

106  
24

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**SELECCION DEL MATERIAL Y CALCULO DEL  
ESPESOR DE AISLAMIENTOS TERMICOS PARA  
TUBERIA AEREA AUXILIANDOSE POR  
COMPUTADORA EN LA INDUSTRIA  
PETROQUIMICA**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**P R E S E N T A :**  
**PEDRO ALFREDO RIVERA SALGADO**

Director de Tesis: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes

**FALLA DE ORIGEN**



**MEXICO, D. F.**

**1989**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## INDICE TEMATICO

### I ) INTRODUCCION.

### II ) SELECCION DEL MATERIAL TERMOAISLANTE.

1) IMPORTANCIA DE UN AISLAMIENTO ADECUADO. . . . .	7
A) Ahorro de Energia. . . . .	7
B) Mejor Control de Procesos. . . . .	9
C) Protección de Personal. . . . .	10
D) Prevenir Condensación de Humedad Sobre las Tuberías de Baja Temperatura. . . . .	11
2) CARACTERISTICAS DE LOS AISLAMIENTOS TERMICOS. . . . .	13
A) Propiedades Mecánicas. . . . .	14
a) Resistencia a la compresión y flexión. . . . .	14
b) Cambio dimensional. . . . .	15
c) Estructura Celular. . . . .	17
d) Densidad. . . . .	17
e) Absorción de humedad. . . . .	19
f) Formas de Presentación. . . . .	21
g) Maniobrabilidad. . . . .	23

B) Propiedades Térmicas. . . . .	24
a) Temperatura de operación. . . . .	24
b) Conductividad Térmica. . . . .	25
c) Calor Especifico. . . . .	32
C) Propiedades Químicas. . . . .	33
a) Resistencia al fluido que se maneja. . . . .	33
b) Resistencia a la formación de microorganismos. . . . .	34
c) Flamabilidad. . . . .	34
d) Desprendimiento de gases tóxicos. . . . .	35
e) Resistencia al medio ambiente sin favorecer la corrosión. . . . .	35
3) CRITERIOS DE SELECCION DEL AISLAMIENTO TERMICO. . . . .	36
A) Tipo de Servicio. . . . .	37
a) Servicio para alta temperatura. . . . .	37
b) Servicio para baja temperatura. . . . .	39
c) Resistencia a los agentes internos. del sistema aislante. . . . .	40
d) Tipo de instalación. . . . .	41

E) Localización. . . . .	42
a) Posición de la tubería. . . . .	42
b) Resistencia a los agentes externos del sistema aislante. . . . .	44
C) Vida Util. . . . .	45
D) Economía. . . . .	47

### III) CALCULO DEL ESPESOR DE EL MATERIAL TERMOAISLANTE.

1) TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS TUBERIAS. . . . .	49
A) Transferencia de Calor por Conducción. . . . .	49
B) Transferencia de Calor por Radiación. . . . .	54
C) Transferencia de Calor por Convección. . . . .	57
a) Convección libre. . . . .	59
b) Convección forzada. . . . .	62
2) ESPESOR ECONOMICO. . . . .	69
A) Determinación de Costos Fijos. . . . .	70
a) Planteamiento de fórmulas. . . . .	70
b) Cálculo de variables. . . . .	72

B) Determinación de Costos Variables.	70
a) Planteamiento de fórmulas.	73
b) Cálculo de variables.	75
C) Determinación del Espesor Económico.	80
a) Generalidades.	80
b) Metodología.	82
3) ESPESOR TERMICO.	85
A) Determinación de las Condiciones de Operación de la Línea.	86
a) Temperatura superficial exterior ( $T_s$ ) prefijada.	86
b) Flujo de calor ( $Q$ ) prefijado.	87
B) Determinación del Espesor Térmico.	88
a) Temperatura superficial exterior ( $T_s$ ) prefijada.	88
b) Flujo de calor ( $Q$ ) prefijado.	89

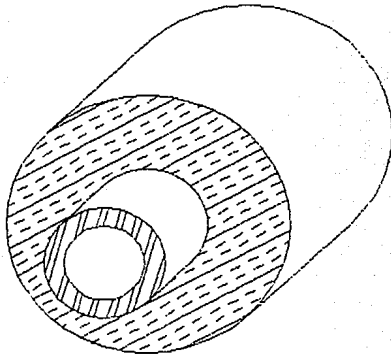
**IV) DISEÑO E IMPLANTACION DE  
UN SISTEMA EN COMPUTADORA  
PERSONAL PARA CALCULAR EL  
ESPESOR DE UN MATERIAL  
TERMOAISLANTE.**

1) ANALISIS. . . . .	91
2) DISEÑO. . . . .	92
3) PRUEBAS DEL SISTEMA. . . . .	95
4) MANTENIMIENTO Y OPERACION. . . . .	101
A) Descripción de los Archivos de Datos. . . . .	101
B) Operación de los Programas. . . . .	104
C) Condición de Aproximación en los Cálculos. . . . .	105

**V) CONCLUSIONES.**

**BIBLIOGRAFIA.**

# I



## INTRODUCCION



Los aislamientos térmicos son materiales usados para presentar resistencia al flujo de calor. Físicamente los termoaislantes son soportes mecánicos de pequeñas celdas de aire o gases, los cuales tienen muy baja conductividad térmica, dando por resultado un excelente material aislante. Los aislamientos comúnmente usados están compuestos por diferentes materiales básicos: fibra de vidrio, lana mineral, poliestireno celular, uretano celular, perlita expandida, poliuretano, etc. Su presentación puede ser en forma de placas, colchonetas, secciones preformadas y polvos.

La transferencia de calor entre diferentes cuerpos siempre se presentará cuando sus temperaturas sean diferentes. Ya que las tuberías tendrán una alta o baja temperatura con respecto al medio ambiente, se presentará el fenómeno de transporte térmico, el cual no es posible evitar, ya que el calor es una manifestación de la energía en transición. Por ello, el calor no se puede almacenar, sin embargo existe la factibilidad de ofrecer resistencia a su flujo, con objeto de aprovecharlo eficientemente en las partes del proceso donde es necesario minimizar estas pérdidas.

En el presente trabajo se da una orientación acerca de la selección del aislamiento térmico más adecuado para ser instalado en tubería aérea, dentro de un complejo petroquímico o cualquier otra industria que así lo requiera.

La selección óptima de un sistema termoaislante, depende de un correcto balance económico y de apropiados criterios de ingeniería. Por ello, la instalación de el aislamiento térmico más adecuado no es algo sencillo, intervienen una gran cantidad de variables físicas, mecánicas, térmicas y económicas.

También se da un procedimiento para calcular el espesor del material termoaislante en tubería aérea, de modo que se optimice su servicio.

Se propone una metodología para el cálculo de el espesor óptimo del aislamiento térmico para tuberías, el cual se basa en las condiciones reales existentes en nuestro país. El espesor óptimo del aislamiento térmico, se determina cuando se alcanza el valor mínimo de costos, los cuales consideran al combustible, material termoaislante, horas de trabajo de la instalación, etc. La metodología propuesta permitirá una utilización mas racional de los combustibles y materiales termoaislantes.

Asimismo se elabora un programa en computadora personal, el cual es una herramienta que permite efectuar revisiones periódicas, a las tablas de espesores recomendados para diferentes materiales en las especificaciones generales para servicios de alta y baja temperatura. Esto es porque tanto los precios en los materiales, el interés del capital amortizable, el precio del petróleo, la posición de la tubería, la velocidad del viento, la temperatura ambiente, la humedad del lugar, etc, son variables difíciles de determinar. Al revisar los resultados del programa, podemos apreciar la diferencia de los espesores que resultan de aplicar el concepto económico, respecto al aspecto de seguridad industrial.

Las observaciones anteriores resaltan la importancia que debe tener el seleccionar y optimizar los sistemas de aislamiento térmico, considerando que una mayor inversión inicial puede resultar en un beneficio económico para la empresa.

Anualmente se consumen gran cantidad de aislamientos térmicos,

sin embargo, sorprende la poca atención dada a la especificación del aislante más conveniente para el proceso. Frecuentemente esta elección se realiza sobre bases u opiniones informales y experiencias limitadas.

Lo anterior empeora si se considera que algunos materiales dentro del mercado nacional, no reúnen las especificaciones mínimas indicadas en la literatura o en catálogos, lo que en muchas ocasiones determina desconfianza en el diseñador.

La función principal de los aislamientos térmicos es el obtener una economía energética en tuberías y equipos de proceso.

La conservación de la energía es un tema que ha cobrado gran importancia en los últimos años. Esto se debe principalmente, al encarecimiento de los precios del crudo en el mercado internacional, siendo el petróleo la principal fuente de energía en el mundo.

Hace un millón de años, el hombre primitivo solo consumía diariamente 6,300 KJ, derivados estos de los alimentos que consumía. Hace 100,000 años, nuestros antepasados cazadores habían aprendido a hacer fuego para preparar sus alimentos y para calentarse, consumiendo el cuádruple de esa energía (aproximadamente 25,000 KJ).

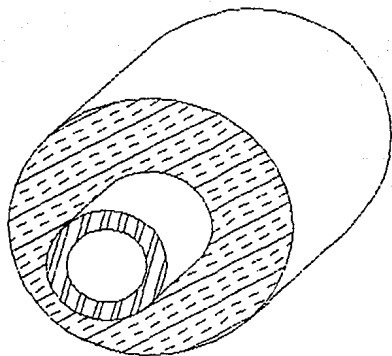
En el s. XV el hombre medieval, que empleaba bestias de tiro, molinos de viento, ruedas hidráulicas, y un poco de carbón, consumía ya aproximadamente una cantidad veinte veces mayor de energía que el hombre primitivo (120,000 KJ). En 1875 la máquina de vapor puso a disposición del hombre industrial en Inglaterra 340,000 KJ/día.

Actualmente el hombre tecnológico en E.U. consume a diario cerca de 1,000,000 KJ/día, es decir 150 veces más que el hombre primitivo.

México es un país relativamente bien dotado en energéticos.

Principalmente en la rama petrolera. Sin embargo, no se ha hecho más racional el uso de esos recursos energéticos, ni se han aplicado medidas en una forma inteligente. Por ello, hay muchísimo por corregir en el ramo de la utilización racional de la energía, tratando de mejorar las condiciones actuales, a fin de alcanzar una estructura más racional. Esto es esencialmente responsabilidad de los ingenieros y en particular por los que optan por la rama mecánica y eléctrica.

# II



**SELECCION DEL MATERIAL  
TERMOAISLANTE**

## 1 ) IMPORTANCIA DE LA ADECUADA INSTALACION DEL AISLAMIENTO TERMICO.

Existen varios motivos por los cuales se emplean los aislamientos térmicos:

- Ahorro de energía.
- Mejor control de procesos.
- Protección de personal.
- Prevenir la condensación de humedad sobre las tuberías de baja temperatura.

El factor económico definirá el tipo y cantidad del material a ser empleado, dependiendo de la necesidad a ser cubierta por el aislamiento térmico. Todo ello con la finalidad de reducir costos e incrementar las utilidades de la empresa.

Enseguida veremos con más detalle cada una de estas razones para emplear los aislamientos térmicos.

### A ) AHORRO DE ENERGIA.

La razón más importante por la cual se emplean los aislamientos térmicos es para obtener un ahorro de energía.

La conservación de la energía significa que hay que utilizar nuestros recursos energéticos de manera más eficiente y con menos desperdicio, pero sin reducir la producción ni retardar el crecimiento económico.

La energía es indispensable tanto para nuestra vida diaria como para nuestras actividades industriales y económicas. Por ello, no

es exageración afirmar que nuestro actual confort y prosperidad, solamente se puede mantener con un suministro abundante de energía.

Con todo esto, la demanda de energía en el mundo ha aumentado en proporciones asombrosas en los últimos años, debido al aumento de la población, al mejoramiento de las condiciones de vida y al crecimiento de la industria moderna. Este hecho ha provocado una creciente ansiedad con respecto al agotamiento de los recursos del petróleo, que hoy en día es la fuente principal de suministro de energía en el mundo. Además el petróleo es empleado como materia prima en la elaboración de infinidad de productos, siendo un recurso natural no renovable.

La conmoción ha adquirido también dimensiones políticas, porque las mayores reservas mundiales de petróleo se hayan concentradas en una docena de países, muchos de ellos en regiones de tensión política, lo que suscita temores sobre la disponibilidad del combustible.

En programas recientes de conservación de energía que se han aplicado en plantas de refinación y petroquímica de E.U., se reportan los siguientes datos estadísticos: El 70% de energía requerida en este tipo de industria, se consume en equipos de transferencia de calor. El ahorro de energía reportado luego de aplicar los programas de ahorro de energía fue del 9%, correspondiendo el 1% al ahorro de energía por concepto de mejora en la instalación de aislamientos térmicos; el 8% restante se logró con la optimización de los procesos petroquímicos.

Actualmente el alto costo de la energía requerida en la industria, cualquiera que sea su origen, obliga a buscar su óptimo aprovechamiento mediante una administración adecuada. Por ello, es de carácter prioritario la necesidad de optimizar todo proceso, mediante

Programas de conservación de energía en las plantas industriales. Es por esto que los sistemas de aislamiento térmico bien diseñados, redundan en un ahorro económico para la empresa.

B ) MEJOR CONTROL DE PROCESOS.

En ciertas secciones de un proceso petroquímico, llamadas estas "secciones críticas", se necesita tener un control riguroso de la temperatura y asegurar que en dichas secciones no ocurran fugas de calor.

En muchas aplicaciones, los aislantes se emplean para ayudar en el control de la temperatura de un fluido. Uno de los principales problemas se relaciona con el flujo de gases venteados, de una reacción química o de una combustión. Estos gases frecuentemente tienen un punto de rocío ligeramente más alto que la temperatura ambiente, de tal suerte que si los ductos no están aislados adecuadamente, el gas llega a condensarse. Esto puede ocasionar corrosión, cuya severidad depende de la composición química del gas.

Los aislamientos térmicos incrementan la estabilidad en los procesos petroquímicos, ya que mantienen constantes las temperaturas de operación, necesarias éstas para llevar a cabo múltiples reacciones químicas.

Para ciertos procesos se debe considerar la rapidez con que el aislamiento térmico puede disipar calor. Esto es para conocer la velocidad a la cual se puede efectuar la reacción química.



### C ) PROTECCION DE PERSONAL.

El uso de aislantes evita el tener zonas externas muy calientes en tuberías, con lo que se protege al personal de los riesgos potenciales en ciertas áreas de trabajo.

La norma de PEMEX para protección de personal empleando aislamientos térmicos, establece las siguientes medidas:

Se instalará aislamiento de protección al personal en todas aquellas tuberías cuya temperatura de operación sea mayor de 65° C. En estos casos el espesor del aislante se diseña para reducir la temperatura de la superficie exterior en un rango de 54° C a 65.5° C. Estas temperaturas son consideradas de seguridad pues no causan generalmente quemaduras graves.

También se aislarán todas aquellas superficies calientes con las que pudiera entrar en contacto inadvertidamente el personal. Estas superficies serán aisladas hasta una altura de 2.15 m arriba del nivel normal del piso, de pasillos o de áreas en las que el personal debe permanecer por largo tiempo.

Se aislarán también para protección de personal aquellos equipos y tuberías que se localizan a 60 cm o menos, de cualquier extremo de las plataformas de operación. Este tipo de aislamiento no deberá instalarse más allá de las zonas normales de trabajo, o cuando se indique que alguna pieza o equipo en particular queda sin aislamiento a pesar de su localización.

No se aislará con fines de protección al personal carcazas de bombas calientes, enfriadores, condensadores, las bridas de los cambiadores de calor, las bridas de tuberías y las válvulas.

Cuando en una tubería, recipiente o equipo existan aislamientos para protección de personal alternados longitudinalmente, y éstos espacios sin aislar sean menores de 3 m, se recomienda que dichos espacios se aislen para tener un aislamiento continuo.

Cuando por razones especiales no se permita aislamiento para protección de personal, se instalarán barreras de protección hechas de metal desplegado.

D ) PREVENIR LA CONDENSACION DE HUMEDAD  
SOBRE LAS TUBERIAS DE BAJA TEMPERATURA.

La condensación de humedad del medio ambiente, es el principal problema que se presenta en tuberías de baja temperatura. En éstos casos el espesor del aislamiento, debe ser suficiente para mantener en la superficie externa, una temperatura por encima del punto de rocío del medio. Cuando el ambiente es muy húmedo o en atmósferas con alta humedad relativa, el punto de rocío puede ser bastante cercano a la temperatura ambiente, con lo que se requiere una cantidad muy significativa de aislante. Aquí la emisividad de la superficie juega un papel muy importante en los cálculos.

Para rangos de temperatura iguales entre servicios de alta y baja temperatura, resultan mayores los espesores de termoaislante para baja temperatura. Esto se debe a que los costos de la energía a bajas temperaturas es 7 u 8 veces más cara que la de alta temperatura. En baja hay que añadir los costos de equipo adicional como refrigeradores y compresores.

En bajas temperaturas, al condensarse el vapor sobre el

aislamiento, se puede incrementar dramáticamente la conductividad del termoaislante, por lo que es indispensable la aplicación de una barrera de vapor adecuada. Dicha barrera consta de una delgada capa de material impermeable, que cubre al termoaislante. Una mala aplicación de la barrera de vapor, que deje un orificio, es suficiente para destruir el aislante, ya que por él penetrará la humedad ocasionando condensaciones internas y congelamiento.

Entre más frío sea el equipo, la resistencia a la humedad debe ser mayor.

## 2 ) CARACTERISTICAS DE LOS AISLAMIENTOS TERMICOS.

=====

Existe una amplia variedad de materiales en el mercado, que pueden utilizarse tanto para baja temperatura como para alta. Aun así, cada tipo de material presenta propiedades específicas, que los hacen particularmente apropiados para ciertas condiciones.

Obviamente para comparar la mayoría de los materiales termoaislantes, es necesario revisar algunas propiedades. Las siguientes representan un buen marco de comparación:

### Propiedades Mecánicas:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la flexión.
- Cambio dimensional.
- Estructura celular.
- Densidad.
- Absorción de humedad.
- Formas de presentación.
- Maniobrabilidad.

### Propiedades Térmicas:

- Temperatura de operación.
- Conductividad térmica.
- Calor específico.

### Propiedades Químicas:

- Resistencia al fluido que se maneja.
- Resistencia a la formación de microorganismos.
- Flamabilidad.

- Desprendimiento de gases tóxicos.
- Resist. al medio ambiente sin favorecer la corrosión.

Si para algún uso en particular es necesario considerar otras propiedades, entonces hay que hacerlo. Lo importante es determinar cuales son las propiedades mas significativas de acuerdo al servicio que dará el aislamiento.

Enseguida analizaremos cada una de las propiedades anteriores.

#### A ) PROPIEDADES MECANICAS.

##### a) RESISTENCIA A LA FLEXION Y A LA COMPRESION.

Los aislamientos térmicos deben tener una consistencia física tal, que les permita soportar los esfuerzos mecánicos a los que estarán expuestos durante su vida útil.

Las expansiones y contracciones que sufre el termoaislante, son inevitables. Para ayudar al material a soportar esto, se colocan juntas de expansión, las cuales consisten en dejar un espacio de aproximadamente 50 mm (2") entre tramo y tramo de material preformado. Dicha ranura es rellena con material termoaislante en forma algodonosa.

Ademas el termoaislante debe soportar los abusos mecánicos que sobre él ejerza el personal de la planta, sobre todo en maniobras de mantenimiento e instalación de equipo.

El material aislante debe resistir tanto las cargas externas, como los esfuerzos que provoca la tubería en el termoaislante. Algunas

de estas cargas se pueden observar en la figura # II.2.1.

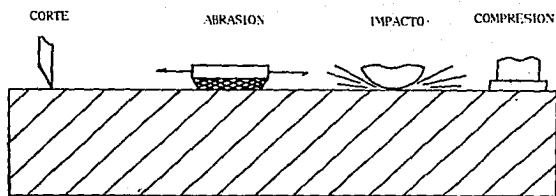
Es por lo anterior el que la mayoría de los termoaislantes requieran un recubrimiento externo como protección.

En el Complejo Petroquímico Morelos, debido al ambiente salino y a la alta concentración de azufre en el aire, se ha seleccionado como recubrimiento protector de tuberías aéreas la lámina de aluminio calibre 26 (1.8 mm). Dicha lámina es apropiada contra los abusos mecánicos a que están expuestas las tuberías en el complejo.

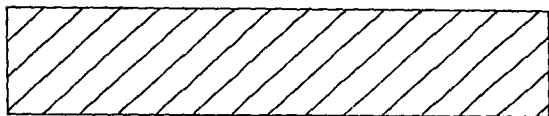
Así, para poder comparar la resistencia a los esfuerzos mecánicos de un termoaislante con otro, se les realizan pruebas de compresión y flexión. Estas pruebas son claramente definidas por la norma ASTM en cuanto a la forma de elaborarse.

#### b) CAMBIO DIMENSIONAL.

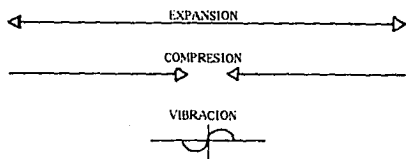
Una vez instalado el aislamiento térmico, es importante que éste conserve sus propiedades físicas a lo largo de su vida útil. Sin embargo, en algunas ocasiones cambia el espesor del aislamiento, esto puede ser por diversas razones: Algunas veces el material es comprimido y este no se recupera hasta su estado inicial. También puede suceder que en presencia de vibraciones, los aislantes fibrosos desprendan partículas de material que tiende a asentarse y periódicamente se requiere la aplicación de nuevas capas superficiales. En ocasiones sucede que al mojarse el termoaislante, este se comprime y no recupera su forma original.



(a)



(b)



Cargas mecánicas sobre el aislamiento:  
 a) Provenientes del exterior.  
 b) Provocadas por la tubería.

Fig. # 11.2.1

#### c) ESTRUCTURA CELULAR.

La constitución del aislamiento se clasifica en tres tipos: Granular, fibroso y espumoso. Estos tipos de material se pueden apreciar en la figura # II.2.2.

Los aislamientos granulares están constituidos por polvos o escamas, con aglutinante o sin él. Estos materiales suelen ser frágiles y no compresibles cuando están en forma de preformados. Algunos termoaislantes de este tipo son: Silicato de calcio, perlita, óxido de magnesio, tierra diatomácea, etc.

Los aislamientos fibrosos como la lana mineral, los asbestos, el fieltro y la lana de caolín, se componen de fibras delgadas de materiales orgánicos e inorgánicos. Estas fibras están alineadas ortogonalmente a la dirección del flujo de calor. Estos materiales son de fácil aplicación y soportan bastante bien los esfuerzos mecánicos a pesar de su baja densidad.

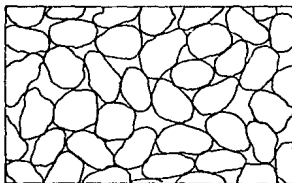
Los aislamientos espumosos están hechos a base de hule, plástico o vidrio espumado, de modo que se forman pequeñas y numerosas celdas (menores de 1 mm de diámetro) llenas de aire o gas inerte. Estos aislamientos son poco flexibles y de baja densidad. Debido a que suelen ser impermeables, se emplean en aislamientos para baja temperatura.

#### d) DENSIDAD.

Generalmente la resistencia al flujo de calor, es inversamente proporcional a la densidad del material. Esto es una limitante para

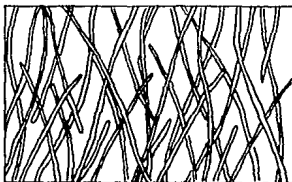


(a)



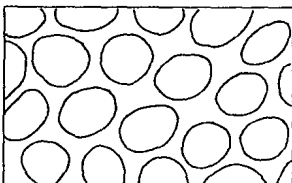
Granular

(b)



Fibroso

(c)



Espumoso

Clasificación de los termoaislantes atendiendo  
a su composición estructural.

Fig. # II.2.2

obtener mejores aislantes, ya que serían necesariamente materiales muy frágiles y no cumplirían con los demás requisitos físicos.

La conductividad térmica efectiva de aislantes granulares, fibrosos o espumosos, es función del tamaño y número de las celdas de aire en su estructura. Esto se ha observado experimentalmente al notar que para cada temperatura de operación, la conductividad térmica es función de la densidad. Así se obtiene una densidad óptima, en la cual la conductividad del aislante es mínima. Algunos casos de estos se muestran en la gráfica # II.2.1.

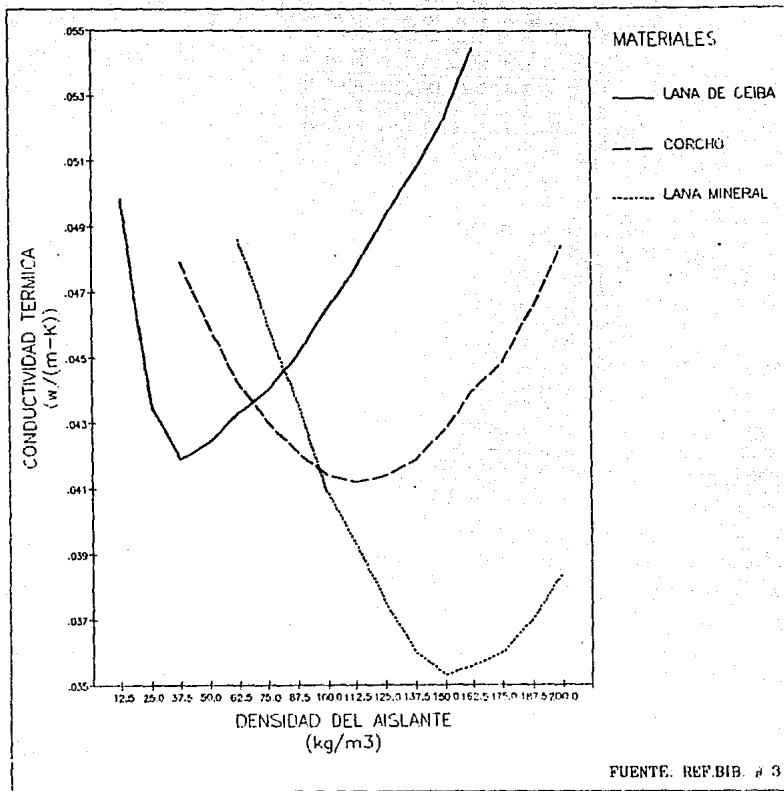
#### e) ABSORCION DE HUMEDAD.

No es conveniente que el aislamiento adquiera humedad del medio ambiente, pues ésta altera en forma muy significativa la conductividad del material termoaislante.

La humedad atrapada por el termoaislante puede también ocasionar corrosión en la tubería.

Cuando la tubería es de baja temperatura, la humedad que penetre el aislamiento se tornará en hielo y éste, modificará en gran medida la transferencia de calor entre la tubería y el medio ambiente. La formación de hielo debilita el aislamiento y lo vuelve quebradizo. Para ayudar al termoaislante a que no absorba agua se le recubre con un material impermeable.

En servicio de alta temperatura se coloca la "barrera de humedad" alrededor del aislamiento térmico, ésta evita que el agua de lluvia entre en contacto con el material termoaislante.



Densidad óptima para algunos aislantes  
térmicos secos a 20° centígrados.

Gráf. # 11.2.1

Cuando se trata de servicio de baja temperatura, el aislamiento se recubre con una "barrera de vapor", siendo esta la que evita que el vapor húmedo de la atmósfera penetre el termoaislante y se condense, o en el peor de los casos, se congele. La figura # II.2.3 muestra una sección de aislamiento para baja temperatura, donde el vapor ambiental ha penetrado la barrera de vapor y ha roto las celdas internas del material al congelarse.

#### F) FORMAS DE PRESENTACION.

Los termoaislantes pueden tener varias presentaciones comerciales:

- Preformados.- Fabricados a la medida de la tubería de modo que se amolda a su superficie. Se recomienda para tuberías con diámetros menores a 300 mm (12"). Se fabrican en medias cañas, cuartos, etc.

- Plásticos.- Aislante a granel en forma seca, es preparado para aplicarlo en forma de pasta al mezclarlo con agua.

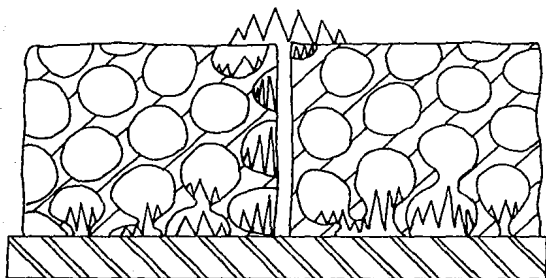
- Relleno a granel.- Aislante en forma de polvo, gránulo, fibras sueltas o gránulos esféricos.

- Flexibles.- Material algodonoso que carece de rigidez y tiende a amoldarse a la superficie contra la que se instala.

- Tejidos.- Son cuerdas o tejidos hechos a base de fibras termoaislantes.

- Colchoneta.- Aislamiento de fibra flexible, limitado por malla metálica por uno o dos lados.

- Atomizado.- Aislamiento aplicado con atomizador. El material



Celdas del material termoaislante  
rotas por la formación de hielo.

Fig. # 11.2.3

puede ser fibroso o granular mezclado con agua, u otro solvente, en la boquilla del atomizador. También puede formarse por la acción de dos compuestos químicos que se mezclan en el atomizador.

#### g) MANIOBRABILIDAD.

La maniobrabilidad es particularmente difícil de definir, está relacionada con el manejo y la duración. Un concepto más real de esta propiedad se tiene, cuando se le interpreta como una combinación de propiedades tales como: Resistencia a la compresión, tracción, flexibilidad, resistencia a los daños por humedad, fácil instalación y no provocar problemas fisiológicos a los trabajadores que lo instalen.

Durante la producción, mezcla, manejo o desmontaje, las partículas finas de asbesto o diatomita a granel, pueden ser inhaladas y alojarse en los conductos bronquiales, causando irritación pulmonar. Esto puede ocurrir tanto en la instalación de termoaislantes secos, como mojados.

El personal que maneja materiales fibrosos, especialmente del tipo ásperos, deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- Evitar usar ropa estrecha, la cual puede atrapar las fibras que provocan irritación local de la piel.
- Usar guantes y aplicar crema sobre las partes expuestas de la piel y lavarlas inmediatamente después del manejo del termoaislante.

B) PROPIEDADES TERMICAS.

a) TEMPERATURA DE OPERACION.

Los aislantes no deben ser expuestos a temperaturas que los lleven a cambios dimensionales irreversibles, tampoco deben fundirse o inflamarse.

Se deben respetar tolerancias de seguridad, asi se tiene que, la temperatura de cara caliente debe operar como máximo 50° centigrados abajo de la temperatura de operación del termoaislante.

Los materiales que trabajan en amplios rangos de temperatura, son frecuentemente más expansivos, tienen conductividades mas altas y son frecuentemente más pesados, requiriendo soportes más costosos.

-150° C o menores:

Se acostumbra usar: poliuretano, perlita, lana mineral (de roca y escoria) y fibra de vidrio. Estas temperaturas se alcanzan comunmente en la producción, almacenaje y transporte de gases licuados.

-150° C a 25° C:

Se recomienda emplear: espumas de fibra de vidrio, poliuretano, fenólicas, asi como ebonita expandida, poliestireno, PVC, perlita y lana mineral.

25° C a 800° C:

Los aislantes más comunes son: lana mineral (de roca y escoria), silicato de calcio, tierras diatomáceas, óxido de magnesio y asbestos.

## b) CONDUCTIVIDAD TERMICA.

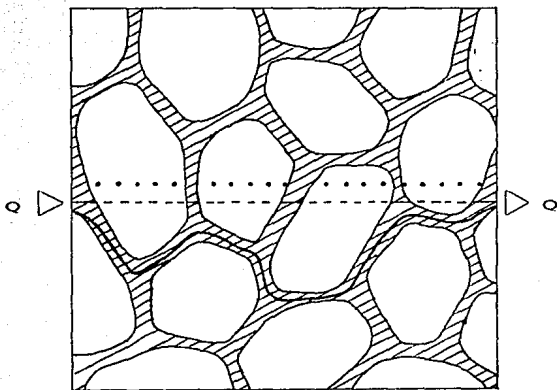
Los aislamientos térmicos son materiales que presentan una alta resistencia a la pérdida de calor, en las tuberías o equipos de proceso. Dicha resistencia, o conductividad térmica, es diferente para cada material. En los materiales aislantes siempre se busca una baja conductividad térmica, para reducir así el costo y volumen de la instalación.

Para seleccionar el sistema de aislamiento más adecuado, debemos conocer como factor fundamental la conductividad térmica real o efectiva de los materiales aislantes disponibles.

La conductividad de un termoaislante puede ser modificada por algunos factores como: incremento de la temperatura, aplicación de carga mecánica, compresión del material, absorción de humedad, grietas o vitrificación del termoaislante, presión y naturaleza del gas que llena los poros del aislante, así como el diámetro de dichos poros. Otros factores que afectan la conductividad de un material, son la estructura cristalina o amorfa del mismo. Impurezas del 0.1% causan incrementos en la conductividad del orden del 3%, esto se debe a disturbios causados en la estructura. Así también en un aislante fibroso, cualquier aumento del diámetro de la fibra individual, o una orientación generalizada de las fibras, originan un incremento en la conductividad, manteniendo constantes otros factores.

La conductividad térmica real o efectiva de un material termoaislante, considera los tres mecanismos de transferencia de calor. Esto se pueden apreciar en la figura # II.2.4. La convección no se





**Trayectorias de flujo de calor:**

Por conducción gaseosa . . . . .

Por radiación. - - - - -

Por conducción sólida. \_\_\_\_\_

Contribuciones al flujo de calor a través  
de un corte amplificado de un material aislante.

Fig. 11.2.1

considera, debido a las reducidas dimensiones de los espacios intersticiales del material.

El valor del factor  $K$ , debe identificarse con respecto a la temperatura promedio. Esta, es la media aritmética entre la temperatura interior y la exterior del material termoaislante. La temperatura media es el término que se usa en diferentes tablas, para seleccionar un determinado valor de  $K$  de un material. Esto se hace debido a que, precisamente la conductividad media de un material, coincide con la conductancia para la media aritmética entre la superficie fría y la caliente.

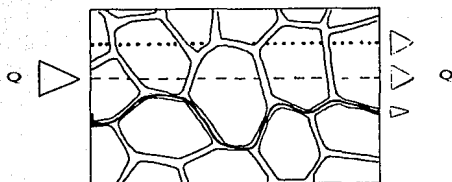
El tamaño y número de celdas de aire (o gas) dentro del termoaislante, son básicos para determinar su conductividad térmica.

En los aislamientos que presentan una estructura semejante a la de la figura # II.2.5(a), el flujo importante de calor es determinado por la radiación y la conducción gaseosa, siendo la conducción sólida comparativamente pequeña.

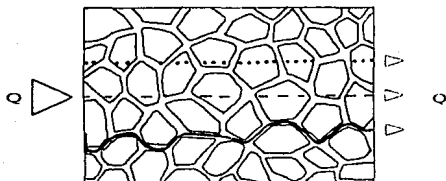
Cuando el aislamiento presenta una estructura como el de la figura # II.2.5(b), la transferencia de calor es principalmente por conducción sólida y gaseosa, ya que el tamaño pequeño de la celda reduce la transferencia de calor por radiación.

En los aislamientos de alta densidad, como el mostrado en la figura # II.2.5(c), el tamaño y número de celdas de aire es menor, lo cual incrementa la conducción sólida. Esto viene a contribuir mayormente al flujo total de calor, el que por otra parte disminuye por menores contribuciones de radiación y conducción gaseosa.

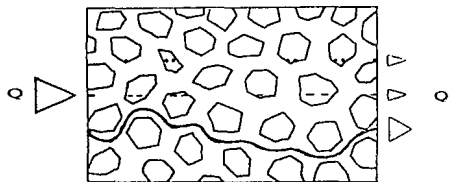
En la gráfica # II.2.2, se muestra una relación de magnitudes de los mecanismos de transferencia de calor, evaluados a



(a)



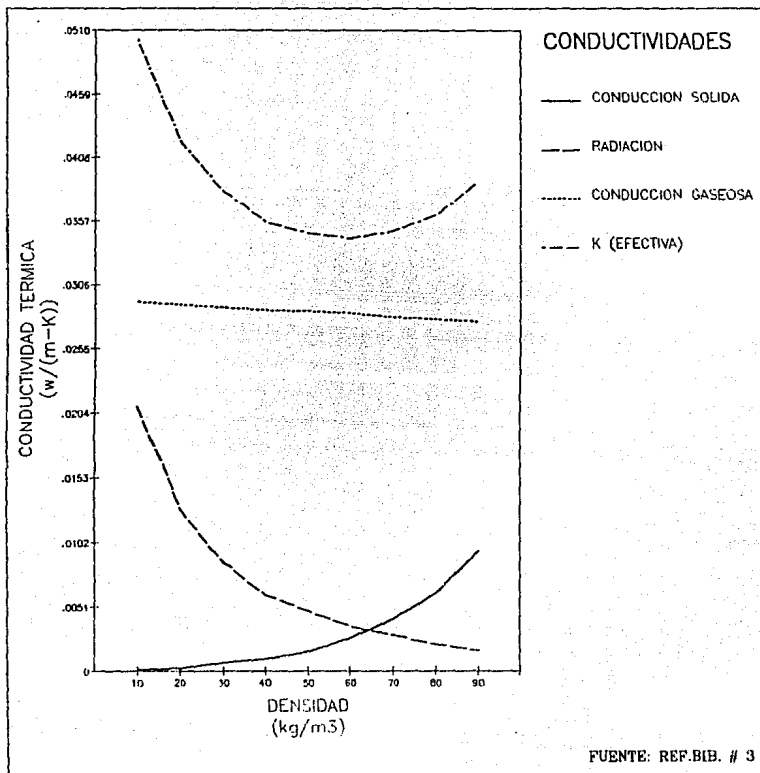
(b)



(c)

relación entre las magnitudes de los diferentes mecanismos de transferencia de calor a través de aislamientos con diferente celda.

Fig. # 11.2.5



Relación de magnitudes de los mecanismos de transferencia de calor de fibra de vidrio a 20° centígrados.

Gráf. # 11.2.2

20° C. en un aislante de fibra de vidrio con un diámetro promedio de fibra de 5 micrómetros.

Los termoaislantes granulares tienen altas propiedades termoaislantes, debido a los paquetes de aire encerrados en el material. Su estructura es sinuosa y por tanto, la trayectoria para la conducción sólida de calor es relativamente larga.

Los aislantes fibrosos tienen mayor cantidad de aire en su interior aumentando la conducción gaseosa, sin embargo la conducción por sus fibras es pequeña.

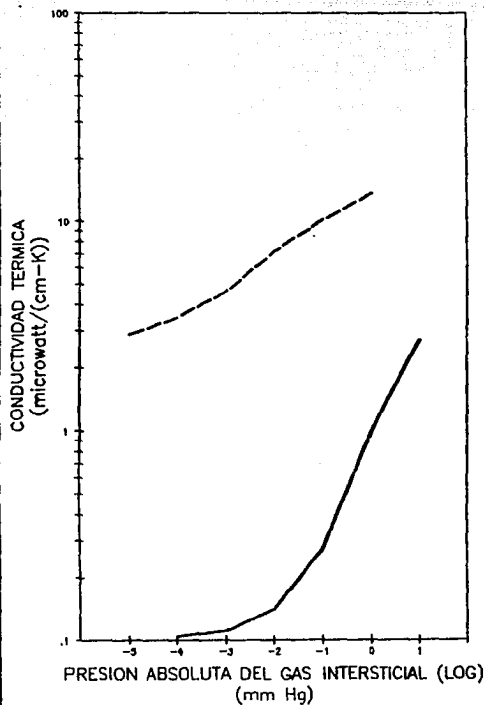
Los termoaislantes espumosos son bastante buenos, pues debido al gran número de burbujas de gases inertes, disminuye la conducción gaseosa, siendo mínima la conducción sólida.

Para reducir los mecanismos de transferencia de calor en los termoaislantes se recurre a ciertos métodos:

- Para reducir la conducción sólida.- Esto se logra al emplear materiales divididos finamente en partículas y por la orientación controlada de fibras de diámetros muy pequeños. Esto es con el fin de minimizar el área efectiva de corte transversal al flujo de energía, y maximizar la longitud real de la trayectoria de la dirección del flujo de calor.

- Para reducir la conducción gaseosa.- Para ello se disminuye la presión del gas intersticial del aislamiento. Presiones por debajo de la atmosférica en unos cuantos mm Hg, modifican la conductividad del gas al eliminar moléculas del medio. El efecto de la presión del gas intersticial del termoaislante, sobre la conductividad térmica para la perlita se muestra en la gráfica # II.2.3.

- Para reducir la radiación.- La elección de tamaños óptimos



MATERIALES:

— PERLITA CON AIRE (700 K)

- - - PERLITA CON HELIO (50 K)

FUENTE: REF.BIB. # 3

Efecto de la presión del gas intersticial  
en la conductividad térmica del material.

Gráf. # II.2.3

de partículas y el uso de fibras reflejantes o materiales de absorción, tiende a atenuar la radiación.

### c) CALOR ESPECIFICO.

El calor específico (C), es importante en aplicaciones de estados no estacionarios, donde la temperatura varía con el tiempo.

El calor específico es el cambio de la energía interna de una sustancia (por unidad de masa), al variar su temperatura.

El calor específico es una función termodinámica que tiene gran importancia y cuyos valores se determinan experimentalmente en función de su estado termodinámico.

A partir del calor específico se define otra propiedad llamada "capacidad calorífica" (CC). Esta representa la habilidad de una sustancia de retener calor. La capacidad calorífica es igual al calor específico multiplicado por la densidad del material (Ro).

$$CC = C * (Ro)$$

Así, el calor específico interviene de forma importante en la transferencia de calor a través del termoaislante.

Analizando la transferencia de calor en un aislamiento térmico, aplicando la ecuación de "difusión de calor" y considerando:

- No existencia de fuentes internas generadoras de calor dentro del material.

- Conductividad térmica constante a lo largo del material (conductividad térmica efectiva).

Resulta que:

$$\left(\frac{K}{C + R_0}\right) \nabla(T) = \frac{dT}{dt}$$

Definiéndose como difusividad térmica "a" al término:

$$a = \left(\frac{K}{C + R_0}\right)$$

A esta otra propiedad del material también se le llama, "velocidad de Propagación" de calor dentro del cuerpo.

### C) PROPIEDADES QUÍMICAS

#### a) RESISTENCIA AL FLUIDO QUE MANEJA.

El material aislante debe ser inerte ante los agentes químicos que circulan por las tuberías. Esto es para que en el caso de fugas accidentales o en reparaciones, el fluido no estropee el termoaislante.

Para seleccionar el material más adecuado al fluido que se maneja, los termoaislantes se pueden clasificar por su resistencia a ciertos agentes químicos. Por ejemplo: ácidos, álcalis, o solventes orgánicos.

Esta resistencia del termoaislante al producto químico se



puede estimar en una escala como la siguiente:

E: Excelente.

B: Bueno.

R: Regular.

D: Deficiente.

N: Nula.

#### b) RESISTENCIA A LA FORMACION DE MICROORGANISMOS

Debe evitarse la formación de hongos y la proliferación de insectos dentro del material termoaislante, pues estos con el tiempo, los debilitan y lo destruyen.

Así pues el material termoaislante no debe contener materiales que se biodegraden o que desprendan olores que inciten a los insectos a proliferar en el material.

#### c) FLAMABILIDAD

Para evitar la propagación del fuego durante un incendio o para proteger a un fluido explosivo, el aislamiento debe ser no flamable.

Una mayor cantidad de componentes orgánicos en un aislante lo hacen más combustible.

Para aplicaciones con bajo riesgo de incendio, es frecuente y más económico el uso de un aislante combustible, protegido con un recubrimiento resistente e incombustible, como el cemento monolítico.

La lana mineral es normalmente descrita como incombustible.

sin embargo puede ser la fuente de un incendio, cuando se usa en una planta de oxígeno con un contenido de aceite mayor al 0.01%

#### d) DESPRENDIMIENTO DE GASES TOXICOS.

En caso de incendio, los gases de combustión del termoaislante no deben ser peligrosos.

Al aplicar el poliuretano espumado, debido a que los isocianatos empleados pueden ser tóxicos y causar irritación bronquial, deben usarse mascarillas mientras dure el espumamiento.

Algunos adhesivos y compuestos resinosos de recubrimiento, pueden causar daño a los ojos e irritación en la piel (dermatitis). Por lo tanto, la protección mínima que debe seguirse es el uso de guantes y gafas.

#### e) RESISTENCIA AL MEDIO AMBIENTE

##### SIN FAVORECER LA CORROSION.

Los aislantes y sus protecciones externas, no deben ser afectados por el ambiente inmediato, el cual puede estar contaminado ocasionalmente por gases altamente corrosivos como  $H_2S$  y  $SO_2$ .

Las tuberías o protecciones del aislamiento echas de acero inoxidable, deben protegerse contra la corrosión en ambientes clorados ( $Cl^-$ ). Para ello pueden emplearse pinturas anticorrosivas, o una hoja delgada de aluminio como protección.

Los termoaislantes húmedos promueven la corrosión en las tuberías, principalmente el silicato de calcio y la lana mineral gris.

### 3 ) CRITERIOS DE SELECCION DEL AISLAMIENTO TERMICO.

\*\*\*\*\*

Para seleccionar el material termoaislante más adecuado, lo primero que debemos hacer, es conocer las condiciones bajo las cuales operará la tubería. Así, se requiere la siguiente información:

- Diagrama de proceso de la línea.
- Diagrama de utilización.
- Plano del arreglo de la tubería.
- Isométrico de la tubería.

Una vez obtenidas las condiciones bajo las cuales trabajará la tubería, determinaremos aquellas propiedades que requerirá el aislamiento.

Dependiendo de donde y en que trabajará el aislante, ciertas propiedades del mismo serán más importantes que otras. De acuerdo con dichas consideraciones, la selección del material debe responder a los siguientes aspectos:

- Tipo de servicio.
- Localización.
- Vida útil.
- Económico.

El análisis de cada uno de estos elementos conduce a establecer un juicio, totalmente válido para escoger de una manera óptima el material termoaislante.

A ) TIPO DE SERVICIO.

a) SERVICIO PARA ALTA TEMPERATURA.

Los materiales aislantes son clasificados de acuerdo a los rangos de temperatura en que pueden ser usados. Cuando la temperatura de operación alcanza ciertos límites superiores, los materiales se vuelven estructuralmente inestables o no son competitivos, debido a que presentan una conductividad térmica demasiado alta.

Para temperaturas de operación superiores a 35° C, deberá aislarse de acuerdo con la norma de PEMEX, para aislamiento térmico en servicio de alta temperatura.

Cuando se aísla en servicio de alta temperatura, se aísla para:

- Conservación de energía.
- Estabilidad en operaciones químicas.
- Protección de personal.

En el rango de temperaturas de 35° C a 100° C, se emplean una gran variedad de aislamientos, tanto orgánicos como inorgánicos. Algunos de los materiales más empleados para este rango de temperatura son:

- Corcho comprimido y granulado.
- Fibra de vidrio aglomerada con resinas orgánicas.
- Poliestireno celular expandido.
- Espumas de poliuretano.
- Fibras de madera con aglomerante adecuado.
- Perlita y vermiculite expandida.

El rango de 100° C a 454° C, comprende las condiciones en que se encuentran la mayoría de los procesos químicos, petroquímicos y sistemas de vapor.

Los aislamientos térmicos que más se emplean en este rango son:

- Fibra de vidrio celular.
- Fibra de vidrio con aglutinantes de alta temperatura.
- Lana de roca o de escoria mineral.
- Silicato de calcio.
- Perlita expandida.
- Silicato de sodio.

En el rango de 454° C a 815° C, se emplean materiales que soporten muy altas temperaturas. El límite superior de este rango de temperatura ya está próximo a la temperatura en donde se inicia el uso de materiales refractarios (870° C). Entre mayor es la temperatura de trabajo, menor es el número de materiales disponibles que resistan dichas temperaturas. Algunos de los materiales más empleados en este rango de temperaturas son:

- Fibra de vidrio hasta 538° C.
- Fibras minerales.
- Silicato de calcio.
- Perlita expandida.
- Fibras cerámicas.
- Tierras diatomáceas.

## b) SERVICIO PARA BAJA TEMPERATURA.

En los rangos de baja temperatura, casi todos los materiales son estructuralmente estables y reúnen las características técnicas para poder ser instalados. Sin embargo, la selección en base a los costos, elimina a todos aquellos materiales con altos valores de conductividad térmica.

Segun la norma de PEMEX en aislamiento térmico para servicio de baja temperatura (para temperaturas de 35° C o menores), se aislará por las siguientes razones:

- Para conservación de calor.
- Para evitar la condensación de humedad sobre las tuberías.

Para el rango de temperaturas entre -184° C y -84° C, los aislamientos que más se usan son plásticos celulares como:

- Espuma de poliuretano.
- Espuma de poliestireno.

Estas espumas se forman por la reacción de dos compuestos químicos, donde el aire o gas de uno de los componentes queda atrapado en las celdas de la espuma. Las celdas formadas son tan pequeñas que reducen en gran medida la transferencia de calor por conducción del gas, resultando así las más bajas conductividades térmicas. Por su estructura de celdas cerradas, las espumas impiden la absorción de agua, lo que permite conservar la capacidad aislante, aún en las condiciones más extremas de humedad.

En el rango de temperaturas comprendido entre -84° C a 100° C, se emplean comúnmente:

- Espuma de poliuretano.
- Espuma de poliestireno.
- Fibra de vidrio.

Es importante el recordar que los espesores para bajas temperaturas, suelen ser mas grandes que los de una misma diferencia de temperatura para servicio de alta temperatura. Esto es asi para evitar la condensación de humedad del ambiente sobre la tubería y porque la energía térmica es más costosa.

c) RESISTENCIA A LOS AGENTES  
INTERNOS DEL SISTEMA AISLANTE.

RESISTENCIA LOS ESFUERZOS MECANICOS.

El material termoaislante debe ser capaz de soportar las expansiones y contracciones a que estará sometido, así como a la vibración de la tubería.

La vibración se debe tomar en cuenta, sobre todo cuando se tienen temperaturas altas. Por ejemplo, si un aglutinante orgánico presente en un producto como la fibra de vidrio, es llevado más allá de

su temperatura de fusión, el aislante se disgrega y por efecto de la vibración, la fibra de vidrio comienza a distribuirse heterogéneamente en la superficie aislada. Este es un caso típico de falla en los sistemas termoaislantes en tuberías.

El problema de vibración afecta también a los productos de lana mineral, sobre todo cuando se conforman con fibras largas y cortas, no siendo uniforme su longitud.

#### RESISTENCIA QUIMICA.

El material termoaislante debe ser inerte ante el fluido que conduce. Esto alargará la vida del material y evitará la posible inflamación de mismo.

En el transporte de líquidos volátiles el aislamiento no debe ser absorbente. Esto es para evitar durante posibles fugas, que el aislante absorba el líquido, disminuyendo así la posibilidad de ignición. El vidrio celular es recomendable para prevenir estos problemas, o también puede usarse silicato de calcio.

#### d) TIPO DE INSTALACION.

#### FORMAS DISPONIBLES.

Se pueden eliminar aquellos termoaislantes que no se consiguen de la forma deseada en el mercado. Para el caso de tuberías, se requieren materiales en forma de colchoneta flexible o preformado. Este último puede ser en medios, cuartos, etc.



No se emplearán placas rígidas o materiales en polvo.

El aislamiento preformado es conveniente manejarlo en medias cañas, por su facilidad de instalación en tuberías con diámetros de hasta 300 mm (12"). Entre mayor sea el diámetro o mayor sea el número de piezas, más difícil y costosa será su instalación.

#### ARREGLO EN MULTICAPA.

En ocasiones el termoaislante se instala no en una, sino en varias capas de material sobrepuesto.

La construcción en multicapa minimiza los esfuerzos térmicos del aislamiento, al reducir la diferencia de temperaturas en cada capa.

La tabla # II.3.1 muestra los espesores recomendados por la norma de PEMEX, para cada capa en arreglos múltiples.

Este tipo de construcción evita las pérdidas de calor excesivas y temperaturas superficiales altas en juntas abiertas por la dilatación de la tubería. Esto elimina las cubiertas quemadas o calcinadas. También elimina los riesgos potenciales de incendio, al exponer los recubrimientos a temperaturas más altas en las juntas.

#### B) LOCALIZACION.

##### a) POSICION DE LA TUBERIA.

En líneas horizontales conviene aplicar aislantes rígidos como el silicato de calcio, pues sobre ellas se pueden presentar esfuerzos mecánicos con más frecuencia que en las tuberías verticales.

ESPESOR TOTAL	CAPA INTERIOR	CAPA INTERMEDIA	CAPA EXTERIOR
milímetros			
38	38	---	---
51	51	---	---
64	64	---	---
76	76	---	---
89	89	---	---
102	102	---	---
115	51	---	64
128	64	---	64
140	64	---	76
152	76	---	76
165	76	---	89
178	89	---	89
191	89	---	102
204	102	---	102
216	76	64	76
228	76	76	76
241	76	76	89
254	89	76	89
267	89	89	89
280	89	89	102
293	102	89	102
306	102	102	102

Espeores para instalar aislamientos térmicos  
en multicapa sobre tuberías.

Tabla # 11.3.1

En las tuberías verticales conviene usar un material fibroso, aunque en este caso, para protección del sistema, es recomendable usar material rígido hasta una altura máxima de 3 m. que es donde el personal puede causar daño al aislamiento.

b) RESISTENCIA A LOS AGENTES  
EXTERNOS DEL SISTEMA AISLANTE.

RESISTENCIA AL MEDIO AMBIENTE.

La localización de la instalación es importante pues nos indica el entorno de la misma, mostrando que factores externos pueden alterar el sistema aislante.

El aislamiento térmico debe soportar las condiciones climatológicas que rodean al material

La protección del aislamiento será mayor en exteriores que en interiores, contra las condiciones climatológicas. Se seleccionará el acabado más conveniente para el tipo de ambiente: normal, húmedo, salino, azufrero, clorado, ácido, alcalino, etc.

Por ejemplo, si va a ser instalado un material termoaislante en ambientes muy húmedos, los aislantes granulares o el vidrio celular son buenos candidatos por su poca absorción de agua. Los productos de silicato de calcio, podrán emplearse si se les acondiciona una chaqueta de protección impermeable.

Cuando la línea esta en el exterior, deben sellarse bien los traslapes entre las piezas del aislamiento. De no hacerse esto, se permitiría una trayectoria directa para los agentes, como el agua.

## RESISTENCIA A LOS ABUSOS MECANICOS.

Los abusos mecánicos como golpes, pisotones y demás, deberán considerarse al seleccionar el termoaislante.

Las tuberías aisladas e instaladas sobre equipos o en ellos, son frecuentemente dañadas cuando se efectúa mantenimiento a los mismos. También son maltratados los aislamientos de las tuberías en las uniones de bridas y válvulas donde se efectúan maniobras frecuentemente.

## RESISTENCIA AL FUEGO.

El aislamiento térmico no debe propiciar la propagación del fuego y menos en sitios con sustancias o equipos peligrosos.

Al quemarse el aislamiento, se puede dilatar la tubería y ésta puede provocar problemas a la estructura que la soporta.

Si la tubería se localiza en un área protegida contra incendio, el silicato de calcio en doble capa, con camisa de acero inoxidable y fijado mediante cintas, es un sistema adecuado.

### C ) VIDA UTIL.

Un factor importante en la especificación del aislamiento térmico apropiado para una aplicación específica, es la vida útil del sistema.

La vida útil de un material termoaislante es calculada de acuerdo a la vida útil de la tubería que aísla.

Obviamente los requerimientos de aislamiento varían de acuerdo a las necesidades. Así, las especificaciones de aislamiento en una unidad experimental de 2 años, serán diferentes que para una planta de fuerza que vaya a operar durante 40 años.

En efecto, si un buen sistema es caro, resulta fácil justificarlo con una vida útil muy grande.

El tiempo de vida útil de un termoaislante depende de muchos factores, por ejemplo: Los aislantes no deben sufrir ningún encogimiento cuando sean expuestos a la luz del sol, ni fracturarse al someterse a congelamiento, ser inodoro, repelente a los insectos y no permitir el crecimiento de hongos.

El uso de selladores y barreras de vapor eficientes son indispensables. En la instalación de sistemas aislantes, los selladores que se seleccionen deben ser materiales que no se degraden por las condiciones ambientales en el lugar de trabajo. Las barreras de vapor deben ser suficientemente impermeables y difícilmente desgarrables, puesto que ésta es la vestidura del aislante y la que determina la durabilidad y eficiencia del sistema. En forma general se establece que la corrosión en tuberías aisladas, es causa de fallas en los selladores y barreras de vapor.

En los acabados metálicos existe la posibilidad de formación de una celda electrolítica. Esto puede ser porque el aislamiento tenga algún aglutinante que se disuelva con la humedad (silicato de sodio por ejemplo) y origine un flujo de corriente entre el metal de acabado y el metal de la pared aislada, originando una reacción electroquímica de corrosión.

Para éstos casos es necesario dar una protección adicional,

aplicando una película de polietileno en la parte interna de la lámina, o bien aplicando sobre el aislante una barrera de humedad de material asfáltico. También se puede resolver el problema aplicando una emulsión asfáltica en el traslape de la lámina de acabado.

Es importante que tanto las pijas como los flejes sean del mismo material que la lámina de acabado, o de acero inoxidable, para no tener corrosión galvánica.

En general la instalación del aislamiento térmico deberá ser tal, que los cambios que puedan sufrir las propiedades de los mismos durante su vida útil sean mínimos.

#### D ) ECONOMIA.

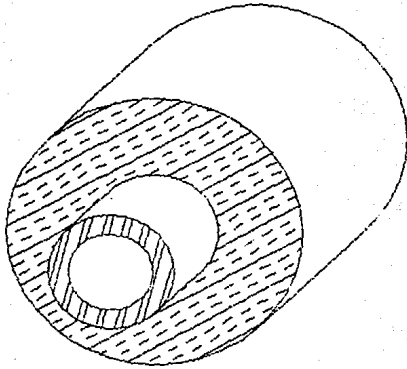
La instalación del aislamiento térmico obedece fundamentalmente al ahorro de recursos de una empresa.

Una vez seleccionado el material termoaislante que cumpla con los requerimientos de la instalación, pueden resultar varios y no solo uno. Sin embargo, se optará por aquel material que aporte mayor beneficio económico.

Puede ser que convenga emplear los materiales guardados en el almacén, aquellos que se obtengan más rápido o los que proporcione cierto proveedor de termoaislantes.

Para seleccionar un material de entre varias alternativas, es necesario comparar económicamente la instalación de cada uno de ellos. Así, es importante determinar el espesor de la capa aislante para calcular la cantidad de material termoaislante que requerirá cada caso.

# III



**CALCULO DEL ESPESOR DE EL  
MATERIAL TERMOAISLANTE**

## 1 ) TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS TUBERIAS.

=====

Debido a que las tuberías transportan fluidos a altas o bajas temperaturas con respecto a la temperatura ambiente, se presenta el fenómeno de transferencia de calor en ellas.

Los aislamientos tienen la función de controlar la transferencia de calor entre las tuberías y el ambiente.

Los mecanismos de transferencia de calor, cuyo estudio es básico para determinar el cálculo de la transferencia total de energía, son los siguientes:

- Conducción ( $Q_k$ ).
- Radiación ( $Q_r$ ).
- Convección ( $Q_c$ ).

Estos tres mecanismos de transferencia de calor actúan juntos y su correcta evaluación será la base para el cálculo del espesor del material termoaislante.

Enseguida veremos cada uno de estos mecanismos de transferencia de calor.

### A ) TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION.

La conducción es un mecanismo de transferencia de calor entre átomos adyacentes de la estructura de la materia estática, desde un punto de mayor temperatura a otro punto más frío.

Puede establecerse la capacidad de un material para permitir



la transferencia de calor a través de él, en base a su conductividad térmica (K).

El factor K es determinado experimentalmente para cada material. Este es un complicado proceso y rara vez los resultados de diferentes laboratorios concuerdan exactamente.

Afortunadamente es posible tener un considerable error en el factor K, sin afectar mayormente los cálculos de la temperatura exterior del termoaislante. Por ejemplo, un error del 10% en el factor K, generalmente dará un error en la temperatura exterior del aislamiento del 1 %.

La transferencia de calor a través de materiales sólidos (conducción), esta representada por La Ecuación de Fourier:

$$Q_k = -K A \nabla T \quad (1.A1)$$

$Q_k$ : Transferencia de calor por conducción.

K: Conductividad térmica del material.

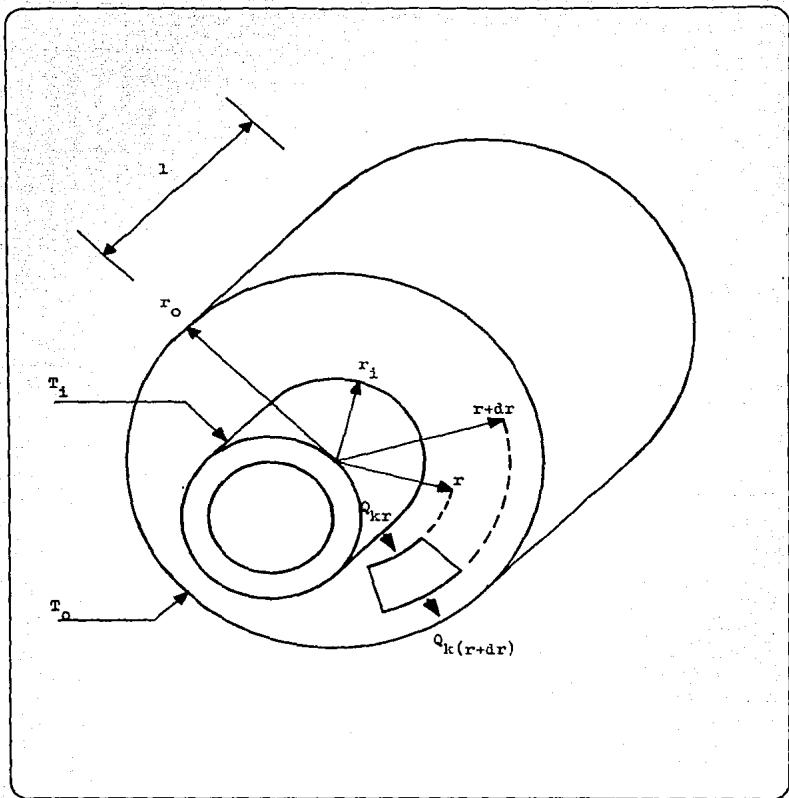
A: Area de transferencia de calor.

T: Gradiente de temperatura en el cuerpo,  $T = T(x,y,z)$ .

Para analizar la transferencia de calor en tuberías, nos valdramos del elemento diferencial mostrado en la figura # III.1.1.

Aplicando la 1ª ley de la termodinámica a un elemento diferencial de un material termoaislante. tenemos:

$$Q_{kr} = Q_k(r+dr) \quad (1.A2)$$



Transferencia de calor por  
conducción en las tuberías.

Fig. # III.1.1

Por la serie de Taylor sabemos que:

$$Q_{kr}(r+dr) = Q_{kr} + \frac{dQ_{kr}}{dr} dr \quad (1.A3)$$

Sustituyendo la ecuación (1.A3) en la ecuación (1.A2):

$$Q_{kr} = Q_{kr} + \frac{dQ_{kr}}{dr} dr$$

Anulando términos:

$$0 = \frac{dQ_{kr}}{dr} \quad (1.A4)$$

Por otro lado, tomando la ecuación (1.A1) para coordenadas cilíndricas, (que es el caso de termoaislantes en tuberías) y considerando:

- Estado estacionario.
- Sólo existe flujo de calor radial.
- Bajo las condiciones de operación, K se considera constante.

Obtenemos así la siguiente expresión:

$$Q_k = -K (2 \pi r l) \left( \frac{dT}{dr} \right) \quad (1.A5)$$

Sustituyendo la ecuación (1.A5) en la ecuación (1.A4):

$$\frac{d}{dr} [-K (2 \pi r l) \left( \frac{dT}{dr} \right)] = 0$$

De la ecuación anterior obtenemos:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{cte_0}{-K (2 \pi r l)} = \frac{C_1}{r} \quad (1.A6)$$

Donde  $cte_0$  es una constante de integración y  $C_1$  es una agrupación de términos ctes.

Resolviendo la ecuación diferencial (1.A6):

$$T = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (1.A7)$$

Para resolver la ecuación (1.A7) hay que definir las condiciones de frontera:

- En  $r = r_1$ ,  $T = T_1$ .
- En  $r = r_0$ ,  $T = T_0$ .

Sustituyendo las condiciones de frontera en la ecuación (1.A7), obtenemos la distribución de temperatura en termoaislantes con forma cilíndrica hueca:

$$T = T_1 + \left[ \frac{(T_0 - T_1)}{\ln(r_0/r_1)} \right] \frac{r}{r_1} \quad (1.A8)$$

Sustituyendo la ecuación (1.A8) en la ecuación (1.A5), se obtiene la expresión para calcular la transferencia de calor a través de un material cilíndrico, (aislamientos térmicos en tuberías):

$$Q_w = (2 \pi K l) \frac{(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (1.A9)$$

### B ) TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION.

La radiación es un mecanismo de transferencia de calor que se lleva a cabo entre dos puntos distantes de diferente nivel energético, sin necesidad de un medio físico de transporte y sin que se eleve necesariamente la temperatura del espacio entre los dos puntos.

Existen dos teorías que pretenden explicar el fenómeno:

La teoría ondulatoria, explica que la energía se transmite mediante ondas electromagnéticas entre dos puntos distantes de diferente nivel energético.

La teoría cuántica, expresa que la energía es transportada en partículas discontinuas llamadas "cuantums".

La manera práctica de cuantificar la contribución de la energía por radiación, es presentarla englobada en un coeficiente ficticio equivalente de convección, lo que no hace perder exactitud en los resultados. La ley que rige este mecanismo, es la ley de Stefan-Boltzman.

La radiación involucra como factor importante, la emisividad superficial, (que para la mayoría de los materiales es aproximadamente de 0.5), dependiendo esta de la brillantez del material. Algunos

valores de emisividad pueden verse en la tabla # III.1.1.

Con frecuencia la radiación y la convección se manifiestan simultáneamente en los casos de transferencia de calor. Por ello es conveniente usar el coeficiente de transferencia de calor por radiación ( $H_r$ ). Este describe la contribución de la radiación en una forma análoga al coeficiente convectivo ( $H_c$ ). El objetivo de tal tratamiento es determinar una convección superficial total o efectiva ( $H_T$ ) definida como (\*):

$$H_T = H_r + H_c \quad (1.B1)$$

Partiendo de la ecuación tradicional para la transferencia de calor por radiación de Stefan-Boltzman:

$$Q_r = \sigma A F E (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.B2)$$

$Q_r$ : Transferencia de calor por radiación.

$\sigma$ : Cte. de Stefan-Boltzman ( $5.6697 \cdot 10^{-8}$ ) [w/(m<sup>2</sup>-K<sup>4</sup>)].

A: Area de transferencia de calor.

F: Factor de visión.

E: Emisividad superficial.

T<sub>1</sub>: Temperatura absoluta del cuerpo más caliente.

T<sub>2</sub>: Temperatura absoluta del cuerpo más frío.

(\*) Ref.Bib. n° 8.

TIPO DE SUPERFICIE	TEMPERATURA DE SUPERFICIE (°C)	EMISIVIDAD (E)
<b>ALUMINIO</b>		
PULIDO (99% PURO)	200 - 600	0.04 - 0.06
LAMINA COMERCIAL	100	0.09
PLACA ASPERA	40	0.07
MUY OXIDADO	100 - 550	0.20 - 0.33
<b>ACERO</b>		
LAMINA DE ACERO ESMERILADA	1000	0.55
LAMINA DE ACERO ONDULADA	40	0.66
LAMINA DE ACERO OXIDO FUERTE	40	0.80
ACERO PULIDO	40 - 250	0.07 - 0.10
<b>LATON</b>		
PULIDO	40	0.07
PLACA MATE	40 - 250	0.22
OXIDADO	40 - 250	0.46 - 0.56

Emisividad superficial en algunos materiales.

Tabla # III.1.1

Obtenemos así una ecuación más práctica y específica para tuberías aéreas (\*):

$$Hr = 0.54035 E \frac{(0.018 T_s + 4.92)^4 - (0.018 T_a + 4.92)^4}{T_s - T_a} \quad (1.B3)$$

Hr: Coeficiente de radiación equivalente. [w/(m<sup>2</sup>-K)]

Ts: Temperatura de la superficie exterior de la tubería. [°C]

Ta: Temperatura ambiental sobre la tubería. [°C]

Al combinar la ecuación (1.B3) con la ecuación (1.B1), obtenemos una forma simplificada para calcular la transferencia de calor por radiación.

### C ) TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION.

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que opera a nivel macromolecular. La convección libre se presenta en los fluidos por el desplazamiento de masas, debido esto, al cambio de densidad ocasionado por el flujo de calor. Si por algún medio externo se presenta una mayor velocidad de desplazamiento del fluido, se aumentará la transferencia de calor, a esto se le denomina, convección forzada.

Reynolds clasificó el régimen de flujo que se puede presentar en una fase, ayudando esto a cuantificar el fenómeno.

El cálculo de la convección se basa en fórmulas experimentales

(\*) Ref.Bib. n° 8.



como tal, está sujeta al error normal experimental. Por ejemplo, el efecto de las variaciones del viento de acuerdo al ángulo al cual este golpea sobre la superficie. La existencia de superficies calientes cercanas, o las variaciones de la temperatura ambiente.

La convección exterior en la tubería se presenta entre el aire en movimiento y la pared exterior del termoaislante.

La ley de enfriamiento de Newton modela la transferencia de calor por convección:

$$Q_c = H_c A (T_s - T_a) \quad (1.C1)$$

$Q_c$ : Transferencia de calor por convección.

$H_c$ : Coeficiente convectivo.

$A$ : Área de transferencia de calor.

$T_s$ : Temperatura exterior de la tubería.

$T_a$ : Temperatura ambiental sobre la tubería.

Todas las variables anteriores son perfectamente cuantificables, excepto  $H_c$ . El factor  $H_c$  es difícil de medir.

Algunos valores típicos de  $H_c$  para gases son (\*):

- Convección libre: 5-25.

- Convección forzada: 25-250.

Existen muchas fórmulas para calcular el coeficiente convectivo, la mayor parte de ellas experimentales. Dichas fórmulas pueden ser para convección libre o forzada.

En las siguientes fórmulas, todas las propiedades se evaluarán

(\*) Ref. Bib. n° 7.

a la temperatura de película (Tf):

$$T_f = (T_s + T_a)/2$$

Ts: Temperatura de la superficie exterior del termoaislante.

Ta: Temperatura ambiental sobre el termoaislante.

a) CONVECCION LIBRE.

Una de las fórmulas más empleada por ser bastante completa, es la ecuación de Mc Adams (\*):

$$H_c = (K/L) C Ra^n \quad (1.02)$$

Donde:

K: Conductividad térmica.

Ra: Número de Rayleigh

$$Ra = Gr Pr$$

Gr: Número de Grashoff.

$$Gr = \frac{g \beta \theta_s L^3 \rho^2}{\mu^2}$$

(\*) Ref. Bib. n° 6.

Pr: Número de Prandtl.

$$Pr = \frac{M C_p}{K}$$

Ro: Densidad del fluido.

M: Viscosidad cinemática. [kg/(m·s)]

g: Cte de la gravedad terrestre.

Cp: Calor específico.

B: Coef. de expansión volumétrica.

$B = 1/T_f$  (Tf [≠] K, para gas ideal.)

$$\theta_s = T_s - T_a$$

Si la tubería es vertical:

- Laminar ( $10^4 < Ra < 10^7$ ),  $C = 0.59$  y  $n = 1/4$
- Turbulento ( $10^7 < Ra < 10^{12}$ ),  $C = 0.1$  y  $n = 1/3$
- L: Altura de la tubería.

Si la tubería es horizontal:

- Laminar ( $10^4 < Ra < 10^7$ ),  $C = 0.53$  y  $n = 1/4$
- Turbulento ( $10^7 < Ra < 10^{12}$ ),  $C = 0.13$  y  $n = 1/3$
- L: Diámetro exterior de la tubería.

Una ecuación simplificada para el aire la da VIVAS: (\*)

$$H_c = A_1 A_2 A_3 \dots \quad (1.03)$$

A1:

Tubería Vertical.

- Si  $D < 0.6$  m (24"),  $A_1 = 0.80507 D^{-0.177}$

- Si  $D > 0.6$  m (24"),  $A_1 = 1$

Tubería Horizontal.

- Si  $D < 0.6$  m (24"),  $A_1 = 0.66582 D^{-0.2}$

- Si  $D > 0.6$  m (24"),  $A_1 = 0.9806$

A2:

$$A_2 = 10.9(T_s + T_a) + 4921^{-0.177} [1.8(T_s - T_a)]^{0.206}$$

A3:

$$A_3 = 5.6779627 + 0.7383$$

D: Diámetro exterior de la tubería. (m)

T<sub>s</sub> y T<sub>a</sub> están dadas en grados centígrados

H<sub>c</sub> [=] w'/(m<sup>2</sup>-K)

(\*) Ref.Bib. n° 8.

b) CONVECCION FORZADA.

Las fórmulas siguientes se refieren a flujo cruzado sobre cilindros (\*):

Mc ADAMS.

$$h_c = (K/D) B Re^n \quad (1.C4)$$

Re: Número de Reynolds.

$$Re = \frac{V D \cdot \rho_o}{M}$$

V: Velocidad del fluido (aire).

D: Diámetro de la tubería.

$\rho_o$ : Densidad del fluido.

M: Viscosidad del fluido.

Los valores de n y B, se obtienen de la siguiente tabla:

Re	B	n
0.4 - 4	0.891	0.330
4 - 40	0.821	0.385
40 - 4,000	0.615	0.466
4,000 - 40,000	0.174	0.618
40,000 - 400,000	0.0239	0.805

(\*) Ref. Bib. n° 8.

WHITAKER.

M: Viscosidad cinemática. [kg/(m s)]

M<sub>s</sub>: Viscosidad cinemática evaluada a T<sub>s</sub>. [kg/(m s)]

Pr: Número de Prandtl.

Re: Número de Reynolds.

K: Conductividad del fluido.

D: Diámetro de la tubería.

$$h_c = (K/D) (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{0.67}) Pr^{0.4} (M/M_s)^{0.25} \quad (1.C5)$$

Deben cumplirse las siguientes condiciones:

- $40 < Re < 10^5$ .
- $0.67 < Pr < 300$ .

ECKERT Y DRAKE.

Pr<sub>s</sub>: Prandtl evaluado a T<sub>s</sub>.

Si  $1 < Re < 1,000$  se emplea la sig. ecuación:

$$h_c = (K/D) (0.43 + 0.5 Re^{0.5}) Pr^{0.33} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (1.C6a)$$

Si  $1,000 < Re < 10^5$  se utiliza:

$$h_c = (K/D) (0.25 Re^{0.4} Pr^{0.33}) (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (1.C6b)$$

Para poder comparar los valores que se obtienen de cada una de las ecuaciones anteriores, se resolverán enseguida dos ejemplos.

Ejemplo N° 1: Alta temperatura.

Calcular el coeficiente convectivo empleando las fórmulas anteriores de convección forzada, para una tubería horizontal bajo las siguientes condiciones:

$T_s = 800 \text{ K}$	$R_o = 0.6423 \text{ kg/m}^3$
$T_a = 300 \text{ K}$	$M = 2.348 \cdot 10^{-8} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
$T_f = 550 \text{ K}$	$M_s = 3.625 \cdot 10^{-8} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
$D = 0.2 \text{ m}$	$Pr = 0.680$
$V = (1-30)$	$Pr_s = 0.689$
	$C_p = 1,039.2 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
	$K = 0.4360 \text{ w/(m}\cdot\text{K)}$

Evaluando las diferentes ecuaciones para diferentes valores de  $V$  (velocidad del viento), obtenemos la tabla # III.1.2.

Ejemplo N° 2: Baja temperatura.

Calcular el coeficiente convectivo empleando las fórmulas anteriores de convección forzada, para una tubería horizontal bajo las siguientes condiciones:

$T_s = 298 \text{ K}$	$R_o = 1.1774 \text{ kg/m}^3$
$T_a = 300 \text{ K}$	$M = 1.983 \cdot 10^{-8} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
$T_f = 299 \text{ K}$	$M_s = 1.983 \cdot 10^{-8} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

$D = 0.2 \text{ m}$        $Pr = 0.708$   
 $V = (1-30)$        $Prs = 0.708$   
 $Cp = 1,005.7 \text{ J/(kg-K)}$   
 $K = 0.02624 \text{ w/(m-K)}$

Evaluando las diferentes ecuaciones para diferentes valores de  $V$  (velocidad del viento), obtenemos la tabla # III.1.3.



VELOCIDAD DEL VIENTO V (m/s)	COEFICIENTE CONVECTIVO (Hc) w / (m <sup>2</sup> -K)		
	Mc ADAMS	WHITAKER	ECKERT & DRAKE
1	68.76	76.89	73.09
2	105.52	113.97	110.79
3	135.57	143.71	141.30
4	161.95	169.52	167.92
5	185.90	192.77	191.97
6	208.07	214.17	214.17
7	226.87	234.16	234.92
8	248.56	253.00	254.51
9	267.10	270.91	273.15
10	290.74	288.03	290.98
20	507.97	431.84	441.04
30	704.03	548.17	562.51

Comparación entre los valores de convección  
forzada de distintas ecuaciones (Ej. # 1).

Tabla # III.1.2

VELOCIDAD DEL VIENTO V (m/s)	COEFICIENTE CONVECTIVO (Hc) w / (m <sup>2</sup> -K)		
	Mc ADAMS	WHITAKER	ECKERT & DRAKE
1	7.53	8.66	8.01
2	11.55	12.90	12.14
3	14.84	16.31	15.49
4	18.24	19.28	18.41
5	21.83	21.96	21.04
6	25.28	24.43	23.48
7	28.62	26.74	25.75
8	31.87	28.92	27.90
9	45.04	30.99	29.94
10	38.14	32.97	31.89
20	66.64	---	---
30	92.36	---	---

Comparación entre los valores de convección  
forzada de distintas ecuaciones (Ej. # 2).

Tabla # III.1.3

## 2 ) ESPESOR ECONOMICO.

=====

La cantidad de energía térmica perdida a través de una tubería, depende de el espesor de el aislamiento térmico que se le instale.

Cuando el objetivo de la instalación del material termoaislante es el ahorro de energía, a el espesor del aislamiento se le denomina "espesor económico".

El espesor económico se define como el espesor cuyo costo anual uniforme equivalente (CAUE), es mínimo. Dicho costo considera tanto la pérdida de energía como el costo de instalación del material termoaislante.

Un incremento en el espesor económico incrementa el costo de la instalación termoaislante, disminuyendo las pérdidas de energía; sin embargo, la suma total produce un costo mayor que el costo logrado con el espesor económico. Inversamente, un decremento en el espesor económico, disminuye el costo de la instalación, pero incrementa el costo en pérdidas de energía; el costo total será un costo mayor que el costo obtenido con el espesor económico.

El cálculo de el espesor económico para una instalación industrial no es sencillo, debido al gran número de variables y cálculos que se requieren. Los estudios amplios de todos los factores que afectan a los espesores económicos reales, solo se justifican para las grandes instalaciones.

Para determinar el espesor económico, es necesario hacer un análisis económico. Existen tres métodos básicos para la evaluación:

económica de alternativas. Estos métodos deben dar decisiones idénticas en cuanto a cual alternativa es la mejor. En el caso de los aislamientos térmicos, cada espesor es una alternativa de selección.

Estos tres métodos básicos son:

- Evaluación del valor presente (VP).
- Evaluación de la tasa de retorno (TR).
- Evaluación del costo anual uniforme equivalente (CAUE).

El CAUE significa que todos los desembolsos (irregulares y periódicos), deben convertirse a un costo anual uniforme equivalente, es decir, una cantidad de fin de año que es la misma cada año.

Se ha escogido el método del (CAUE), pues puede comparar alternativas con diferente vida útil de una manera sencilla. Esto es, el CAUE de una alternativa, representa el mismo valor de la misma para siempre.

En una evaluación económica de una instalación térmica, se deben tener costos ascendentes y costos descendentes.

Los costos ascendentes, son función de la inversión en el sistema expresados como "costos fijos", que se incrementan al aumentar el espesor del material termoaislante.

Los costos descendentes, son función del ahorro de energía obtenido por un determinado espesor de material termoaislante y se denominarán "costos variables". Al incrementarse el espesor del termoaislante, disminuirán las pérdidas de energía.

A ) DETERMINACIÓN DE COSTOS FIJOS.

a) PLANTEAMIENTO DE FORMULAS.

Los costos fijos anuales uniformes (CF) se componen de dos tipos de costos:

- Inversión inicial de la instalación, anualizada (P).
- Costos anuales que requiere la instalación (A).

Así resulta que:

$$CF = P + A \quad ; \quad [\$ / \text{año}]$$

Ahora bien P y A se determinan así:

$$P = Fan [I (1 + F + E)]$$

I: Costo del material termoaislante en el tramo analizado.(\$)

F: Factor que involucra los costo de flete, almacenaje, acabado, mano de obra y costos indirectos en la instalación del termoaislante, como un porcentaje de (I).[adimensional]

Fan: Factor que transforma un valor de una fecha fija, a una serie de costos anuales uniformes equivalentes durante un determinado número de periodos (n) y a través de una tasa de interés (i). (\*)

$$Fan = \left[ \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad ; \quad [1 / \text{año}]$$

(\*) Ref.Bib. n° 11.

E: Factor que incluye gastos para imprevistos como un porcentaje de (I). [adimensional]

$$A = M + R$$

M: Costos de mantenimiento anual de la instalación termoaislante. [\$/año]

R: Depreciación anual uniforme equivalente para n periodos. [\$/año]

$$R = F_m A_n F_{pm} R_m$$

F<sub>pm</sub>: Factor que transforma una serie de costos anuales uniformes, durante un determinado número de periodos (m) y a través de una tasa de interés (i), a un valor actual (presente). (\*)

$$F_{pm} = \frac{(1+i)^m - 1}{i(1+i)^m} \quad ; \text{ [año]}$$

R<sub>m</sub>: Depreciación anual de la instalación, durante cierto número de periodos (m), con un valor final de salvamento nulo. [\$/año]

$$R_m = \frac{I(1+F)}{m}$$

El factor R<sub>m</sub> es la depreciación anual durante m periodos, basada en el método de "línea recta". La depreciación se refiere al envejecimiento del material a lo largo del tiempo, con lo cual los impuestos que implica se reducen.

(\*) Ref. Bib. n° II.

b) CALCULO DE VARIABLES.

I

Es el costo del material termoaislante. Este dependerá del espesor y tipo de material a ser empleado.

F

Estos costos pueden ser muy variados, ya que dependen del caso real analizado. Algunos costos típicos son:

- Material accesorio (alambre, pijas, fleje, acabado metálico, cemento monolitico, mástic). Aprox. \_\_\_\_ (0.4 I).
- Flete aproximado. \_\_\_\_\_ (0.1 I).
- Costos indirectos. \_\_\_\_\_ (0.1 I).
- Mano de obra. \_\_\_\_\_ (0.2 I).

En promedio podría tomarse para F un valor de 0.75.

E

Generalmente se aparta una cantidad de dinero para gastos imprevistos o emergentes. Por lo regular se toma 0.05

n

Se refiere a la vida útil del material. Esta dependerá del tipo de material y del servicio que dé, pero por lo general para complejos petroquímicos, se requieren vidas útiles de aprox. 12 años.

1

Es la tasa anual inflacionaria que incrementa el valor de la instalación a través del tiempo. Por datos del Banco de Mexico sabemos que (i): (% anual)

- Abril de 1989	47.30
- Marzo de 1989	48.70
- Febrero de 1989	49.37
- Abril de 1988	117.16
- Marzo de 1988	135.88

M

Para mantenimiento anual de la instalación termoaislante se asigna normalmente el (0.03 I).

m

Es el tiempo en el cual el material termoaislante pierde todo su valor en los libros de contabilidad debido a su servicio. Después del período m, la instalación tiene un valor cero en libros, aunque su valor real sea diferente de cero. En los aislamientos térmicos se toma como valor de m, aproximadamente 7 años.

## B ) DETERMINACION DE COSTOS VARIABLES.

### a) PLANTEAMIENTO DE FÓRMULAS.

Los costos variables anuales uniformes (CV), se calculan:



$$CV = Q t N$$

Q: Transferencia de calor entre la tubería y el medio ambiente que la rodea (w).

t: Tiempo anual de operación del sistema (s/año).

N: Precio anual uniforme equivalente de la energía (\$/J).

El término Q, se calcula con las formulas de transferencia de calor en tuberías aéreas y t se obtiene de la operación de las líneas.

Para calcular N:

$$N = (C + A) (1/E)$$

C: Costo de la energía primaria. (\$ / J)

$$C = Cc / Pc$$

Cc: Costo del combustible empleado para obtener la energía térmica en el flujo de la tubería. (\$ / kg)

Pc: Poder calórico del combustible empleado. (J / kg)

A: Incremento anual uniforme equivalente del costo del combustible. (\$ / J)

$$A = G \left[ \frac{i}{i} - \frac{n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

G: Incremento anual del costo del combustible. Permanece constante durante toda la vida útil del sistema aislante. [ $\$/J$ ]

i: Tasa anual de interés. [adimensional]

n: Vida útil del sistema aislante. [año]

E: Eficiencia del sistema que transforma el combustible en energía térmica. [adimensional]

#### b) CALCULO DE VARIABLES.

C

Costo de la energía que produce la energía térmica que se pierde a través del termoaislante. Si esta energía de alimentación proviene de un combustible, el costo se calcula como  $C = C_c / P_c$ . Pero si la energía de alimentación es de otro tipo (eléctrica por ejemplo), se calculará según el caso, de modo que se obtengan [ $\$/J$ ].

$C_c$

Es el costo en pesos por cada kg de combustible, empleado para obtener la energía térmica luego de un proceso determinado [ $\$/kg$ ]. Por ejemplo, el precio del combustóleo para calderas fue en Agosto de 1988 de 1,639.39  $\$/kg$ .

$P_c$

Es la energía liberada por cada kg de combustible [ $J/kg$ ].  
Por ejemplo, el  $P_c$  de un tipo de combustóleo es:

- Alto \_\_\_ 42,990,088 J / kg.

- Bajo \_\_\_ 40,394,416 J / kg.

G

Incremento anual del costo del combustible a partir del 2° año, debido a las fluctuaciones del mercado internacional. Como el incremento anual del combustible no es constante durante toda la vida útil del aislamiento, se toma un valor promedio probable para valores futuros del combustible. Para ello es importante la información del comportamiento del costo del combustible a lo largo del tiempo.

Analizando el caso del petróleo en el mercado internacional, vemos en la gráfica # III.2.1 el precio del petróleo en E.U. y el fijado por la OPEP.

En la gráfica # III.2.2 aparece la demanda mundial del petróleo desde 1973 hasta la probable en 1993.

Más específicamente podemos ver el precio del combustible en la Ciudad de México a precio de mayoreo en la gráfica # III.2.3.

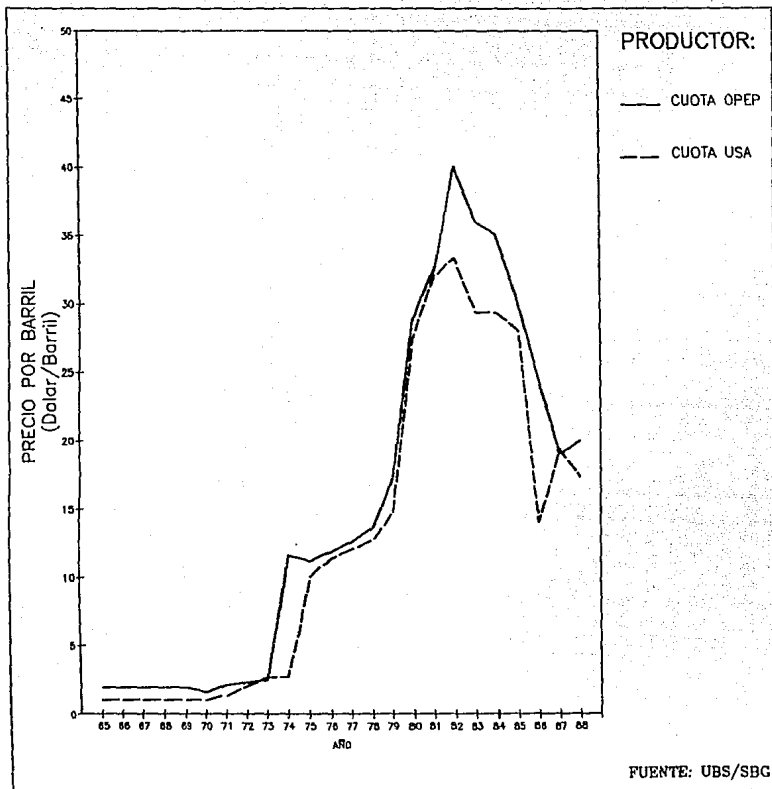
Basados en la información anterior podría suponerse un valor al incremento del costo del combustible. En 1980 su tendencia fué del 8%. En 1985 del 15%.

i

Es la inflación anual dada por el Banco de México y es igual a la i, en la Determinación de Costos Fijos.

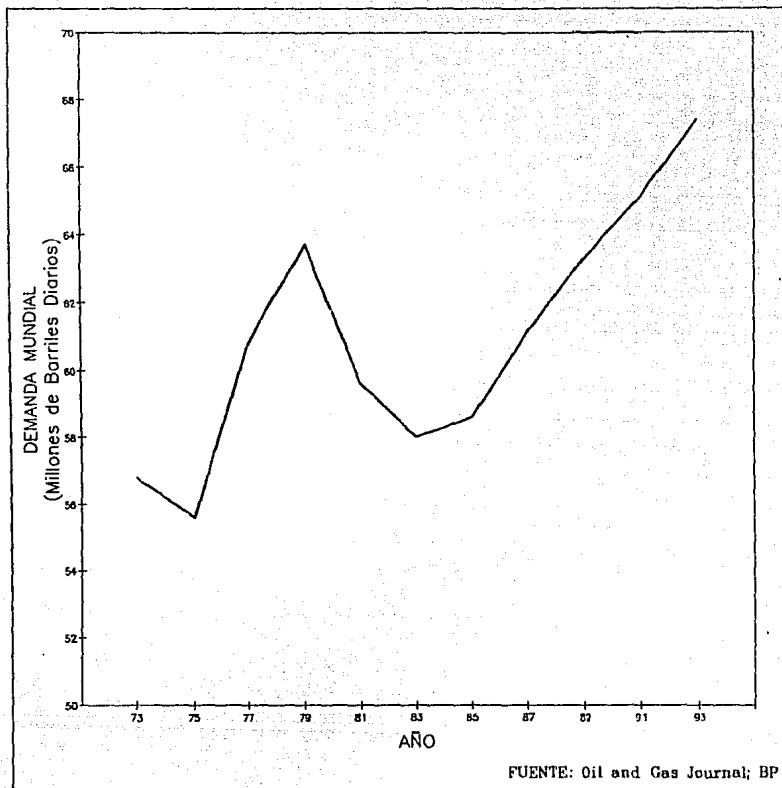
n

Vida útil del sistema aislante en años. Durante este tiempo el termoaislante ahorrará energía.



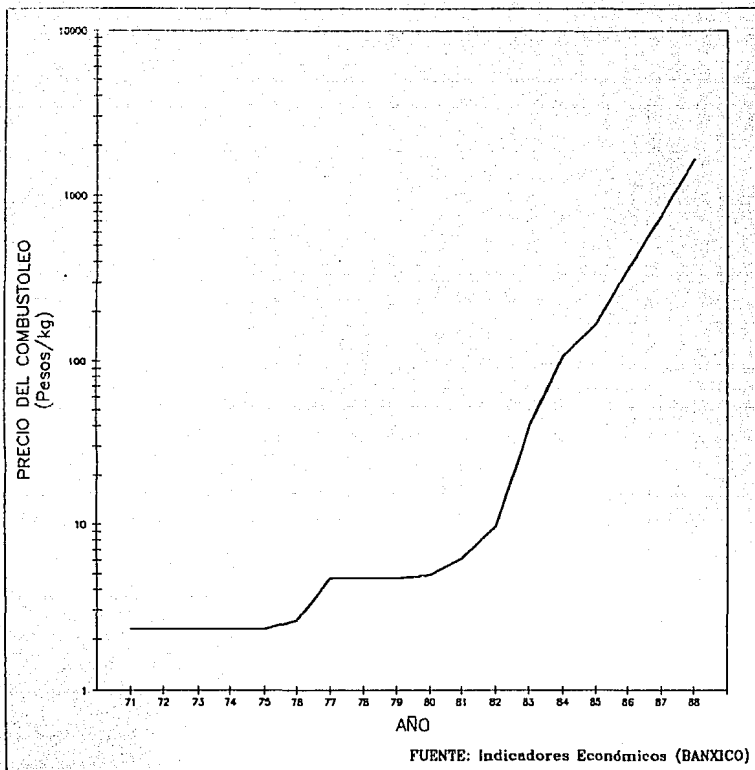
Precio del petróleo según las cuotas  
fijadas por la OPEP y USA.

Gráf. # III.2.1



Demanda mundial del petróleo.

Gráf. # III.2.2



Precio del combustible al mayoreo  
en la Ciudad de México.

Gráf. # III.2.3

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## E

Eficiencia del sistema que transforma el combustible suministrado en energía térmica utilizable a la salida. Por ejemplo para generadores de vapor, se tienen los siguientes valores típicos dependiendo del combustible empleado:

82% - 90% Carbón pulverizado.

85% - 92% Combustibles líquidos.

85% - 92% Combustibles gaseosos.

## C ) DETERMINACION DEL ESPESOR ECONOMICO.

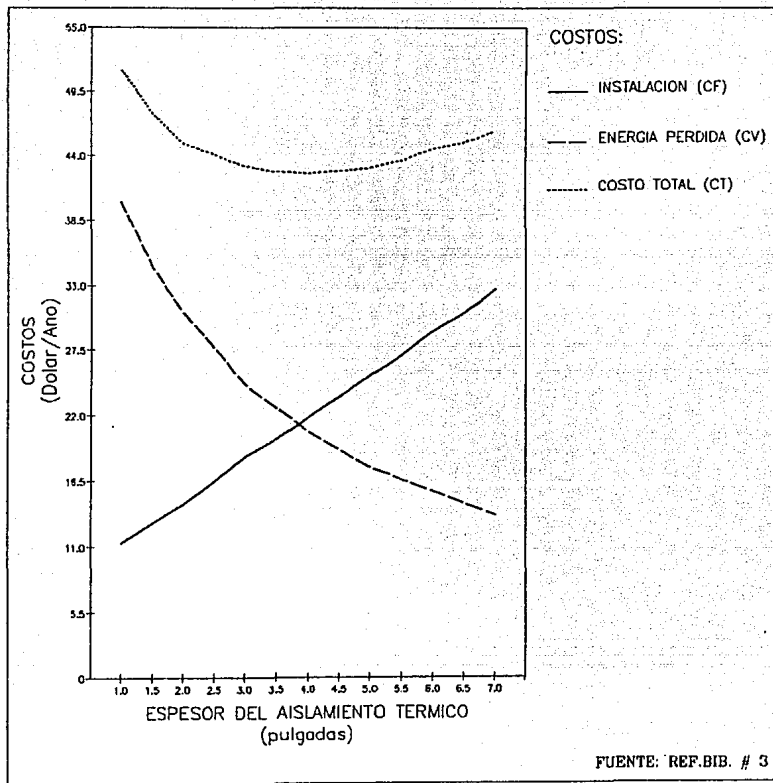
### a) GENERALIDADES.

Para seleccionar el espesor del material termoaislante que implique un menor costo, se requiere calcular el costo para varios espesores.

En la gráfica # III.2.4 se observa el costo, tanto de energía perdida como de instalación del material, para cada incremento en el espesor del aislamiento térmico. Sumando ambos costos obtenemos el costo total (CT) y el valor mínimo de este nos indica el espesor más adecuado (económico).

Para determinar el costo de la instalación (costos fijos), se requiere conocer el espesor del material termoaislante; este también se requiere para calcular las pérdidas de energía en los costos de operación (costos variables).

El cálculo de las pérdidas de calor en las tuberías, requiere conocer la temperatura de superficie, la cual es función del espesor



Determinación del espesor económico  
del aislamiento.

Gráf. # III.2.4



del aislamiento térmico.

Como se podrá ver, todas las incógnitas del problema están en función del espesor de el aislamiento térmico ( $e$ ).

La forma más sencilla de resolver las ecuaciones, es suponer el espesor del material termoaislante conocido. Al sustituir este valor junto con las condiciones de operación de la línea, obtenemos el costo para varios espesores. Una vez obtenidos estos, podemos seleccionar el más conveniente (económico).

La metodología para calcular el espesor económico es la siguiente.

#### b) METODOLOGIA.

##### SUPONER UN ESPESOR DE TERMOAISLANTE ( $e$ ).

Para calcular los costos de operación, se requiere conocer la transferencia de calor entre la tubería y el medio ambiente; para los costos de instalación es necesario el espesor del material.

Así, suponemos conocido el radio exterior que define el espesor del termoaislante ( $r_o$ ).

##### CALCULAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR ( $Q$ ) Y LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE EXTERIOR $T(s)$ .

Al sustituir  $r_o$  en la ecuación de transferencia de calor por conducción (1.A9), junto con las condiciones de operación, obtenemos:

$$Q_k = C1 (T_i - T_s) \quad (2.C1)$$

C1: Término que engloba todas las constantes de la ecuación.

T<sub>i</sub>: Temperatura de la tubería sin aislar.

T<sub>s</sub>: Temperatura exterior de la tubería aislada.

En la ecuación anterior, T<sub>i</sub> es conocida pero T<sub>s</sub> no.

Sustituyendo la ecuación (1.B3) y alguna de las ecuaciones para calcular el coeficiente convectivo, en la ecuación (1.B1), obtenemos H<sub>T</sub>.

Sustituyendo ahora H<sub>T</sub> en la ecuación de transferencia de calor por convección (1.C1):

$$Q_c + Q_r = C2 f(T_s) (T_s - T_a) \quad (2.C2)$$

T<sub>a</sub>: Temperatura del medio ambiente.

C2: Agrupación de términos ctes.

f(T<sub>s</sub>): Función de T<sub>s</sub>, producto de alguna de las ecuaciones de coeficiente convectivo y la ecuación (1.B3) de radiación.

Pero como:

$$Q_k = Q_r + Q_c = Q \quad (2.C3)$$

Tenemos como incógnitas: T<sub>s</sub> y Q. Para obtener estos datos, damos un valor a T<sub>s</sub> para resolver la ec. (2.C1). Con el mismo T<sub>s</sub> se resuelve la ec. (2.C2) y se comparan ambos resultados como lo dice la

ec. (2.C3). El proceso se repite hasta que la igualdad se cumpla.

#### CALCULAR LOS COSTOS FIJOS (CF).

Con el espesor considerado ( $e$ ), se calculan los costos fijos o costos de instalación del sistema aislante.

#### CALCULAR LOS COSTOS VARIABLES (CV).

Una vez conocidos ( $Q$ ) y ( $e$ ), se calculan los costos de operación o costos de pérdidas de energía.

#### OBTENER EL COSTO TOTAL (CT).

Sumando (CF) y (CV) obtenemos (CT). Este valor se grafica para posteriormente encontrar el mínimo costo.

#### REPETIR EL PROCEDIMIENTO.

El procedimiento anterior se repite para otro valor de ( $e$ ), hasta encontrar suficientes valores para seleccionar el espesor económico.

### 3 ) ESPESOR TERMICO.

\*\*\*\*\*

Dependiendo de cual sea la función del aislamiento térmico, se determinará un espesor adecuado. Como sabemos, las funciones del termoaislante son:

- Ahorro de energía.
- Mejor control de procesos.
- Protección de personal.
- Prevenir la condensación de humedad sobre las tuberías de baja temperatura.

Si el objetivo de la instalación es mejorar el control de procesos, protección de personal o prevenir la condensación de humedad sobre las tuberías de baja temperatura, el espesor de el material termoaislante se le denomina "espesor térmico". Esto es, porque para calcularlo se requiere conocer: la temperatura de la cara exterior de el aislamiento térmico ( $T_s$ ), o bien, el flujo de calor ( $Q$ ).

Una vez determinado lo anterior, se procederá a calcular el espesor de el material, de modo que cumpla su propósito al mínimo costo posible.

Para el caso de ahorro de energía, se emplea el concepto de espesor económico, visto en el capítulo anterior.

Para los cálculos del espesor, deben tomarse como temperatura de diseño, las temperaturas máxima y mínima de operación de la línea, así como la temperatura promedio de operación.

Los cálculos de el espesor térmico, se basan en las ecuaciones de transferencia de calor para tuberías: Conducción, convección y

radiación.

Algunas veces al medir las temperaturas, se toman las temperaturas del gas y no la de superficie. Así se cometen errores de aproximadamente 30° C y bajo condiciones extremas este error puede llegar a ser de cientos de grados.

En vista de las fuentes de error en las lecturas de temperatura, en las propiedades de los materiales, así como en las condiciones ambientales, es razonable considerar las pérdidas de calor en kilowatt y las temperaturas en grados centígrados enteros.

A ) DETERMINACION DE LAS CONDICIONES  
DE OPERACION DE LA LINEA.

a) TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR (Ts) PREFIJADA.

PARA PROTECCION DE PERSONAL.

Según la norma de PEMEX en seguridad industrial, la temperatura exterior de el aislamiento térmico, debe estar en el rango de temperatura siguiente: 54° C a 65.5° C. Cualquier temperatura dentro del rango anterior, es considerada de seguridad.

Si una línea de proceso pasa cerca de las áreas de trabajo, donde implique un riesgo potencial al trabajador, se aislará con el criterio de protección de personal, o en su defecto, se colocarán guardas de seguridad.

#### PARA PREVENIR LA CONDENSACION DE HUMEDAD.

Este problema solo se presenta en las tuberías cuya temperatura es más baja que la temperatura ambiente.

La humedad del medio ambiente se condensará a la temperatura de rocío del lugar. Dicha temperatura de rocío se puede determinar con la temperatura y humedad del sitio.

La temperatura  $T_s$ , podría tener valores que van desde la temperatura de la tubería (no deseable), hasta la temperatura ambiente (lo cual implica un espesor muy grande). Por lo que  $T_s$  toma un valor por debajo de la temperatura ambiente, pero más alto que la temperatura de rocío del lugar.

#### b) FLUJO DE CALOR (Q) PREFIJADO.

#### CONTROL DE PROCESOS.

Para ciertos procesos petroquímicos y químicos, es necesario mantener una temperatura de proceso constante. De este modo  $T_s$ , solamente dependerá de la transferencia de calor permitida a la línea. Es decir que para control de procesos, se determina una transferencia de calor fija (Q), para evitar la caída de la temperatura interna en la tubería. Siendo entonces  $T_s$ , función de la pérdida de energía en la tubería para un termoaislante seleccionado.

B ) DETERMINACION DEL ESPESOR TERMICO.

a) TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR ( $T_s$ ) PREFIJADA.

Ya que conocemos  $T_s$ , se puede sustituir este valor en la ec.

(1.A9):

$$Q_k = B1 f1(r_o) \quad \text{_____} \quad (3.B1)$$

- B1 es una constante que reúne las variables conocidas.
- $f1(r_o)$  es una función de  $r_o$ .

Por otro lado, conjuntando las ecuaciones (1.B1) y (1.C1):

$$Q_c + Q_r = B2 f2(r_o) \quad \text{_____} \quad (3.B2)$$

- B2 agrupa constantes conocidas.
- $f2(r_o)$  es otra función de  $r_o$ .

Ya que  $Q_k = Q_c + Q_r = Q$ , tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas: (Q) y ( $r_o$ ).

Debido a su complejidad, estas ecs. se resuelven por tanteos:

Damos un valor a  $r_o$ , enseguida lo sustituimos en la ec.

(3.B1).

Sustituimos el mismo valor de  $r_o$  en la ec. (3.B2).

Comparamos ambos resultados y repetimos el procedimiento con otro valor de  $r_o$ , hasta que ambas ecuaciones den el mismo número.

Al determinar  $r_o$  de la forma anterior, se determina el espesor del material aislante (e).

b) FLUJO DE CALOR (Q) PRIFIJADO.

En este caso conocemos (Q) y desconocemos ( $r_o$ ) y ( $T_s$ ).  
Sustituyendo en la ec. (1.A9):

$$T_s = T_i + B3 f3(r_o) \quad (3.B3)$$

- B3: Agrupación de términos ctes.
- $f3(r_o)$  función de  $r_o$ .

Con esta ecuación, podemos calcular  $T_s$  para cada espesor recomendado. Para definir un solo espesor, se requiere otra ecuación.

Combinando las ecs. (1.B1) y (1.C1) y sustituyendo en ellas las variables que se tienen:

$$Q_c + Q_r = B4 f4(r_o, T_s) \quad (3.B4)$$

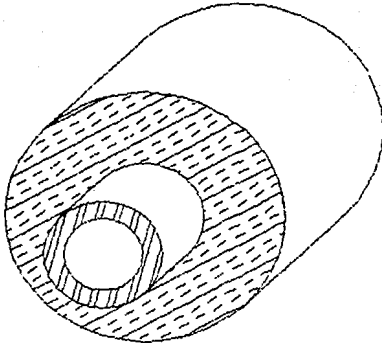
- B4: Reunión de constantes.
- $f4(r_o, T_s)$  función de dos variables.

Para resolver este sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, se da un valor tentativo de  $r_o$  en la ecuación (3.B3) y se obtiene el valor de  $T_s$ .

Al sustituir los valores anteriores de  $r_o$  y  $T_s$  en la ecuación (3.B4), se observa si se verifica este valor con el de Q, que ya conocemos. De no verificarse la igualdad, se repite el procedimiento con otro valor de  $r_o$ .



# IV



**DISEÑO E IMPLANTACION DE UN SISTEMA  
EN COMPUTADORA PERSONAL PARA CALCULAR  
EL ESPESOR DE UN MATERIAL TERMOAISLANTE**

## 1 ) ANALISIS.

\*\*\*\*\*

Debido a que la determinación del espesor económico y del espesor térmico es bastante laboriosa, es conveniente diseñar un programa en computadora personal para que realice estos cálculos. La metodología expuesta en los capítulos anteriores facilita el cambio de procedimiento manual a proceso automático.

Existen varias ventajas al resolver el problema por computadoras:

- Resultados con gran exactitud.
- Rapidez en la obtención de resultados.
- Cálculo de espesores, sin necesidad de conocer los laboriosos procedimientos implicados.
- Posibilidad de modificación de parámetros, analizando los cambios que estos originan.
- Facilidad para actualizar tablas recomendadas para seleccionar el espesor del material aislante.

Mediante el programa se pueden modificar, tanto los factores económicos como los térmicos, muy fácilmente.

La tediosa labor de buscar propiedades del aire en tablas o hacer interpolaciones, se anula.

El programa debe tener gran flexibilidad en cuanto a la actualización o modificación de procedimientos de cálculo. Esto es así, para adaptarlo lo más posible a las condiciones del caso real.

Su flexibilidad es importante también, porque aunque ha sido elaborado con gran cuidado, pueden en lo futuro surgir nuevas

necesidades que tendrá que resolver.

La ventaja de que el programa sea elaborado en una computadora personal, es la facilidad de ser usado tanto en campo como en oficina. Esto es, existira una mayor facilidad para implementarlo en el lugar a donde se le necesite.

Los mensajes en pantalla que lance el programa, pretenderán ser siempre claros y simples, tanto en la salida de resultados como en la entrada de los datos.

El programa ha sido escrito en basic, debido a su gran popularidad y fácil reconocimiento.

## 2 ) DISEÑO.

\*\*\*\*\*

El diseño del programa se muestra esquematicamente en los diagramas de flujo de datos. Estos pueden verse en la figura # IV.2.1 y figura # IV.2.2.

Estos diagramas simplificados, muestran los procesos de cálculo necesarios para el funcionamiento del programa.

Como puede verse en los diagramas, el sistema consta en realidad de 2 programas:

- Cálculo del espesor económico.
- Cálculo del espesor térmico.

El estudio de dichos diagramas puede ser útil en alguno de los siguientes casos:

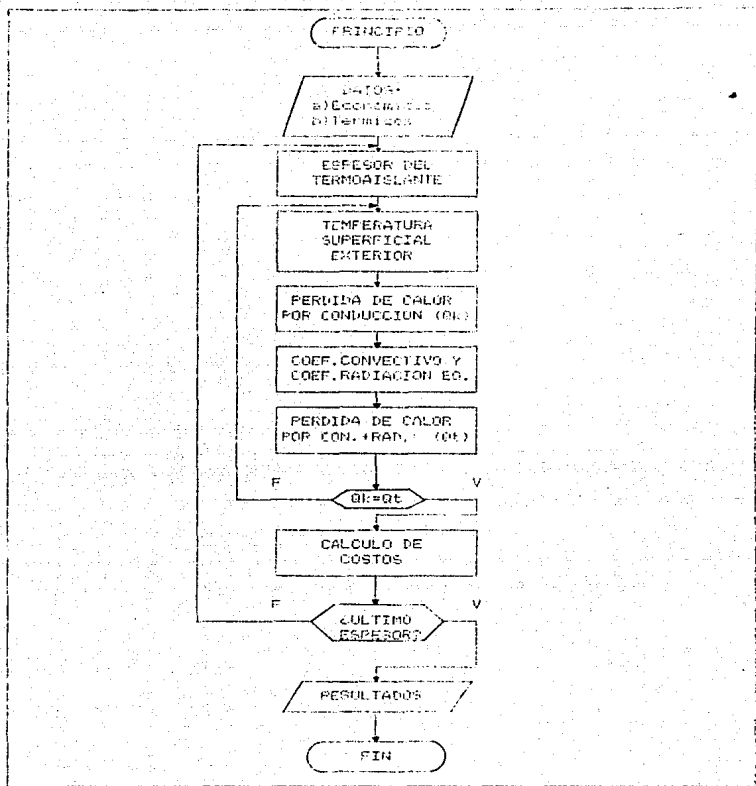


Diagrama de flujo de datos simplificado  
para calcular el "Espesor Económico".

Fig. # IV.2.1

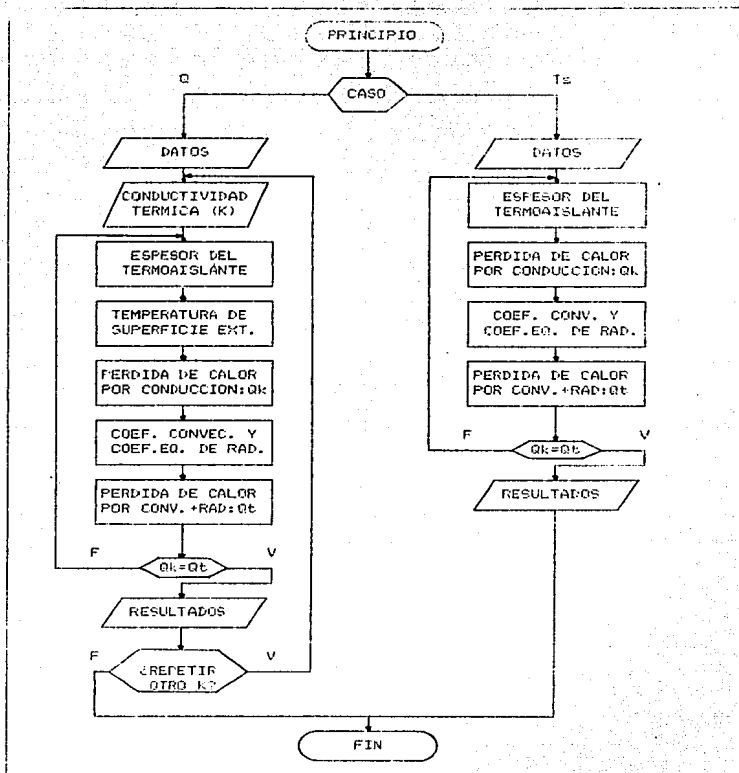


Diagrama de flujo de datos simplificado para calcular el "Espesor Térmico".

Fig. # IV.2.2

- Comprender las funciones que realiza el programa.
- Escribir el programa en otro lenguaje.
- Modificar o perfeccionar ciertos procesos.

### 3 ) PRUEBAS DEL SISTEMA.

\*\*\*\*\*

Para mostrar las características de los programas desarrollados, se muestran en seguida algunos ejemplos resueltos.

#### EJEMPLO A: ESPESOR ECONOMICO (Servicio Alta Temperatura.)

Enseguida se determinará el espesor económico de aislamiento térmico para tubería aérea en base a los siguientes datos:

#### Características de la instalación:

- Diámetro de la tubería sin aislar: 0.050 m (4")
- Longitud de la tubería analizada: 10 m
- Emisividad superficial del acabado: 0.1
- Horas anuales de operación de la línea: 8760 hrs/año.
- Temperatura de la tubería sin aislar: 230 °C.
- Conductividad del termoaislante (a 135 °C): 0.052 w/m-K
- Material aislante: Preformado de fibra de vidrio.

Características Ambientales:

- Temp. amb. 32 °C (Norma PEMEX)
- Velocidad del viento 2.2 m/s (Norma PEMEX)

VARIABLES ECONÓMICAS:

- Costo de instalación, acabado y demás: 75% del costo del material.
- Gastos para imprevistos: 5% del costo del material.
- Tasa de interés anual: 45%
- Vida útil del aislamiento: 12 años. (Norma PEMEX).
- Costo de mantenimiento anual: 3% del costo del material.
- Vida en libros del sistema aislante (Depreciación): 7 años.

VARIABLES ENERGÉTICAS:

- Costo del combustible: 1640 \$/año.
- Poder calórico del combustible: 42990088 J/kg
- Incremento anual del costo del combustible: 8% del costo actual.
- Eficiencia del sistema térmico: 90%

Luego de correr el programa obtenemos los siguientes resultados:

ESPESOR	T.SU.EX	CALOR	Qk-Qt	COS.FIJ	COS.VAR	COS.TOT
[m]	[°C]	[w]	[%]	[\$/aRo]	[\$/aRo]	[\$/aRo]
0.053	41.0	854.4	1.3	392,280.2	1,332,357	1,724,637
0.054	41.0	843.2	0.6	408,534.9	1,314,779	1,723,314
0.055	41.0	832.3	2.5	423,705.9	1,297,822	1,721,527
0.056	40.5	824.0	1.6	444,295.2	1,284,840	1,729,136
0.057	40.5	813.9	0.2	460,549.9	1,268,983	1,729,533

ESPESOR ECONOMICO: 0.055 m.

De donde obtenemos el espesor cuyo costo es mínimo: 0.055 m.

Comparando este espesor, con el obtenido por otras industrias bajo las mismas temperaturas (tablas de recomendación), tenemos:

- PEMEX: \_\_\_\_\_ 64.0 mm
- VITROFIBRAS: \_\_\_ 50.8 mm
- Calculado: \_\_\_\_\_ 55.0 mm



EJEMPLO B: ESPESOR ECONOMICO (Servicio Baja Temperatura.)

Enseguida se calcula el espesor económico de un material termoaislante, igual que el del ejemplo anterior y bajo las mismas variables, excepto por:

- Temperatura de rocío: 28 °C. (Para referencia.)
- Temperatura de la tubería sin aislar: -10 °C.
- Conductividad térmica del material (a 10°C): 0.032 w/m-K

Luego de correr el programa obtenemos los siguientes resultados:

ESPESOR [m]	T.SU.EX. [°C]	CALOR [w]	Qk-Qt [%]	COS.FIJ [\$/año]	COS.VAR [\$/año]	COS.TOT [\$/año]
0.036	30.3	149.4	4.2	237,318.7	232,977	470,295.7
0.037	30.3	146.3	1.5	238,944.1	228,114.2	467,058.3
0.038	30.3	143.3	1.2	245,987.9	223,502.6	469,490.5
0.039	30.3	140.5	3.9	250,864.3	219,122.7	469,987.0

ESPESOR ECONOMICO: 0.037 m.

Comparando este espesor con el recomendado en tablas de otras industrias, para las mismas temperaturas, tenemos:

- PEMEX: \_\_\_\_\_ 38 mm
- VITROFORM: \_\_\_ 38 mm
- Calculado: \_\_ 37 mm

EjemPlo C: ESPESOR TERMICO (Temperatura Sup. Ext. Conocida).

Dada una temperatura superficial exterior conocida, calcular el espesor de un material termoaislante:

Temperatura Superficial Exterior: 54 °C

Características Ambientales:

- Temperatura ambiente 32 °C (Norma PEMEX).
- Velocidad del viento: 2.2 m/s (Norma PEMEX).

Características de la Instalación:

- Radio de la tubería sin aislar: 0.050 m
- Longitud de la tubería analizada: 10 m
- Emisividad de la superficie de acabado: 0.1
- Temperatura de la tubería sin aislar: 230 °C.
- Conductividad del termoaislante (a 142 °C): 0.053 w/m-K
- Material aislante: Preformado de fibra de vidrio.

Corriendo el programa obtenemos los siguientes resultados:

ESPESOR	CON.TER	T.SU.EX	T.SU.IN	T.ME.AM	CO.C.EQ	PERCAL	Qk-Qt
[m]	[w/m-K]	[°C]	[°C]	[°C]	[w/m <sup>2</sup> -K]	[w]	[%]
0.021	0.053	54	230	32	16.83	1,671.4	1.2

La norma PEMEX para protección de personal (54 a 65 °C) recomienda un espesor de 0.025 m.

EJEMPLO D: ESPESOR TERMICO (Pérdida de Calor Conocida).

Dado un flujo de calor determinado, calcular el espesor de un material termoaislante, considerando los datos del ejemplo anterior, excepto:

- Conductividad del termoaislante (a 135 °C): 0.052 w/m-K
- Temperatura superficial exterior: desconocida.
- Pérdida de calor: 832.3 w

Ejecutando el programa obtenemos los siguientes resultados:

ESPESOR	CON.TER	T.SU.EX	T.SU.IN	T.ME.AM	CO.C.EQ	PERCAL	Qk-Qt
[m]	[w/m-K]	[°C]	[°C]	[°C]	[w/m <sup>2</sup> -K]	[w]	[%]
0.0557	0.052	39.4	230	32	14.34	832.3	15.7

Debido al error tan grande obtenido en estos resultados, se modifica el parámetro de error en el programa y lo volvemos a probar, obteniendo:

ESPESOR	CON.TER	T.SU.EX	T.SU.IN	T.ME.AM	CO.C.EQ	PERCAL	Qk-Qt
[m]	[w/m-K]	[°C]	[°C]	[°C]	[w/m <sup>2</sup> -K]	[w]	[%]
0.0550	0.052	41.0	230	32	14.37	832.3	2.5

Así obtenemos un resultado con mejor exactitud.

Estos datos verifican los resultados del cálculo, en el espesor económico del ejemplo A.

#### 4 ) MANTENIMIENTO Y OPERACION.

\*\*\*\*\*

Cuando se elabora un programa, se debe tener presente que a través de su uso, podrán surgir ideas para mejorarlo. Así, la distribución del programa debe ser tal que facilite su estudio en partes específicas. Esto ahorrará trabajo a quienes en el futuro deseen optimizar o modificar el programa.

El mantenimiento no debe verse como un problema, ya que este tiene la finalidad de agrandar la vida útil del sistema desarrollado.

También es necesario definir claramente, la forma en que se debe usar el programa. Esto es con el fin de facilitar su utilización a personas no familiarizadas con el.

#### A ) DESCRIPCION DE LOS ARCHIVOS DE DATOS.

##### a) "PROPAIRE.DAT"

Durante la ejecución del programa, se requiere conocer las propiedades del aire a diferentes temperaturas. Así, en este archivo están una serie de registros, cada uno de los cuales tiene la siguiente información:

TEMPERATURA	VISCOCIDAD	DENSIDAD	CALOR (Cp)	CONDUCTIVIDAD
	CINEMATICA		ESPECIFICO	TERMICA
(K)	(kg/m-s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kg-K)	(w/m-K)

Estos datos están evaluados a partir de las siguientes temperaturas:

- De 200 K hasta 1,000 K cada 50 K.
- De 1,000 K hasta 1,200 K cada 100 K.

Este archivo ya fue creado y no hay necesidad de modificarlo. Es utilizado tanto por el programa que calcula el espesor económico, como por el de espesor térmico.

b) < CUALQUIER NOMBRE DE ARCHIVO >

Este otro archivo, cuyo nombre de 8 caracteres debe comenzar con una letra, proporciona los siguientes datos:

- Temperatura promedio máxima [ $^{\circ}$ C] entre superficies del material termoaislante ( $T_a$ ).

- Temperatura promedio mínima [ $^{\circ}$ C] entre superficies del material termoaislante ( $T_b$ ).

- Incremento de temperatura promedio (IT) en [ $^{\circ}$ C]; es para evaluar la temperatura promedio del termoaislante a partir de  $T_b$ , hasta  $T_a$ , en incrementos de temperatura igual a IT.

- Conductividad térmica del material evaluada a ( $T_b$ ).

- " " " " ( $T_b+IT$ )

- " " " " ( $T_b+2*IT$ )

...

...

- " " " " ( $T_a$ )

Siempre  $T_a > T_b$

Tanto  $T_a$  como  $T_b$  son la temperatura promedio, entre la temperatura superficial exterior ( $T_{so}$ ) y la interior ( $T_{si}$ ) en el material termoisolante.

Para que el programa funcione, se requiere este archivo. Pero como en un principio no conocemos  $T_{so}$ , una primera aproximación puede tomar los siguientes límites "sin alcanzarlos".

Cuando  $T_{si} > T_{ambiente}$ :

$$T_a < (T_{so} + T_{si})/2 = T_{si}$$

$$T_b > (T_{amb.} + T_{si})/2$$

Cuando  $T_{si} < T_{ambiente}$ :

$$T_a < (T_{amb.} + T_{si})/2$$

$$T_b > (T_{so} + T_{si})/2 = T_{si}$$

Se puede dar un rango muy amplio de temperaturas promedio, pero esto hace más lento el programa. Mientras menos datos definan el rango de temperaturas, más rápido se ejecutarán los cálculos.

EJEMPLO. Formar un archivo de datos de conductividades para las siguientes condiciones:

$$- T_{amb} = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$- T_{si} = 230 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En base a lo anterior, una primera aproximación al archivo de conductividades sería el siguiente:

$$T_a < 230$$

$$T_b > 131$$

de donde:

Ta = 182

Tb = 132

IT = 10

K1 = 0.040 (evaluada a 132)

K2 = 0.041 " 142

K3 = 0.042 " 152

K4 = 0.043 " 162

K5 = 0.044 " 172

K6 = 0.045 " 182

Posteriormente se definirá otro archivo dando incrementos mas pequeños de temperatura y dentro del rango de temperaturas que de los mejores resultados.

Otra forma de hacer el procedimiento anterior, es definir incrementos muy pequeños desde la primera aproximación, pero esto haria más lenta la ejecución del programa.

#### B ) OPERACION DE LOS PROGRAMAS.

La entrada de datos es muy sencilla, pues cada una de ellas indica de que se trata y en que unidades.

Algunos ejemplos de la entrada de datos pueden verse en "pruebas del sistema".

Cuando se pide la emisividad superficial, para cálculos de

pérdidas de calor por radiación, se debe dar la del acabado final de la instalación. Este puede ser aluminio, acero inoxidable, etc.

La longitud de la tubería pedida, es la longitud de la tubería que se está analizando. Se considerarán las mismas condiciones para dicho tramo.

La convección libre considerará la velocidad del viento como cero, no obstante se haya introducido como dato alguna velocidad.

En algunos cálculos de costos, se toman como datos, un porcentaje del costo del material (CMATE).

El costo del material se da por metro de tubería a aislar, (\$/m) y para el espesor correspondiente. Este no incluye costo de instalación, acabado ni algún otro.

El incremento al costo del combustible se da como un porcentaje del costo actual del mismo. Es un valor estimativo, que en realidad está sujeto a fluctuaciones.

Dentro del programa se deja un espacio para agregar una ecuación que calcule el coeficiente convectivo, ya sea para convección libre o forzada. Si para esta nueva ecuación se requiere conocer las propiedades del aire, basta con asignar la temperatura de búsqueda ( $^{\circ}\text{C}$ ), a la variable TBUSQ. Después de ejecutar la subrutina correspondiente, se obtienen los valores de viscosidad, densidad, calor específico y conductividad térmica del aire, en las variables MU, RO, CP y KA.

#### C) CONDICION DE APROXIMACION EN LOS CALCULOS.

En todos los resultados aparece (QK-Qt) marcado en X. Esto se



refiere a la diferencia que existe entre la pérdida de calor por conducción ( $Q_k$ ) y la pérdida de calor por convección más radiación ( $Q_t$ ). En cada tipo de espesor, esta diferencia tiene distinto origen.

#### a) ( $Q_k - Q_t$ ) EN EL ESPESOR ECONOMICO.

Esta diferencia de calores que se obtiene en el espesor económico, es debido a dos causas:

- El rango de temperaturas bajo el cual se suministró la conductividad térmica del material es muy grande, o bien no incluye dentro de sí la temperatura real exterior.

- Los incrementos en el espesor del material son muy grandes.

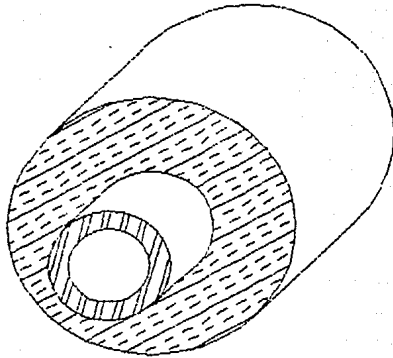
Cuando el espesor económico no aparece en los espesores calculados, significa que el espesor económico está fuera de dicho rango. Para calcularlo hay que definir otro rango de espesores.

#### b) ( $Q_k - Q_t$ ) EN EL ESPESOR TERMICO.

Los cálculos se basan en incrementos del espesor de 0.001 m. Para disminuir el error, hay que disminuir los incrementos del espesor, pero esto incrementará el tiempo de procesamiento.

Otra fuente de la diferencia de calor en los cálculos, es el filtro que termina la ejecución del programa, luego que el error es menor de  $(Q_k / 50)$ . Donde  $Q_k$  es la pérdida de calor por conducción. En ocasiones este filtro de error es demasiado fino, para un incremento de 0.001 m en el espesor. En ese caso es apropiado disminuir el factor 50, por cualquier número menor que de un error aceptable.

V



**CONCLUSIONES**

La instalación de aislamientos térmicos en tubería aérea, representa una buena parte del total de sistemas aislados en una planta petroquímica.

Los aislamientos térmicos son elementos que han tomado una gran importancia en la industria actual. Esto se debe a su función de reducir las pérdidas de calor en las instalaciones de la planta. Dichas pérdidas de energía, son una fuga de recursos económicos.

La correcta selección de termoaislantes cada vez es más importante debido a la crisis energética que el mundo atraviesa. El precio del petróleo es muy inestable y su reserva internacional limitada.

Para seleccionar el aislamiento térmico más adecuado, es necesario conocer:

- Condiciones de operación de la línea.
- Condiciones ambientales que envuelven la línea.
- Características de los materiales termoaislantes.

Una vez determinadas las necesidades térmicas que requiere la tubería, se busca un material cuyas características cubran los requerimientos más importantes, soportando las condiciones que la instalación exige.

La determinación del espesor de la capa termoaislante, tiene la finalidad de reducir costos al mínimo. Esto se logra comparando el costo de la pérdida de energía, contra el costo de la instalación aislante. Al espesor, cuyo costo global de energía perdida e instalación es mínimo, se le denomina "espesor económico".

Sin embargo hay ocasiones en que se coloca una capa de termoaislante mayor que la económica. En estos casos el material

aislante cubre otras necesidades diferentes que el ahorro de energía, a este espesor se le denomina "espesor térmico" y se usa en:

- Protección de personal.
- Evitar la condensación de humedad en tuberías que trabajan a bajas temperaturas.
- Estabilizar procesos petroquímicos.

Las variables que intervienen en el cálculo de los espesores de los materiales aislantes son muchas y algunas de ellas toman valores poco estables. Así se hace necesario hacer simplificaciones y suposiciones que nos permitan efectuar evaluaciones prácticas de variables.

Algunas de las consideraciones más importantes hechas en este trabajo son:

- Temperatura superficial de la tubería, cte a lo largo del tramo analizado.
- Propiedades de los materiales ctes, a lo largo de su vida.
- Tomar valores promedio en todas aquellas variables difíciles de precisar, tanto económicas, físicas y térmicas.

Una consideración importante, es el tomar pérdidas de calor promedio alrededor de la tubería. Esto es porque, realmente pierden más calor del lado donde las golpea el viento y menos en el lado opuesto. Pero ya que es poco práctico el hacer instalaciones termoaislantes con diferentes espesores en la misma sección, se toma un valor promedio basados en la pérdida promedio de calor.

Los cálculos anteriores se obtienen con fórmulas, muchas de ellas experimentales, sobre coeficientes convectivos y de radiación. Dichas fórmulas llevan implícitas un cierto error experimental, (25):

aproximadamente).

Debido a lo laborioso que es efectuar algunos cálculos en el espesor de un material termoaislante, se hace necesario automatizar el proceso.

Así, he elaborado un programa en computadora personal (PC), el cual realiza cálculos tanto del espesor económico como del espesor térmico.

El programa da resultados bastante completos, con buena exactitud y en poco tiempo. Permite además, observar el cambio de ciertas variables modificando otras.

En la elaboración del programa fué importante considerar que éste puede ser modificado y mejorado a través de su uso. Así, cada sección de cálculo se desarrolla independiente, dando una gran cohesión a la estructura del programa.

Los resultados obtenidos en los ejemplos del capítulo IV.3, se comparan con espesores recomendados por la norma de PEMEX: en instalación de aislamientos térmicos para conservación de calor. También se comparan con los espesores recomendados por VITROFIBRAS, importante fábrica de aislamientos térmicos.

Los datos calculados por el programa son valores muy parecidos a los que recomienda PEMEX y VITROFIBRAS, sin embargo no son exactamente los mismos. Esto se debe fundamentalmente a las siguientes razones:

- Tanto PEMEX como VITROFIBRAS toman valores promedio para una gran diversidad de variables climatológicas, térmicas, económicas y costos de la energía perdida. Mientras que el programa, efectúa los cálculos tomando las condiciones particulares del caso analizado.

- PEMEX utiliza un mayor factor de excedente de material. Esto se observa en las tablas de recomendación de espesores, donde un mismo espesor se utiliza para varios rangos de temperatura. Esto último no sucede con las tablas de VITROFIBRAS, quien da un espesor para cada rango de temperatura diferente.

- Los espesores recomendados tanto por PEMEX como por VITROFIBRAS, son espesores comerciales y sus cálculos los redondean a dichos espesores. En cambio, el programa da resultados exactos, sin redondear a espesores comerciales.

# BIBLIOGRAFIA

- 1 ) "Aislamiento Térmico Para Alta Temperatura".  
Especificaciones Generales de PEMEX: Norma 2.616.01.  
México, 1984.
  
- 2 ) "Aislamiento Térmico Para Baja Temperatura".  
Especificaciones Generales de PEMEX: Norma 2.616.02.  
México, 1984.
  
- 3 ) "Aislamientos Térmicos".  
Curso Regional, Zona Sur del I.M.P.  
México, 1983.
  
- 4 ) "Ingeniería de Aislamientos Térmicos".  
Curso de Capacitación de VITROFIBRAS.  
México, 1973.
  
- 5 ) "Cálculos Para La Transferencia De Calor".  
Curso de Capacitación de INSWOOL.  
México, 1980.
  
- 6 ) WELTY, James.  
"Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería".  
LIMUSA.  
México, 1988.



- 7 ) INCROPERA, Frank  
"Fundamental of Heat Transfer".  
Wiley.  
Canadá, 1985
- 8 ) VIVAS, Ricardo. CARDONA, R.  
"Determinación del Espesor Optimo de  
Aislantes Térmicos para Equipo y Tubería".  
Revista del I.M.P. Vol. XI, Núm. 3.  
México, 1979.
- 9 ) VIVAS, Ricardo. CARBAJAL, Jairo.  
"Determinación del Espesor Optimo de Aislantes Térmicos  
como un Medio Eficaz para la Administración de Energía".  
Revista del I.M.P. Vol. XV, Núm. 3.  
México, 1982.
- 10) OLIVA, Luis. GUILLEN, Reynaldo.  
"Determinación del Espesor Económico  
de Aislamiento Térmico para Tuberías".  
Trabajo Presentado en el Foro de  
Energía Provincial de Oriente.  
Cuba, 1984.

- 11) TARQUIN, Anthony.  
"Ingeniería Económica".  
Mc Graw Hill.  
México, 1985.
- 12) AGUILAR, Carmen. RIVERA, Jorge.  
"Diseño e Implantación de un Sistema  
para el Control de Requisiciones".  
Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería-UNAM.  
México, 1988.