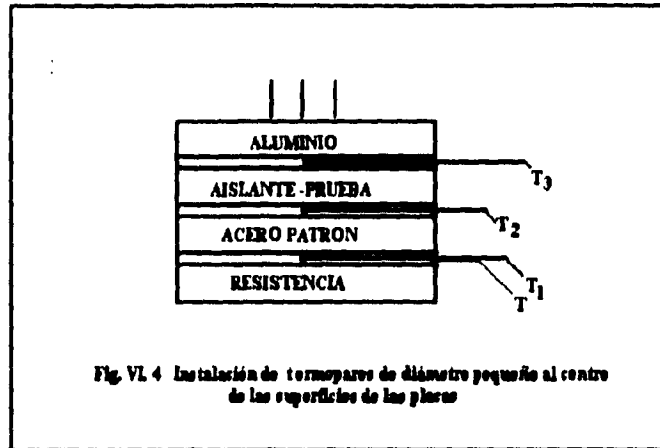


Fig. VI.4 Instalación de termopares de diámetro pequeño al centro de las superficies de las placas

3. Se modificó la instalación nuevamente, ahora construyendo e instalando termopares tipo "K" con alambres cromel (+) y alumel (-) pero en calibre 20 (mayor diámetro que en la prueba anterior) soldadas sus puntas con equipo de punta eléctrica. Así mismo, se colocaron al centro de las superficies entre las placas del sistema, las micas laminadas resistentes al calor, con el fin de separar los termopares de las placas del sistema, según el arreglo descrito en la figura VI.5. De las mediciones obtenidas con esta modificación, al determinar únicamente la conductividad térmica del acero inoxidable 304 seleccionado como prueba, los resultados fueron de un 60% de desviación respecto a los datos descritos en la tabla VI.1, debido quizá a la situación problemática descrita en el inciso anterior, al crear también espacios de aire por la instalación de los termopares entre las superficies de las placas.

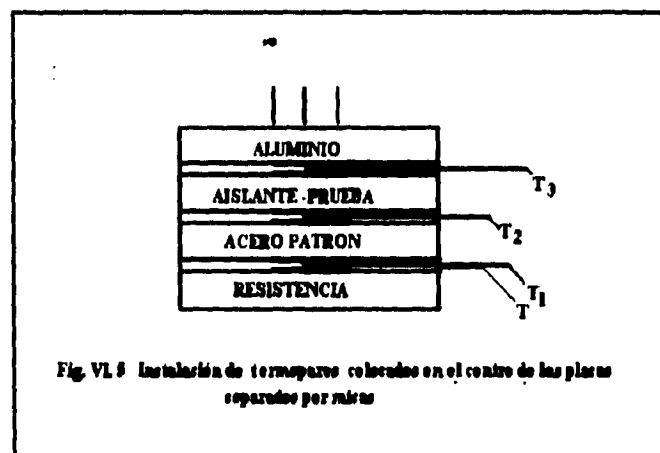
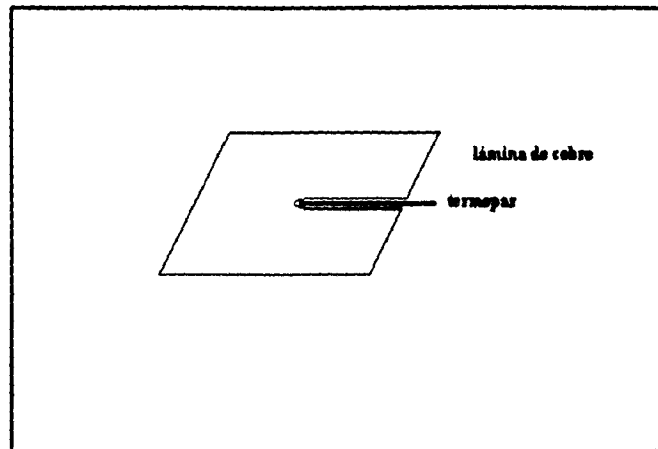


Fig. VI.5 Instalación de termopares colocados en el centro de las placas separados por micas

- 4.- Con el mismo tipo de termopares descritos en el inciso anterior, se hizo un nuevo arreglo que consistió en instalar láminas de cobre con espesor de .031" (.7874 mm) entre las placas del acero-patrón, acero-prueba y el aluminio, los termopares se colocaron en cavidades recortadas en cada lámina de cobre de acuerdo a la figura siguiente:



El objetivo de este arreglo tenía como finalidad tratar de eliminar los espacios de aire creados al instalar los termopares entre las superficies de las placas y poder reducir las resistencias térmicas ocasionadas por éstos. Sin embargo, nuevamente se obtienen desviaciones considerables en los resultados, 70% de desviación en promedio respecto a los valores de la conductividad térmica descritos en la tabla VI.1, quizá tal vez por no tener nuevamente un contacto más estrecho entre los termopares con las láminas de cobre y a su vez con las mismas placas del sistema, por lo que se descartó dicha medida.

VI.3 DETERMINACION DE LAS CURVAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS AISLANTES

De manera concluyente, al tratar de superar las dificultades en la medición real de las temperaturas entre las placas, tomando como base las observaciones y experiencias de los resultados obtenidos en las diferentes modificaciones y pruebas realizadas en el equipo de medición, se considera lo siguiente:

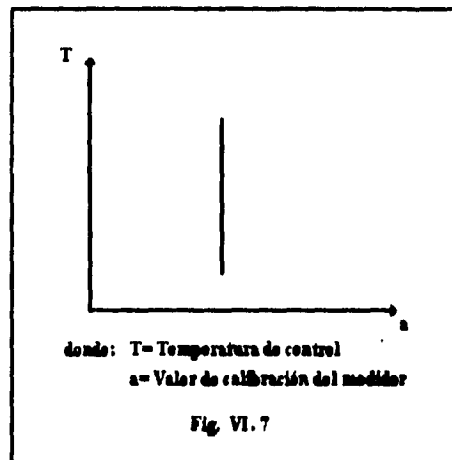
- 1.- Para evitar resistencias térmicas adicionales creadas por los espacios de aire atrapados entre las superficies de las placas del conjunto de medición, se adquirieron y se emplearon termopares "K" (CROMEL, código amarillo polaridad positiva (+) y ALUMEL, código rojo polaridad negativa (-)) del tipo extraplano con un espesor de .0005" (.0127 mm) en su área de contacto, marca Omega, mismos que se instalaron en los extremos de las placas, con los cuales mejoraron notablemente los resultados.
- 2.- Para determinar la curva de calibración se optó por un arreglo metal-aislante que dé la secuencia

lógica de $q_1 > q_2$, con pequeñas pérdidas de calor a través de las paredes laterales.

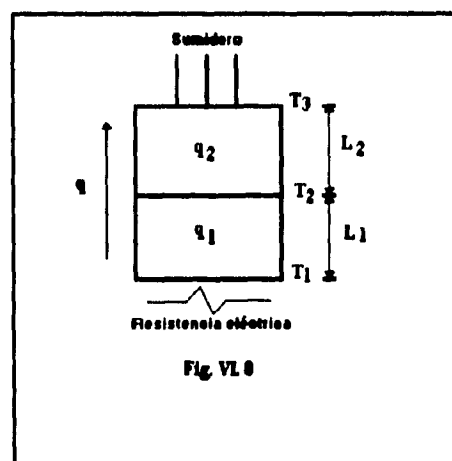
De los tres aislantes de prueba:

- a) "LM" de Lana Mineral S.A.*
- b) "RF-7400" de Vitrofibras S.A.*
- c) "RF-4200" de Vitrofibras S.A.*

Se seleccionó al de mejores características y estabilidad demostrados en las mediciones que se efectuaron a cada uno de ellos, de acuerdo a la obtención de curvas que se aproximen a la descrita en la figura VI.7.



Con lo anterior y sabiendo que $q_1 > q_2$, por las pérdidas de calor laterales y de acuerdo a la siguiente figura:



se tiene: $q_1 = a q_2$

despejando: $a = q_1 / q_2$ ec. VI.2

donde: $q_1 = q_{\text{acero patrón}} = k_1 \frac{T_1 - T_2}{L_1}$ ec. VI.3

$q_2 = q_{\text{aislante prueba}} = k_2 \frac{T_2 - T_3}{L_2}$ ec. VI.4

Para la selección del aislante se tomaron en cuenta dos aspectos:

- a) **Considerando las temperaturas T_1 y T_2 , para cada uno de los tres aislantes, se obtuvieron las temperaturas medias de cada uno: $(T_1 + T_2)/2$, mismas que se substituyeron en la ecuación para el acero inoxidable 304 (ec. VI.1) y obtener el valor de k , y a su vez de éste se determinó el valor de q , en cada uno de los diferentes valores de la temperatura de control ($T = 50^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C} \dots 300^\circ\text{C}$), ver anexo C.**
- b) **De la información de la conductividad térmica de los aislantes de prueba proporcionada por los fabricantes, y de la obtención de temperaturas T_2 y T_3 , se determinaron las temperaturas medias de cada uno: $(T_2 + T_3)/2$, mismas que se interpolaron para obtener el valor de k , y consecuentemente de igual manera se determinó el valor de q , para cada temperatura de control descritas en el inciso anterior.**

De los tres aislantes probados (cuyos resultados y cálculos se describen en el anexo C), se obtienen los valores de calibración del medidor, mismos que se graficaron respecto a las temperaturas de control. La variación mínima del valor de "a" respecto a T fue la del aislante RF - 4200 de Vitrofibras S.A.. Finalmente con los datos de las lecturas mostradas en el anexo C de esta aislante para la temperatura T_1 , y con los valores de calibración "a" de este mismo, se determinó la ecuación de la curva de calibración del sistema como $a = a(T_1)$, aplicando el cálculo de aproximación funcional del método de mínimos cuadrados:

$$a(T_1) = 81.11 \cdot 0.1168T_1$$

De lo cual se observa que el comportamiento del valor de calibración no corresponde a lo mostrado en la figura VI.7, si no que es una función de la temperatura.

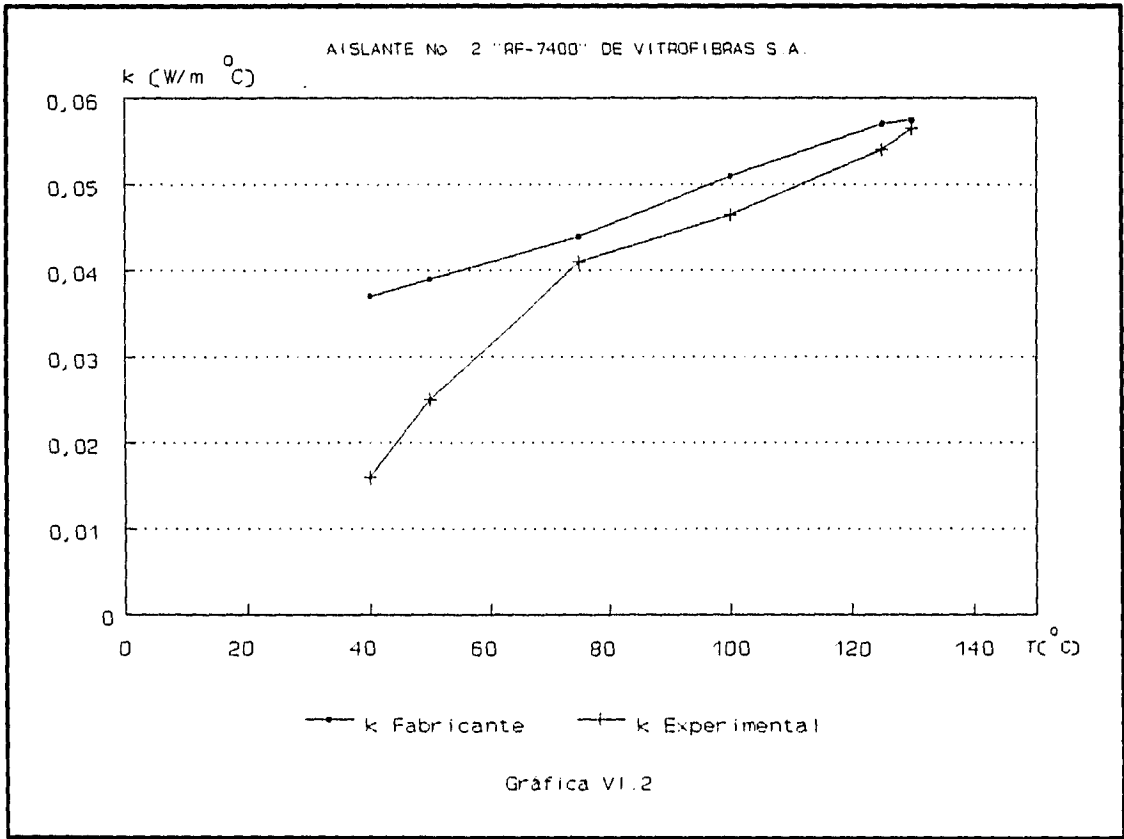
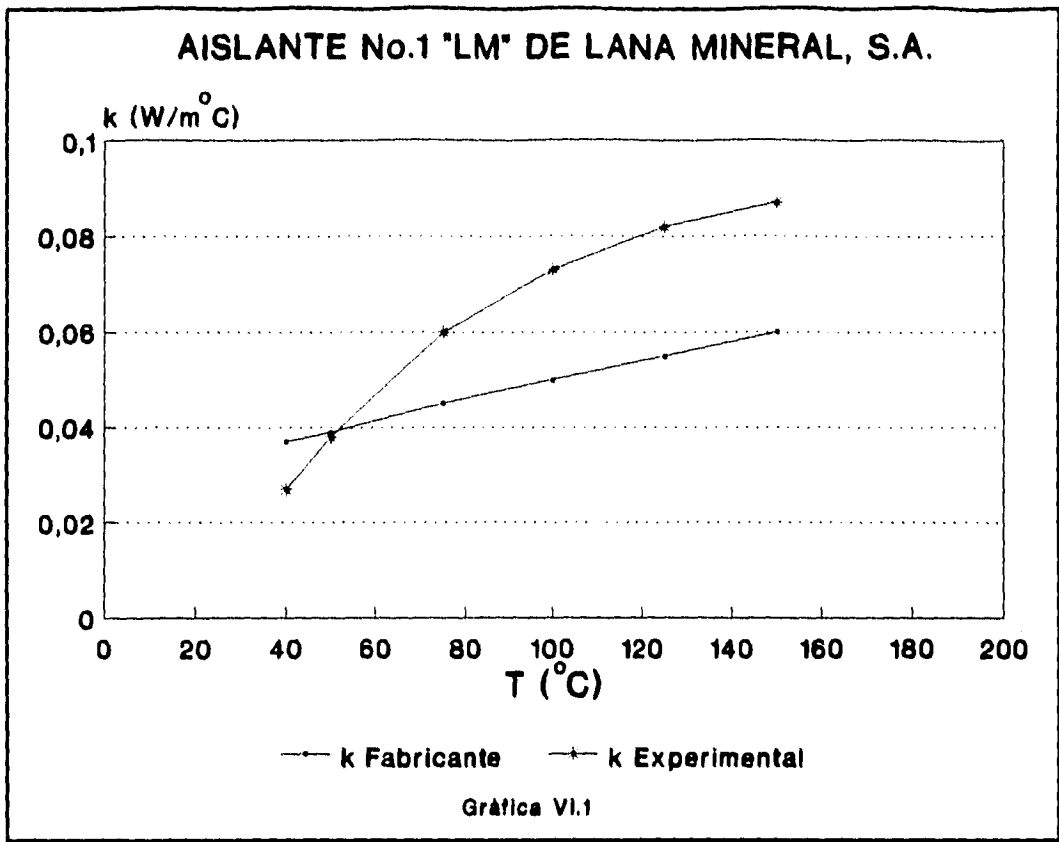
Substituyendo las ecuaciones VI.3, VI.4 y VI.5 en VI.2, obtenemos al valor de la conductividad térmica desconocida:

$$k_2 = \frac{k_1}{a(T_1)} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \frac{L_2}{L_1}$$

ec. VI.6

Por lo que con la ecuación VI.6 y con los datos de las mediciones obtenidos para los otros dos aislantes: Lene Mineral y RF - 7400, graficemos las curvas experimentales de éstos, mismas que se compararon con las curvas proporcionadas por los fabricantes para conocer su comportamiento real de conductividad, y la validez de la curva de calibración como representativa de la medición con este equipo. Ver gráficos VI.1 y VI.2.

Ya que las desviaciones representen un 15% en promedio lo cual da confiabilidad de operación del equipo.



VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo pretende satisfacer una demanda nacional, al diseñar y construir un equipo que permite la medición de la conductividad térmica de los aislantes que se fabrican en México, ya que actualmente según investigaciones realizadas, se carece de laboratorios acreditados con equipo que proporcione este servicio; asimismo, dentro de la búsqueda bibliográfica se ha encontrado en estudios hechos en la Facultad de Ingeniería, únicamente la realización de planteamientos teóricos para el diseño de este tipo de aparatos.

La medición de la conductividad térmica, es fundamental para una mejor selección y aplicación de los aislantes térmicos, asegurando la optimización en el costo aislante/energía para mejorar la eficiencia en los procesos industriales donde ocurra una transferencia de calor. Por lo que de esta manera, el propósito final de este proyecto es el brindar un servicio por la UNAM para las mediciones de la conductividad térmica de los aislantes.

El diseño del equipo construido, se fundamenta en realizar las mediciones de la conductividad térmica a partir de una referencia conocida, para conocer el flujo de calor que atraviesa el sistema, considerándolo en estado estable, y efectuando el cálculo en un análisis unidimensional.

En las pruebas realizadas a los materiales-muestra, al utilizar los termopares, se tuvo la problemática para la determinación de temperaturas precisas en las diferentes alternativas de medición que se instalaron, originada principalmente por aire estropeado entre las placas que conforman el arreglo y la ubicación de los mismos termopares, provocando resistencias de contacto que repercutían en resultados poco confiables; situación que se buscó reducir al mínimo, obteniendo finalmente mejores resultados a partir de considerar como elemento patrón un aislante que mostró en pruebas realizadas una mejor estabilidad.

En este equipo construido se obtuvo una simplicidad de operación para efectuar la medición de la conductividad térmica, debido al fácil cambio de materiales aislantes sometidos a prueba, continuo suministro de calor proporcionado por la resistencia eléctrica, además cuenta con recubrimiento exterior de acrílico que proporciona seguridad al usuario, y al mismo tiempo, evita corrientes de aire que pudieran perturbar las mediciones.

Asimismo, de acuerdo a la experiencia obtenida a través de las mediciones realizadas, se recomienda que este diseño puede ser mejorado, implementando nuevos accesorios que permitan un mejor control de las variables de medición, mencionándose en primera instancia, el cambio del pistón hidráulico por un pistón mecánico, para evitar calentamiento del líquido hidráulico, susceptible de degradarse por encontrarse ubicado junto a la resistencia eléctrica. Por otro lado se puede implementar un graficador de temperaturas, con el cual se observarían y se registrarían las variaciones y estabilidad de las mismas. De igual manera, se recomienda considerar como referencia patrón, únicamente al acero inoxidable 304, dadas las características de estabilidad y homogeneidad de sus propiedades físicas, al operar a rangos de temperatura elevada.

Por otro lado, sería ideal diseñar un equipo de medición independiente de referencias patrón, debiendo estar en función de una medición directa, independiente, dado que la conductividad es una propiedad térmica de los materiales, y al mismo tiempo evitar dependencias de otros materiales que pudieran repercutir en la desviación de los resultados.

Finalmente, se espera que la realización de este proyecto sea de utilidad y constituya una base de posteriores

trabajos, que pretendan una búsqueda para mejorar los métodos de la correcta medición de la conductividad térmica.

BIBLIOGRAFIA

1. TRANSFERENCIA DE CALOR

Ozisik Necati

2. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Krait Frank

3. HEAT TRANSFER

Holman Jack Phillip

4. APARATOS PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TERMICA (t sis)

Gutiérrez Marcos Antonio

5. AISLAMIENTOS

Kohling

6. 1er. COLOQUIO SOBRE EL SISTEMA DE AISLAMIENTO TERMICO APLICADO A LA INDUSTRIA PETROLERA

Brown Bast, Mayar Eric

7. NORMAS:

Norma A.S.T.M.

Norma 2-616-01 : Aislamiento térmico para alta temperatura

(Patroleos Mexicanos)

Norma 2-616-02 : Aislamiento térmico para baja temperatura

(Patroleos Mexicanos)

Norma D4500-04 : Aislamiento térmico

(Comisión Federal de Electricidad)

Norma C-125-1982 : Industria de la construcción - Materiales termoaislantes de fibras minerales - Espesor y densidad - Determinación

(CANACINTRA)

Norma C-230-1985 : Industria de la construcción - Materiales termoaislantes - Fibras minerales -

Especificaciones

(CANACINTRA)

8. INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

Creus Sole Antonio

9. TERMOPARES

Creus Sole Antonio

10. ARTICULOS:

ANALISIS DE AISLAMIENTOS TERMICOS

Cisneros R. Cesar, Fiorenzano B. Juan

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MUESTRAS DE ROCA

Ramos R.R.

MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y RESISTENCIA DE CONTACTO DEL PAPEL Y MATERIALES DE PELICULA DELGADA

Sanders D.J., Forsyth R.C.

TRANSIENT HOT-STRIP METHOD FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY AND SPECIFIC HEAT OF SOLIDS AND FLUIDS: SECOND ORDER THEORY AND APPROXIMATIONS FOR SHORT TIMES

Gustafsson Silas E. , Ahmed Kamaluddin

MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITIES OF GLASSY-METALLIC RIBBONS AT LOW TEMPERATURES

Cotts E.J., Anderson A.C.

CONCEPTUAL CHANGES IN THERMAL INSULATION MEASUREMENTS

Palanne C.M.

ANEXO A

TABLA 1

ESPECIFICACIONES PARA TERMOAISLANTE DE FIBRAS MINERALES

C L A S E I									
TIPO	A Y D ROLLOS FLEXIBLES				A Y D PLACAS SEMIRIGIDAS			A Y D PLACAS RIGIDAS	
DENSIDAD NOMINAL (Kg/m³)	10.0	12.0	16.0	24.0	16.0	24.0	32.0	64.0	96.0
CONDUCTIVIDAD TERMICA PROMEDIO $\left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$ TEMPERATURA MEDIA (°C)									
14	0.043	0.042	0.040	0.037	0.040	0.037	0.039	0.036	
19	0.046	0.045	0.043	0.042	0.043	0.042	0.042	0.039	
24	0.050	0.049	0.048	0.045	0.048	0.045	0.046	0.042	
38	0.055	0.053	0.050	0.048	0.050	0.049	0.049	0.045	
83	0.073	0.076	0.073	0.063	0.073	0.063	0.066	0.058	
<p>adsorción de humedad durante 96 hr. a 49°C y 95% de humedad relativa (% máx. de masa).</p> <p style="text-align: center;">No mayor de 5% en masa</p>									

TABLA 2

ESPECIFICACIONES PARA TERMOAISLANTES DE FIBRAS MINERALES

CLASE	II		
TIPO	A Y D TUBERIA PREFORMADA	A Y D TUBERIA PREFORMADA	A Y D ROLLOS FLEXIBLES
DENSIDAD NOMINAL(kg/m³)	80.0	80.0	48.0
CONDUCTIVIDAD TERMICA PROMEDIO			
$\left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$			
TEMPERATURA MEDIA (°C)			
4	0.033		
10	0.036		
24	0.037	0.045	
38	0.038	0.048	0.052
93	0.048	0.057	0.061
149		0.066	0.071
204		0.076	0.081
Adsorción de humedad durante 96 hr. a 49°C y 95% de humedad relativa (% máx. en masa)	No mayor del 5% en masa		

TABLA 3
ESPECIFICACIONES PARA TERMOAISLANTES DE FIBRAS MINERALES

CLASE III			
TIPO	PLACAS SEMIRIGIDAS	ROLLOS FLEXIBLES	COLCHONETAS ARMADAS
DENSIDAD NOMINAL (kg/m ³)	32 Y 40	16.0,24.0,28.0 Y 32.0	43.0 Y 90.0
CONDUCTIVIDAD TERMICA PROMEDIO			
$\left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$			
TEMPERATURA MEDIA (°C)			
38	0.043	0.042	0.030
93	0.052	0.055	0.040
149	0.061	0.071	0.061
260	0.071	0.090	0.091
Adsorción de humedad durante 96 hr. a 49°C y 95% de humedad relativa (% máx. en masa)	No mayor del 5% en masa		

TABLA 4
ESPECIFICACIONES PARA TERMOAISLANTES DE FIBRAS MINERALES

CLASE	IV			
TIPO	COLCHONETAS PESPUNTEADAS O ARMADAS			
DENSIDAD NOMINAL (kg/m³)	64	96	144	192
CONDUCTIVIDAD TERMICA PROMEDIO $\left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$				
TEMPERATURA MEDIA (°C)				
38	0.033	0.038	0.043	0.043
93	0.036	0.047	0.052	0.052
149	0.045	0.061	0.061	0.061
260	0.072	0.090	0.070	0.091
370	0.100	0.097	0.076	0.097
490	0.140	0.105	0.091	0.105
595		0.125	0.110	0.110
700		0.140	0.125	0.120
750			0.140	0.130
Adsorción de humedad durante 96 hr. a 49°C y 95% de humedad relativa (% máx. en masa)	No mayor del 5% en masa			

TABLA 5

TEMPERATURAS DE LAS SUPERFICIES EXTERIORES DE AISLAMIENTO

APLICACION DEL AISLAMIENTO	CON TEMPERATURAS NORMALES DE OPERACION	TEMPERATURA EXTERIOR DEL AISLAMIENTO	
		PARA PROTECCION DEL PERSONAL	PARA LA ESTABILIDAD EN LA OPERACION O CONSERVACION DE CALOR.
A. PARA ESTABILIDAD EN LA OPERACION.	DE 36°C A 650°C	36°C	53°C
B. PARA LA ESTABILIDAD EN LA OPERACION Y CONSERVACION DEL CALOR.	DE 66°C A 80°C	40°C	62°C
C. PARA ESTABILIDAD EN LA OPERACION, CONSERVACION DE CALOR Y PROTECCION DEL PERSONAL	DE 81°C A 100°C	40°C	62°C
	DE 101°C A 300°C	58°C	80°C
	DE 301°C A 1500°C	66°C	88°C

TABLA 6
APLICACION DE LOS MATERIALES DE AISLAMIENTO

APLICACION		MATERIAL DE AISLAMIENTO
1) EN RECIPIENTES Y EQUIPO	a) SUPERFICIES PLANAS Y CILINDRICAS DE RECIPIENTES, TANQUES CON DIAMETRO DE 3.60 m Y MENORES, CAMBIADORES DE CALOR Y FALDONES DE RECIPIENTES	FIBRA DE ASBESTO AMOSITE FIBRA MINERAL SILICATO DE CALCIO TIERRA DIATOMACEA ASBESTO CON ACABADO DE CEMENTO CEMENTO DE FIBRA MINERAL CEMENTO DE VERMICULITA EXPANDIDA O EXFOLIADA CEMENTO DE SILICE DIATOMACEA
	b) TANQUES DE MAS DE 3.60 m. DE DIAMETRO	FIBRA DE ASBESTO AMOSITE FIBRA MINERAL SILICATO DE CALCIO TIERRA DIATOMACEA ASBESTO CON ACABADO DE CEMENTO CEMENTO DE FIBRA MINERAL
	c) CABEZAS DE: TANQUES, RECIPIENTES Y CAMBIADORES DE CALOR	FIBRA MINERAL SILICATO DE CALCIO TIERRA DIATOMACEA ASBESTO CON ACABADO DE CEMENTO CEMENTO DE FIBRA MINERAL
2) EN TUBERIA	a) TRAMOS RECTOS DE TUBO	CEMENTO DE SILICE DIATOMACEA FIBRA DE ASBESTO AMOSITE FIBRA MINERAL SILICATO DE CALCIO TIERRA DIATOMACEA
	b) VALVULAS, BRIDAS Y CONEXIONES	FIBRA DE ASBESTO AMOSITE FIBRA MINERAL SILICATO DE CALCIO TIERRA DIATOMACEA

TABLA 7
APLICACION DE LOS MATERIALES DE AISLAMIENTO

APLICACION	MATERIAL DE AISLAMIENTO
<p>1) EN RECIPIENTES Y EQUIPO</p> <p>a) SUPERFICIES PLANAS Y CILINDRICAS DE RECIPIENTES Y TANQUES DE 3.60 m DE DIAMETRO Y MENORES, CAMBIADORES DE CALOR Y FALDONES DE RECIPIENTES.</p> <p>b) CABEZAS DE RECIPIENTES Y TANQUES DE 3.60 m DE DIAMETRO Y MENORES; Y CAMBIADORES DE CALOR</p> <p>c) SUPERFICIES PLANAS, CILINDRICAS DE TANQUES DE MAS DE 3.60 m DE DIAMETRO.</p>	<p>FIBRA MINERAL POLIESTIRENO CELULAR POLIURETANO CELULAR VIDRIO CELULAR</p> <p>VIDRIO CELULAR FIBRA MINERAL POLIESTIRENO CELULAR POLIURETANO CELULAR PERLITA EXPANDIDA</p> <p>POLIURETANO CELULAR POLIESTIRENO CELULAR VIDRIO CELULAR</p>
<p>2) EN TUBERIA</p> <p>a) TRAMOS RECTOS.</p> <p>b) VALVULAS, BRIDAS Y CONEXIONES.</p>	<p>FIBRA MINERAL POLIURETANO CELULAR VIDRIO CELULAR</p> <p>FIBRA MINERAL POLIESTIRENO CELULAR POLIURETANO CELULAR PERLITA EXPANDIDA VIDRIO CELULAR</p>

TABLA 8

TOLERANCIA DE EXACTITUD EN LOS ALAMBRES PARA TERMOPARES

TIPO DE TERMOPAR	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	LIMITES DE ERROR	f.e.m. (mv/°C)
TIPO T COBRE-CONSTANTANO	-185 A -60	± 2%	0.052
	-60 A 90	± 0.75°C	
	90 A 375	± 0.75%	
TIPO J HIERRO-CONSTANTANO	-15 A 430	± 2°C	0.055
	430 A 750	± 0.5%	
TIPO E CROMEL-CONSTANTANO	-15 A 300	± 1.5°C	0.050
	300 A 550	± 0.5%	
TIPO K CROMEL-ALUMEL	-15 A 275	± 2°C	0.04
	275 A 1250	± 0.75%	
TIPO R ó S PLATINO-PLATINO/ RODIO (13% Y 10%)	-15 A 650	± 1.5°C	0.012
	650 A 1500	± 0.25%	0.010

TABLA 9

LIMITES DE TEMPERATURA PARA TERMOPARES

TIPO DE TERMOPAR	TEMPERATU RA MINIMA (°C)	TEMPERATURA MAXIMA (°C)				
		CALIBRE 8	CALIBRE 14	CALIBRE 20	CALIBRE 24	CALIBRE 30
TIPO T (COBRE- CONSTANTANO)	-185	.	.	260	205	205
TIPO J (HIERRO- CONSTANTANO)	-17	760	590	480	370	370
TIPO E (CROMEL- CONSTANTANO)	-185	870	650	535	425	425
TIPO K (CROMEL- ALUMEL)	-17	1260	1100	980	870	870
TIPOS R Y S (Pt-Pt 13% o 10% Rh)	-17	.	.	.	1480	.

ANEXO B

B.1 CALCULOS PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE LA PLACA DEL ACERO INOXIDABLE 304

DATOS DEL FABRICANTE:

Potencia de la resistencia eléctrica: 1500 W

Conductividad térmica del acero inoxidable 304: $k = 21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Area de contacto: $A = .20 \times .20 \text{ m} = .04 \text{ m}^2$

Considerando un 20% de pérdida de calor de la resistencia eléctrica:

$$Q = 1500 \text{ W} \times .8 = 1200 \text{ W}$$

Si $Q = \frac{A\Delta Tk}{L}$ para la placa de acero,

el espesor será:

$$L = \frac{A\Delta Tk}{Q}$$

para $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, $L = \frac{(.04)(10)(21)}{1200} = .007 \text{ m} = .70 \text{ cm}$

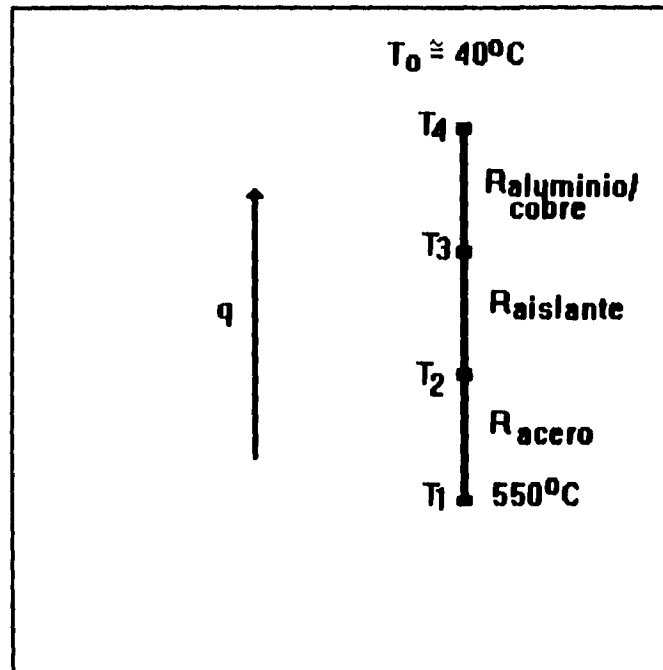
para $\Delta T = 20^\circ\text{C}$, $L = 1.40 \text{ cm}$

para $\Delta T = 28^\circ\text{C}$, $L = 1.96 \text{ cm}$

para $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, $L = 2.10 \text{ cm}$

B.2 CALCULOS PARA LA DISIPACION DE CALOR EN LA CARA EXTERIOR DEL SUMIDERO: ALUMINIO Y COBRE

Del arreglo del sistema de medición, tenemos:



$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{acero}} = \frac{T_2 - T_3}{R_{aislante}} = \frac{T_3 - T_4}{R_{aluminio/cobre}} = \frac{T_4 - T_0}{R_{convección}}$$

Tabla de datos.

	CONDUCTIVIDAD TERMICA <i>k (W/°C)</i>	ESPESOR <i>L (m)</i>
● Acero inoxidable 304	21	.01905
● Aislante:		
- Aislhogar (k_{mayor})	.0460	.0127 (mín)/.1016 (máx)
- Colchoneta armada (k_{media})	.032	.0127 (mín)/.1016 (máx)
- Espuma de poliuretano (k_{menor})	.0215	.0127 (mín)/.1016 (máx)
● Aluminio _____	230.0	.0254
● Cobre _____	384.28	.0254
● Area de contacto entre las placas del sistema: $A = .04 \text{ m}^2$		

OPCION: ALUMINIO

Cálculo de la temperatura del ALUMINIO en su cara exterior (T_e). Para tres aislantes con diferentes conductividades térmicas:

AISLANTE: AISLHOGAR

PARA UN ESPESOR DE .0127 m:

a) Cálculo de las resistencias térmicas:

$$R_{\text{acero}} = \frac{L_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A_{\text{acero}}} = \frac{.01905}{(21)(.04)} = .022 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{aislante}} = 6.90 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{aluminio}} = .00276 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Considerando que el área del sumidero está expuesta a la intemperie en un 20%, tenemos:

$$A = .04 + 4 [(.0254) (.2)] = .06 \text{ m}^2$$

$$y \quad R_{\text{convección}} = \frac{1}{hA} = \frac{1}{(11.04)(.06)} = 1.51 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

b) Cálculo del flujo de calor:

$$q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{acero}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{aluminio}} + R_{\text{convección}}} = \frac{550 - 40}{.022 + 6.90 + .00276 + 1.51}$$

$$q = 60.46 \text{ W}$$

(valor descrito en la tabla V.2)

c) Cálculo de la temperatura en la cara exterior (T_4):

$$si \quad q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{acero}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Despejando: } T_4 = T_1 - q (R_{\text{acero}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{aluminio}}) = 550 - 60.46 (.022 + 6.90 + .00276)$$

$$T_4 = 131.33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(valor descrito en la tabla V.2)

PARA UN ESPESOR DE .1016 m.-

a) Resistencia térmica:

$$R_{\text{aislante}} = \frac{.1016}{(.0460)(.04)} = 55.21 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

b) Flujo de calor:

$$q = \frac{550 - 40}{.022 + 55.21 + .00276 + 1.51}$$

$q = 8.99 \text{ W}$

(valor descrito en la tabla V.2)

c) Temperatura en la cara exterior (T_e):

$$T_e = 550 - 8.99 (.022 + 55.21 + .00276)$$

$T_e = 53 \text{ } ^\circ\text{C}$

(valor descrito en la tabla V.2)

De igual manera se calcularon los valores de q y T_e para los otros dos aislantes: Colchoneta armada y espuma de poliuretano. Y en forma similar se hizo para el COBRE, completando la tabla V.2 que nos muestra que para ambos metales el calor total generado (q) desde la resistencia eléctrica (T_e) hasta la cara exterior del sumidero (T_e) es el mismo. Y para la temperatura exterior (T_e) de la fuente de disipación resultaron valores idénticos, tanto para el aluminio como para el cobre.

B.3 CALCULOS PARA SELECCIONAR EL ESPESOR OPTIMO DEL ALUMINIO COMO FUENTE DE DISIPACION DE CALOR

Para el cálculo del espesor óptimo se toma como base la cantidad máxima de calor total disipado y la máxima temperatura exterior registrada en el sumidero (condición óptima de mayor disipación de calor) de los resultados descritos en la tabla V.2 y que son los siguientes:

AISLANTE: AISLHDGAR, ESPESOR = .0127 m (1/2")

a) Para un espesor del aluminio de .0254 m (1"), tenemos de la tabla V.2:

$$\underline{q = 60.46 \text{ W}} \quad \text{y} \quad \underline{T_{\text{máxima}} = T_s = 131.33 \text{ }^\circ\text{C}} \quad \text{(descrito en la tabla V.3)}$$

b) Para un espesor del aluminio de .0508 m (2"):

$$R_{\text{aluminio}} = \frac{L_{\text{aluminio}}}{k_{\text{aluminio}} A_{\text{aluminio}}} = \frac{.0508}{(230)(.04)} = .00552 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{acero}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{aluminio}} + R_{\text{convección}}} = \frac{550 - 40}{.022 + 6.90 + .00552 + 1.51}$$

$$\underline{q = 60.44 \text{ W}} \quad \text{(valor descrito en la tabla V.3)}$$

$$T_s = T_1 \cdot q (R_{\text{acero}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{aluminio}}) = 550 \cdot 60.44 (.022 + 6.90 + .00552)$$

$$\underline{T_s = 131.30 \text{ }^\circ\text{C}} \quad \text{(valor descrito en la tabla V.3)}$$

c) Para un espesor del aluminio de .0762 m (3"):

$$R_{\text{aluminio}} = \frac{.0762}{(230)(.04)} = .00828 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$q = \frac{550 - 40}{.022 + 6.90 + .00828 + 1.51}$$

$$q = 60.42 \text{ W}$$

(valor descrito en la tabla V.3)

$$T_s = 550 \cdot 60.42(.022 + 6.90 + .00828)$$

$$T_s = 131.27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(valor descrito en la tabla V.3)

d) Para un espesor de aluminio de .1016 m (4"):

$$R_{\text{aluminio}} = \frac{.1016}{(230)(.04)} = .01104 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$q = \frac{550 - 40}{.022 + 6.90 + .01104 + 1.51}$$

$$q = 60.40 \text{ W}$$

(valor descrito en la tabla V.3)

$$T_s = 550 \cdot 60.40(.022 + 6.90 + .01104)$$

$$T_s = 131.24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(valor descrito en la tabla V.3)

Estos resultados se resumen en la tabla V.3. En la cual se observa que para diferentes espesores de aluminio, los valores obtenidos para el calor total disipado (q) y la temperatura exterior en la fuente de disipación (T_s) son prácticamente iguales. Por lo que se puede emplear cualquiera, pero se selecciona el de menor espesor: .0254 m (1") por representar el más bajo costo.

B.4 SELECCION PARA EL DISEÑO DE ALETAS COMPLEMENTARIAS DE LA FUENTE DE DISIPACION DE CALOR

Para mejorar la disipación de calor del sumidero en el sistema, se implementan unas aletas, las cuales a continuación se determina el cálculo para su selección y diseño.

a) **Forma geométrica:**

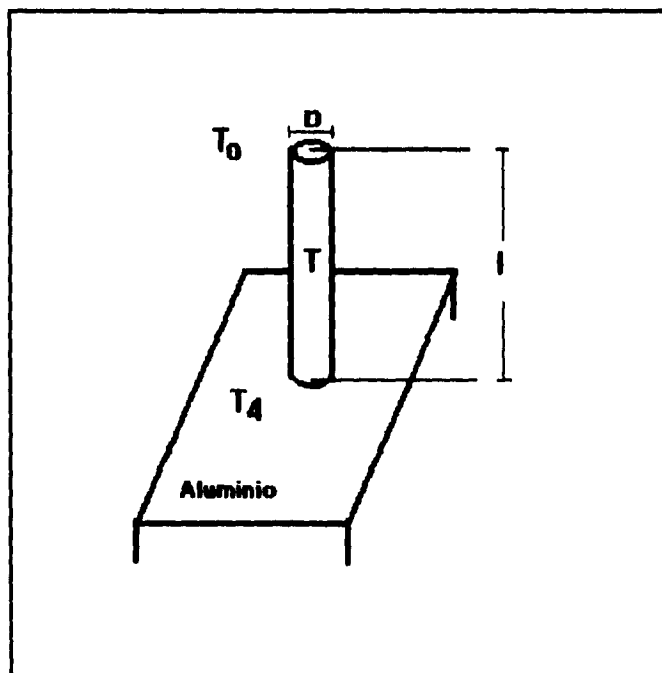
- circular
- rectangular

b) **Espesor y altura óptima**

Consideraciones:

- Material de las aletas con conductividad térmica uniforme
- Aletas de sección transversal uniforme

1.- ALETA CIRCULAR. La barra es de longitud finita pero se desprecia el calor que se pierde por el extremo de ésta.



donde:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad ; \quad P = \pi D$$

ec's. B.4.1

El flujo de calor para el diseño circular es:

$$q = \sqrt{hPkA} (T_4 - T_0) \tanh(ml)$$

ec. B.4.2

donde:

$$m^2 = \frac{hP}{kA}, \text{ despejando: } m = \sqrt{\frac{hP}{kA}}$$

ec. B.4.3

La temperatura:

$$\frac{T - T_0}{T_4 - T_0} = \frac{\cosh m(l-x)}{\cosh(ml)}$$

despejando:

$$T = \frac{\cosh m(l-x)}{\cosh(ml)} (T_4 - T_0) + T_0$$

ec. B.4.4

donde:

h = Coeficiente de convección del aire = 11.72 W/m² °C

k = Conductividad térmica del aluminio = 230 W/m°C

T_0 = Temperatura ambiental \cong 40°C

T = Temperatura en la aleta

T_4 = Temperatura exterior del sumidero

A = Área de la aleta

**P = Perímetro de la aleta
 l = Longitud de la aleta**

Para determinar el diseño de las aletas circulares de aluminio, se toman los valores obtenidos de la temperatura exterior (T_s) de cada uno de los tres aislantes descritos en la tabla V.2. Primeramente para el aislante AISLHOGAR y con un espesor de .0127 m (1/2") se tiene que $T_s = 131^\circ\text{C}$ y conjuntamente:

Para un diámetro de aleta (D) = .001587 m (1/16"), longitud (l) = .2 m, se substituyen éstos valores en las ecuaciones:

B.4.1: $A = \frac{\pi}{4} (.001587)^2 = .000002 \text{ m}^2 ; P = \pi (.001587) = .004986 \text{ m}$

B.4.3: $m = \sqrt{\frac{(11.72) (.004986)}{(230) (.000002)}} = 11.27$

B.4.2: $q = \sqrt{(11.72) (.004986) (230) (.000002)} (131-40) \tanh(11.27 \times .2)$

$q = .45 \text{ W/aleta}$

(valor descrito en la tabla V.4)

B.4.4: $T = \frac{\cosh 11.27 (.2-.2)}{\cosh(11.27 \times .2)} (131-40) + 40$

$T = 59^\circ\text{C}$

(valor descrito en la tabla V.4)

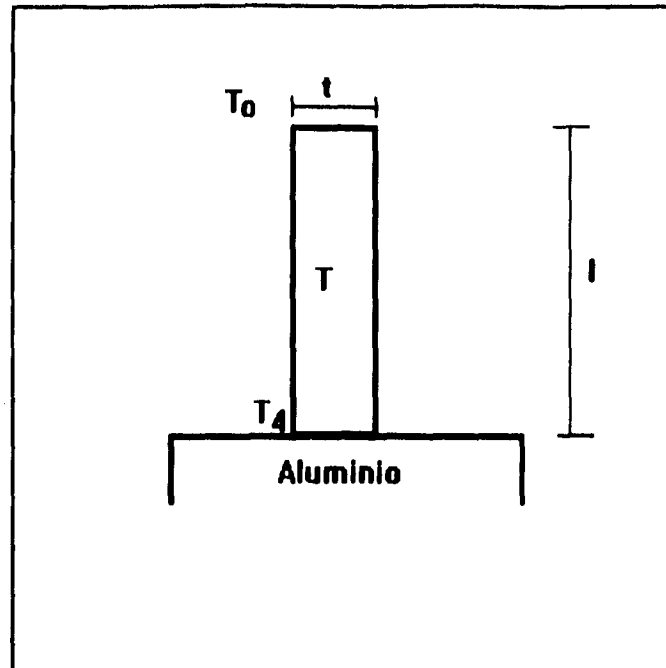
Procediendo de igual manera para el mismo aislante AISLHOGAR, descrito en la tabla V.2, pero para un espesor de .1016 m (4") se observa una temperatura exterior de $T_s = 53^\circ\text{C}$ por lo que substituyendo en las ecuaciones B.4.1, B.4.3, B.4.2 y B.4.4, se tiene que:

$q = .06 \text{ W/aleta}$ y $T = 43^\circ\text{C}$

(valores descritos en la tabla V.4)

y así de esta manera realizando el cálculo con las ecuaciones anteriores para los valores de T , descritos en la tabla V.2 de los aislantes: AISLHOGAR, COLCHONETA ARMADA RW-4300 y ESPUMA DE POLIURETANO, y para diámetros comerciales de barras circulares de .00158 m (1/16"), .00476 m (3/16"), .00635 m (1/4") y de .0079 m (5/16") se acompleta la tabla V.4, determinándose de este manera la temperatura y el calor disipado por aleta circular de aluminio en el sistema.

2. ALETA RECTANGULAR.



La aleta rectangular de lados rectos puede tratarse por los mismos métodos usados para la barra circular, si el largo (l) de la aleta es grande comparado con su espesor t , entonces el perímetro de la aleta es:

$$P = 2(l + t) = 2(l) \quad ; \quad \text{y su área: } A = lt$$

ec's. B.4.5

entonces:

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA}} = \sqrt{\frac{2h}{kt}}$$

ec. B.4.6

El flujo de calor para el diseño es:

$$q = \sqrt{hPkA} (T_4 - T_0) \tanh(ml) = \sqrt{2l^2 thk} (T_4 - T_0) \tanh(ml)$$

y la temperatura:

$$T = \frac{\cosh m(l-x)}{\cosh(ml)} (T_4 - T_0) + T_0$$

Para determinar el diseño de las aletas rectangulares de ALUMINIO se toman las mismas consideraciones que para las aletas circulares, así como también de los valores obtenidos para la temperatura exterior (T_4) de cada uno de los tras aislantes descritos en la tabla V.2. De esta manera para el aislante AISLHOGAR con un espesor de .0127 m (1/2") se tiene una $T_4 = 131$ °C y conjuntamente:

-Para un espesor de aleta (t) = .001587 m (1/16") y longitud de aleta (l) = .2 m, sustituimos en las ecuaciones:

$$B.4.5: \quad A = (.2) (.001587) = .000317 \text{ m}^2 ; P = 2(.2) = .4 \text{ m}$$

$$B.4.6: \quad m = \sqrt{\frac{(2) (11.72)}{(230) (.001587)}} = 8.01$$

$$B.4.2: \quad q = \sqrt{(11.72) (.4) (230) (.000317)} (131-40) \tanh(8.01 \times .2)$$

$$q = 49.05 \text{ W/aleta}$$

(valor descrito en la tabla V.5)

$$B.4.4: \quad T = \frac{\cosh 8.01(.2-.2)}{\cosh(8.01 \times .2)} (131-40) + 40$$

$$T = 75 \text{ °C}$$

(valor descrito en la tabla V.5)

Aplicando el mismo procedimiento para el mismo aislante observamos de la tabla V.2 que para un espesor (L) de .1016 m (4") tenemos una $T_4 = 53$ °C, por lo que substituyendo estos datos en las fórmulas se tiene que:

$$B.4.2: \quad q = \sqrt{(11.72) (.4) (230) (.000317)} (53-40) \tanh(8.01 \times .2)$$

$$q = 7.01 \text{ W/aleta}$$

(valor descrito en la tabla V.5)

B.4.4:
$$T = \frac{\cosh 11.27 (.2-.2)}{\cosh(11.27x.2)} (53-40) + 40$$

T = 45 °C

(valor descrito en la tabla V.5)

De este manera calculamos lo mismo para los otros dos aislantes: colchoneta armada RW-4300 y espuma de poliuretano en su respectivos espesores .0127 m (1/2") y .1016 m (4"), así como sus correspondientes temperaturas exteriores (T_e) descritas en la tabla V.2 y aplicándolo sobre las fórmulas antes mencionadas completamos la tabla V.5, determinando con esto los valores q(calor en la aleta) y T(temperature en aleta) para las aletas rectangulares de aluminio.

ANEXO C



VITRO FIBRAS, S.A.

ESPECIFICACION TECNICA
DEL PRODUCTO

RF-4000 RF-7000

AISLAMIENTOS
SEMIRIGIDOS Y RIGIDOS

UNIDAD M.C.S.A. 1970

DESCRIPCION

Aislamientos termoacústicos de color amarillo, fabricado con fibra de vidrio aglutinada con resina fenólica de fraguado térmico.

PRESENTACION

Se presentan en placas semirígidas y rígidas en varias densidades, medidas y espesores que satisfacen los requerimientos de aplicación.

CARACTERISTICAS

Material	Densidad		Conductividad λ	Térmica k
	kg/m ³	lb/pie ³		
			$\frac{\text{Kcal m}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{BTU in}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$
RF-4100	16.0	1.0	0.0341	0.275
RF-4150	24.0	1.5	0.0306	0.247
RF-4200	32.0	2.0	0.0291	0.235
RF-7400	64.0	4.0	0.0301	0.243
RF-7600	96.0	6.0	0.0276	0.223

Las conductividades térmicas están dadas a 24°C (75°F) de temperatura promedio.

Véase gráfica de conductividad térmica al final del catálogo.

Absorción de Humedad: Menos de 5% en peso, durante 96 hrs. a 49°C (120°F).

**DIMENSIONES
Y TOLERANCIAS**

Material	Espesor cm	Ancho cm	Largo cm
RF-4100	2.5, 3.8 Y 5.1	61	122
RF-4150	2.5, 3.8 Y 5.1	61	122
RF-4200	2.5, 3.8 Y 5.1	61	122
RF-7400	2.5 Y 3.8	61	122
RF-7600	2.5 Y 3.8	61	122

Tolerancias: Materiales RF-4000

Espesor:

**Empaque estandar +/- 0.3 cm

Empaque a compresión, el máximo espesor no debe exceder al nominal en +/- 0.3 cm.

Ancho: -0.3 a +1.0 cm

Largo: -0.3 a +1.0 cm

**Nota: Se considera empaque estándar para materiales semirígidos tubos de polietileno calibre 500 con los extremos abiertos y para materiales rígidos papel semikraft (27 lb/pulg² de resistencia mínimo)

Nota: Después de remover el empaque a compresión y dejar caer el material desde una altura de 50 cm., el material debe recobrar el espesor en la siguiente forma:

1. Las piezas medidas al menos deben recobrar el 95% del nominal.
2. 90% de las piezas deben recobrar el espesor nominal o más.
3. Las piezas que excedan del espesor nominal deben ser capaces de comprimirse al nominal aplicando una presión o carga que no exceda de 10 lb/pie².



Tolerancias: Materiales RF-7000

Espesor: - 0.1 a + 0.3 cm.
 Ancho: - 0.3 a + 0.6 cm.
 Largo: - 0.3 a + 0.6 cm.

USOS Y VENTAJAS

Constituyen el aislamiento ideal para aparatos domésticos como refrigeradores, congeladores, cuartos frigoríficos, camiones fríos, furgones etc., así mismo de equipos que operen en rangos de temperatura de -84°C hasta 232°C.

Por sus características acústicas son apropiados para tratamientos acústicos de salones, auditorios, cines, estudios de radio y televisión, etc. y en forma especial para este propósito se recomienda el material semirígido RF-4200, cuyo coeficiente de absorción de sonido es de 0.92 a 500 ciclos en un espesor de 2.5 cm.

Ventajas:

- * Máxima eficiencia térmica: Lo cual se traduce en menores espesores necesarios y menor costo.
- * Incombustibles: Lo cual evita accidentes y grandes pérdidas.
- * Elasticidad: Propiedad de la fibra de vidrio que hace que ocupe plenamente los espacios, sin dejar huecos sin aislamiento.
- * Dimensionalmente estables: No se deforman, alargan o contraen o agrietan.
- * Inorgánicos: Lo cual asigna su larga duración ya que no procrea hongos y bacterias.
- * No favorecen la corrosión: En cobre, acero o aluminio.
- * Fácil de instalar y manejar.
- * Económicos.
- * Puede empalmarse para formar el espesor requerido.

RECUBRIMIENTOS

Los materiales RF-4000 y RF-7000 pueden ser surtidos con recubrimiento de neopreno que se aplica a razón de 500 gr/m². Se usan para tratamiento interior de ductos de aire acondicionado. Es aconsejable el material RF-4200 hasta velocidades del aire de 1200 f.p.m.. Para velocidades más altas y hasta 6000 f.p.m. y bajo especiales y estrictas especificaciones, son recomendables los materiales rígidos RF-7000. El producto puede ser colocado con seguros mecánicos o con adhesivos compatibles con la fibra de vidrio.

ESPEORES RECOMENDABLES

Para altas temperaturas

Temperatura de Operación °C	Temperatura de Operación °F	Espesor recomendado cm.	P.C.
hasta 65	hasta 149 F	1.9	231
de 66 a 93	de 150 a 200	2.5	298
de 94 a 149	de 201 a 300	3.8	395
de 150 a 204	de 301 a 400	6.4	344
de 205 a 232	de 401 a 450	7.6	331

Para bajas temperaturas

Condiciones de humedad temperatura de operación		90% E.R.	H.R.	85% E.R.	H.R.	80% E.R.	H.R.
°C	°F	cm	GC	cm	GC	cm	GC
Hasta 10	hasta 50	5.1	37	2.5	71	1.9	95
de 9 a 1	de 48 a 33	7.6	38	3.8	74	2.5	110
de 0 a -17	de 32 a 1	10.1	48	6.4	76	5.1	95
-18 a -34	de 0 a -30	14.0	49	8.9	77	6.4	106
-35 a -51	-31 a -60	17.8	50	10.1	86	7.6	116
-52 a -84	-61 a -120	21.6	57	12.7	98	8.9	140

Nota: La temperatura ambiente considerada en las dos tablas es 25°C.
 E.R.: Espesor Recomendado.
 P.C.: Pérdida de Calor en BTU/m²-h.
 G.C.: Ganancia de Calor en BTU/m²-h.

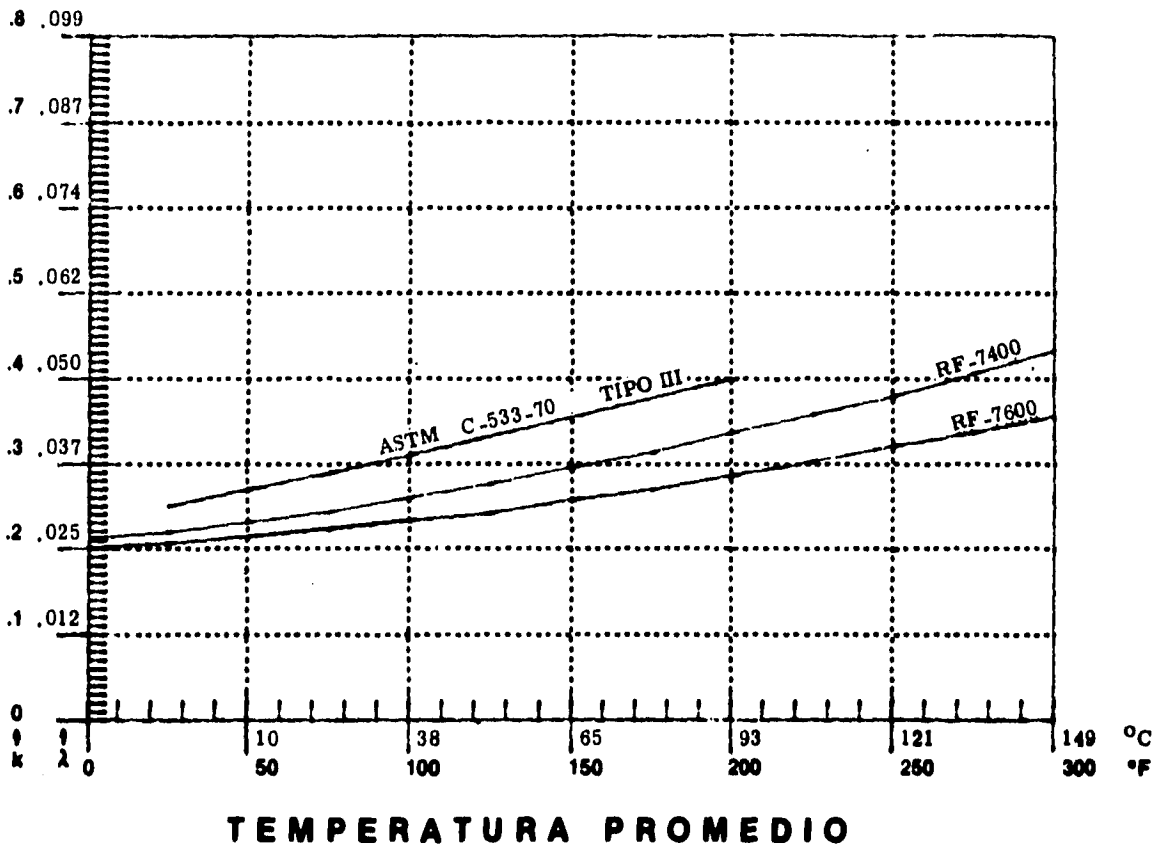
CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL RF-7000

$$\frac{\text{BTU pulg.}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\lambda = \frac{\text{Kcal m}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$k = \frac{\text{BTU pulg.}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

CONDUCTIVIDAD



VITRO FIBRAS, S.A.

Ingenieros Militares 85-4º. Piso

Col. Argentina Pte. Deleg. Miguel Hidalgo,

CP-11230 MEXICO, D. F.

Tels.: Planta: 586-1011, Oficinas: 576-8299

Pedidos: 586-1615

dirección técnica

FIBERGLAS



Estas tablas son aplicables a ambos materiales, RF-4000 semirígido y RF-7000 rígidos. Deberá tenerse presente que las tablas muestran espesores promedios, al variar la conductividad térmica y la densidad de los materiales traerá consigo una variación en la pérdida o ganancia de calor. Se recomienda en caso de duda calcular el espesor.

LIMITACIONES

Diseñados para temperaturas de operación de -84°C hasta 232°C (-120°F hasta 450°F).

El producto no deberá exponerse a la intemperie durante su almacenamiento o instalación.

Descomposición del aglutinante:

Cuando la placa de fibra de vidrio se coloca sobre una superficie caliente arriba de 176°C (350°F), perderá algo de su aglutinante sobre el lado expuesto, debido a la descomposición del mismo.

A temperaturas mayores de 204°C (400°F), el aislamiento cambiará a blanco en la superficie interna y en el área intermedia se tornará grisácea, la capa externa permanecerá dorado a café que es el color característico del aislamiento. Las características térmicas del aislamiento no serán afectadas por las pérdidas del aglutinante, solo habrá un decremento en la resistencia mecánica de éste.

EMPAQUE

Los materiales rígidos serán empacados en papel semikraft sellado con papel engomado. Cuando ambos materiales (rígidos y semirígidos) lleven recubrimiento de neopreno, el empaque será igual al anterior. Los materiales RF-4000 serán empacados en tubos de polietileno con extremos abiertos a compresión.

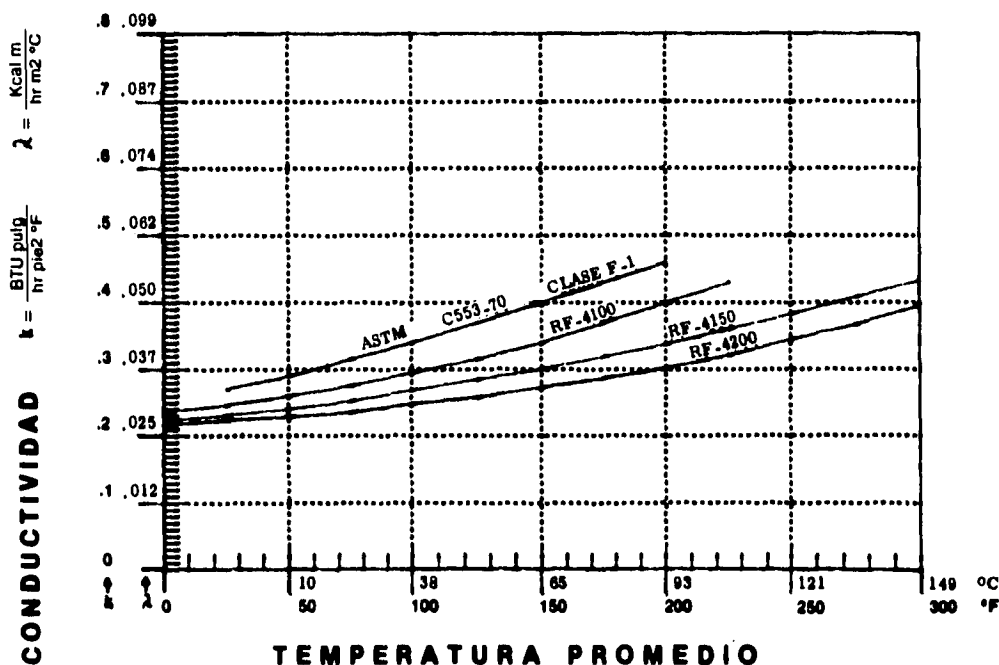
ESPECIFICACIONES DE INSTALACION

Siendo tan amplio el campo de aplicación de los materiales semirígidos RF-4000 y rígidos RF-7000, no es posible recomendar una especificación generalizada para la instalación de estos productos. Por este motivo podemos asesorarlo en la formulación de la especificación adecuada para cada caso en particular.

ASISTENCIA TECNICA

Nuestro departamento técnico o nuestra extensa red de distribuidores en la República proporcionará sin costo alguno la información adicional o la asistencia técnica necesaria.

CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL RF-4000



AISLAMIENTO DE LANA MINERAL*

192-224 Kg/m³ (12-14 Lbs/ft³)

DESCRIPCION:

La LANA MINERAL "LM", es un material aislante que se obtiene fundiendo diversos minerales seleccionados.

De su especial proceso de fabricación resultan conjuntos de finas fibras largas y flexibles de color oscuro, inertes e incombustibles; formándose múltiples celdas de aire, para obtener densidad adecuada y baja conductividad térmica.

Las fibras de este producto están reforzadas con pequeñas cantidades de resina termofijadora.

Se recomienda especialmente (dado su alto punto de fusión), para el aislamiento térmico de equipos y tuberías con temperaturas de hasta 650°C (1200°F), de operación ciclica o continua.

VENTAJAS:

- Máxima eficiencia térmica.
- Económica y durable.
- Fácil de instalar.
- Anticorrosiva.
- Resistente a la humedad.
- Imputrescible.
- No favorece la acción de hongos.
- Dimensionalmente estable.

TIPOS DE SOPORTES:

- LM I: Metal desplegado en una cara y malla tipo gallinero en la otra.
- LM II: Malla tipo gallinero en ambas caras.
- LM III: Metal desplegado en ambas caras.
- LM IV: Metal desplegado en una cara y tiras del mismo en la otra.

CARACTERISTICAS FISICAS:

ASTM	C-592
Límite de temperatura	650°C (1200°F)
Densidad	192.24 a 224.28Kg/m ³ (12-14 Lbs/ft ³)
Conductividad Térmica a 260°C (500°F)	0.073 Kcal-M/Hr.m ² °C (0.59 BTU-IN/Hr.ft ² °F)
Resistencia al fuego	Incombustible
Encogimiento mínimo	2%
Alta eficiencia Acústica	
Embalaje	Cajas de cartón reforzado



PRESENTACION:

La LANA MINERAL "LM" se presenta en forma de colchonetas armadas, en rollos y a granel. Por su flexibilidad y entrelazado perfecto, puede aplicarse sobre superficies curvas, planas e irregulares.

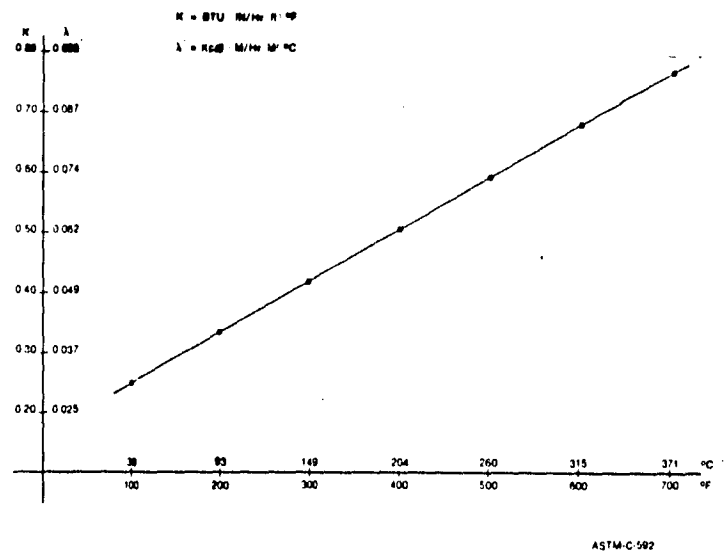


TABLA DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

DATOS DEL FABRICANTE, LECTURAS TOMADAS CON EL EQUIPO DE MEDICION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA CONSTRUIDO Y CALCULOS

- 1) **AISLANTE DE PRUEBA: LANA MINERAL.· ESPESOR = .044 m**
REFERENCIA PATRON: ACERO INOXIDABLE 304.· ESPESOR .0188 m

$T_{SET\ POINT}(^{\circ}C)$	50	100	150	200	250	300
T_1	51.3	90.2	130.4	168.8	206.7	244.7
T_2	50.0	85.3	120.9	155.7	190.2	225.2
T_3	27.1	29.8	38.0	43.5	50.2	56.5
$\Delta T_1 = T_1 - T_2$	1.3	4.9	9.5	13.1	16.5	19.5
$\Delta T_2 = T_2 - T_3$	22.9	55.5	82.9	112.2	140.0	168.7
$(T_1 + T_2)/2$	50.6	87.7	125.6	162.2	198.4	234.9
$k(T)_{ACERO}$	14.8	15.4	16.0	16.5	17.1	17.6
$(T_2 + T_3)/2$	38.5	57.5	79.4	99.6	120.2	140.8
$k_{FABRICANTE}$	.036	.040	.045	.049	.054	.059
q_1	1023	4014	8085	11497	15008	18255
q_2	19	50	85	125	172	226
a	54	80	95	92	87	81

$\Delta a = 41$

2) AISLANTE DE PRUEBA: RF - 7400 .- ESPESOR = .0345 m.-

$T_{SET\ POINT}(^{\circ}C)$	50	100	150	200	250	300
T_1	51.0	91.3	130.4	168.3	205.2	243.7
T_2	50.1	86.7	122.1	157.0	191.3	225.7
T_3	28.0	31.3	34.4	38.0	41.8	46.5
$\Delta T_1 = T_1 - T_2$	0.9	4.6	8.3	11.3	13.9	18.0
$\Delta T_2 = T_2 - T_3$	22.1	55.4	87.7	119.0	149.5	179.2
$(T_1 + T_2)/2$	50.5	89.0	126.2	162.6	198.2	234.7
$k(T)_{ACERO}$	14.8	15.4	16.0	16.5	17.1	17.6
$(T_2 + T_3)/2$	39.0	59.0	78.2	97.5	116.5	136.1
$k_{FABRICANTE}$	.037	.041	.045	.050	.054	.059
q_1	71	3768	7064	9918	12643	16851
q_2	24	66	114	172	234	306
θ	3	57	62	58	54	55

$\Delta\theta = 59$

3) AISLANTE DE PRUEBA: RF - 4200. ESPESOR = .0265 m.

$T_{SET\ POINT}(^{\circ}C)$	100	150	200	250	300	350
T_1	90.6	128.7	166.3	203.3	238.8	282.5
T_2	84.4	118.7	153.3	187.7	221.1	262.2
T_3	32.8	40.7	49.7	58.6	68.0	79.5
$\Delta T_1 = T_1 - T_2$	6.2	10.0	13.0	15.6	17.7	20.3
$\Delta T_2 = T_2 - T_3$	51.6	78.0	103.6	129.1	153.1	182.7
$(T_1 + T_2)/2$	87.5	123.7	159.8	195.5	229.9	272.3
$k(T)_{ACERO}$	15.4	15.9	16.5	17.0	17.5	18.2
$(T_2 + T_3)/2$	58.6	79.7	101.5	123.1	144.5	170.8
$k_{FABRICANTE}$	.039	.042	.045	.050	.055	.061
q_1	5079	8457	11410	14106	16476	19652
q_2	76	124	176	244	318	421
θ	67	68	65	58	52	47

$\Delta \theta = 21$

donde: $T = (^{\circ}C)$; $q = (W/m^2)$