

INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

Pedro Fernández Díez

<http://libros.redsauce.net/>

I.- PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

<http://libros.redsauce.net/>

I.1.- INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Térmica trata de los procesos de transferencia de calor y la metodología para calcular la velocidad temporal conque éstos se producen y así poder diseñar los componentes y sistemas en los que son de aplicación. La transferencia de calor abarca una amplia gama de fenómenos físicos que hay que comprender antes de proceder a desarrollar la metodología que conduzca al diseño térmico de los sistemas correspondientes.

Algunos ejemplos de diseño pueden ser:

- *Los que requieren disminuir las cantidades de calor transferido mediante un aislante térmico, o amplificarlas mediante aletas u otros sistemas*
- *Los que implican procesos de transferencia de calor de un fluido a otro mediante intercambiadores de calor*
- *Los que controlan térmicamente un proceso, manteniendo las temperaturas de funcionamiento de los elementos sensibles al calor dentro de unos márgenes predeterminados, etc.*

Siempre que existe una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de temperatura más baja; de acuerdo con los conceptos termodinámicos la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura, es el calor. Sin embargo, aunque las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, sólo se aplican a sistemas que están en equilibrio; pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) conque puedan producirse estos cambios; la fenomenología que estudia la transmisión del calor complementa los Principios termodinámicos, proporcionando unos métodos de análisis que permiten predecir esta velocidad de transferencia térmica.

Para ilustrar los diferentes tipos de información que se pueden obtener desde ambos puntos de vista, (termodinámico y transferencia de calor) consideraremos, a título de ejemplo, el calentamiento de una barra de acero inmersa en agua caliente. Los principios termodinámicos se pueden utilizar para predecir las temperaturas finales una vez los dos sistemas hayan alcanzado el equilibrio y la cantidad de energía transferida entre los estados de equilibrio inicial y final, pero nada nos dicen respecto a la velocidad de la transferencia térmica, o la temperatura de la barra al cabo de un cierto tiempo, o del tiempo que hay que esperar para obtener una temperatura determinada en una cierta posición de la barra.

El análisis de la transmisión del calor permite predecir la velocidad de la transferencia térmica del agua a la barra y de esta información se puede calcular la temperatura de la barra, así como la temperatura del agua en función del tiempo.

Para proceder a realizar un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar tres mecanismos diferentes, conducción, convección y radiación.

El diseño y proyecto de los sistemas de intercambio de calor y conversión energética requieren de cierta familiaridad con cada uno de estos mecanismos, así como de sus interacciones; en primer lugar consideraremos los principios básicos de la transmisión del calor y algunas aplicaciones simples, que serán de utilidad en capítulos posteriores, en los que serán tratados con más detalle.

I.2.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN RÉGIMEN ESTACIONARIO Y FLUJO UNIDIRECCIONAL

La conducción es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos; cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, siendo el calor transmitido por conducción Q_k , proporcional al gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$, y a la superficie A, a través de la cual se transfiere, Fig I.1.a, es decir:

$$Q_k \approx A \frac{dT}{dx}$$

en donde T es la temperatura y x la dirección del flujo de calor.

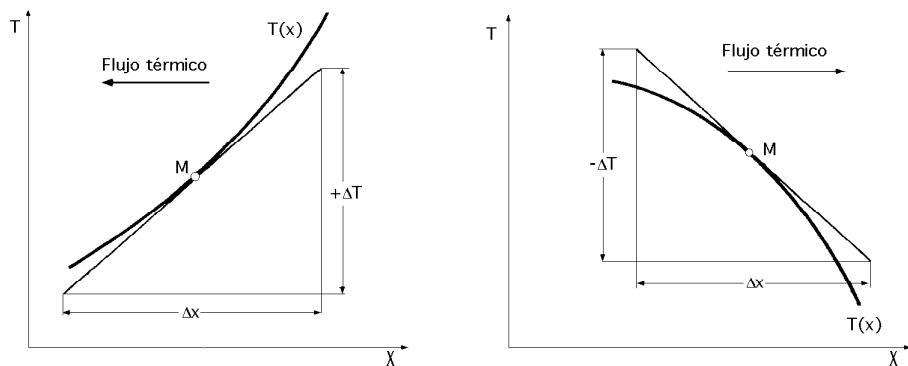


Fig I.1- Convenio de signos para la transmisión del calor por conducción

El flujo real de calor depende de la conductividad térmica k , que es una propiedad física del cuerpo, por lo que la ecuación anterior se puede expresar en la forma:

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

en la que si la superficie A de intercambio térmico se expresa en m^2 , la temperatura en grados Kelvin, la distancia x en metros y la transmisión del calor en W, las unidades de k serán $W/m^\circ K$.

El signo (-) es consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual, el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja. El gradiente de temperaturas es negativo si la temperatura disminuye para valores crecientes de x , por lo que si el calor transferido en la dirección positiva debe ser una magnitud positiva, en el segundo miembro de la ecuación anterior hay que introducir un signo negativo.

Pared plana.- Una aplicación inmediata de la ley de Fourier corresponde al caso de la transmisión del calor a través de una pared plana, Fig I.2. Cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies.

Si la conductividad térmica es uniforme, la integración de la ecuación anterior proporciona:

$$Q_k = -\frac{kA}{L}(T_2 - T_1) = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA}}$$

en la que L es el espesor de la pared, T_1 es la temperatura de la superficie de la izquierda $x = 0$, y T_2 es la temperatura de la superficie de la derecha $x = L$

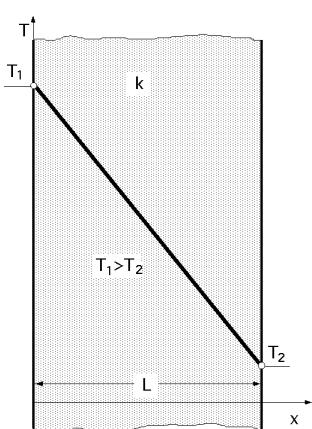


Fig I.2.- Muro plano

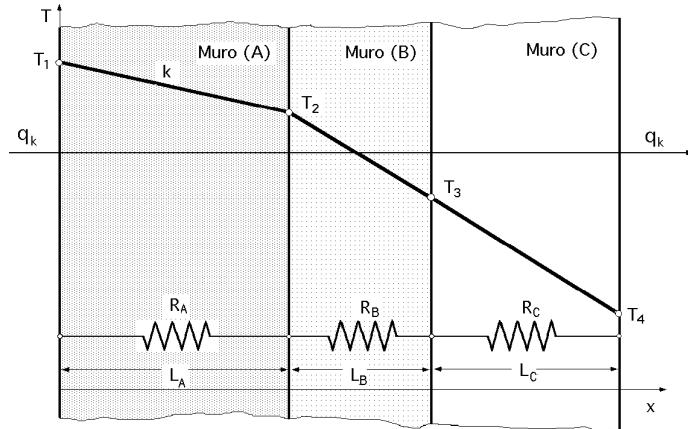


Fig I.3.- Pared compuesta

Paredes planas en serie.- Si el calor se propaga a través de varias paredes en buen contacto térmico, capas múltiples, el análisis del flujo de calor en estado estacionario a través de todas las secciones tiene que ser el mismo. Sin embargo y tal como se indica en la Fig I.3 en un sistema de tres capas, los gradientes de temperatura en éstas son distintos. El calor transmitido se puede expresar para cada sección y como es el mismo para todas las secciones, se puede poner:

$$Q_k = \frac{T_1 - T_2}{(\frac{L}{kA})_A} = \frac{T_2 - T_3}{(\frac{L}{kA})_B} = \frac{T_3 - T_4}{(\frac{L}{kA})_C} = \frac{T_1 - T_4}{(\frac{L}{kA})_A + (\frac{L}{kA})_B + (\frac{L}{kA})_C}$$

Si se considera un conjunto de n capas en perfecto contacto térmico el flujo de calor es:

$$Q_k = \frac{T_i - T_{i+1}}{(\frac{L}{kA})_i} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} (\frac{L}{kA})_i}$$

en la que T_1 y T_{n+1} son la temperatura superficial de la capa 1 y la temperatura superficial de la capa n , respectivamente

Analogía eléctrica de la conducción.- Permite ampliar el problema de la transmisión del calor por conducción a sistemas más complejos, utilizando conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos.

Si la transmisión de calor se considera análoga al flujo de electricidad, la expresión $\frac{L}{kA}$ equivale a una resistencia y la diferencia de temperaturas a una diferencia de potencial, por lo que la ecuación an-

terior se puede escribir en forma semejante a la ley de Ohm:

$$Q_k = \frac{\Delta T}{R_k}, \text{ siendo: } \begin{cases} \text{Potencial térmico: } \Delta T = T_1 - T_2 \\ \text{Resistencia térmica: } R_k = \frac{L}{k A} \end{cases}$$

La inversa de la resistencia térmica es la conductividad térmica $\frac{k}{L}$ W/m²K, o conductancia térmica unitaria del flujo de calor por conducción.

Paredes en paralelo.- Las ecuaciones anteriores se pueden utilizar en la resolución de problemas más complejos, en los que la conducción tiene lugar en paredes dispuestas en paralelo. La Fig I.4 muestra un bloque formado por dos materiales de áreas A_1 y A_2 en paralelo; para su resolución hay que tener en cuenta que para una determinada diferencia de temperaturas a través del bloque, cada capa del conjunto se puede analizar por separado, teniendo presentes las condiciones impuestas para el flujo unidimensional a través de cada una de las dos secciones.

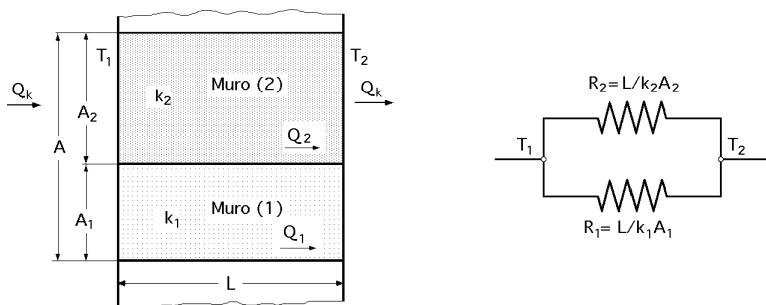


Fig I.4.- Transmisión de calor a través de una pared con dos secciones en paralelo

Si la diferencia de temperaturas entre los materiales en contacto es pequeña, el flujo de calor paralelo a las capas dominará sobre cualquier otro flujo normal a éstas, por lo que el problema se puede tratar como unidireccional sin pérdida importante de exactitud.

Como el calor fluye a través de los dos materiales según trayectorias separadas, el flujo total de calor Q_k será la suma de los dos flujos:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{(\frac{L}{k A})_1} + \frac{T_1 - T_2}{(\frac{L}{k A})_2} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

en la que el área total de transmisión del calor es la suma de las dos áreas individuales y la inversa de la resistencia total es igual a la suma de las inversas de todas las resistencias individuales.

Una aplicación más compleja del enfoque del circuito térmico sería la indicada en la Fig I.5, en la que el calor se transfiere a través de una estructura formada por una resistencia térmica en serie, otra en paralelo y una tercera en serie; para este sistema, el flujo térmico por unidad de superficie es:

$$Q_k = \frac{\Delta T_{global}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + R_2 + R_D} = \left| \frac{\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}{R_2 = \frac{R_B R_C}{R_B + R_C}} \right| = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} + R_D}$$

en la que n es el número de capas en serie, R_i es la resistencia térmica de la capa i , y ΔT_{global} es la diferencia de temperaturas entre las dos superficies exteriores.

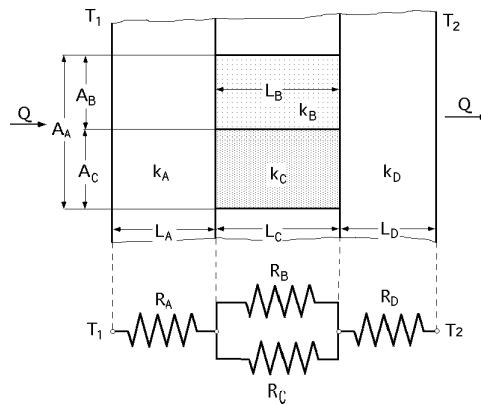


Fig I.5.- Circuito térmico en serie-paralelo-serie

El análisis del circuito precedente supone flujo unidimensional. Si las resistencias R_B y R_C son muy diferentes, los efectos bidimensionales pueden ser importantes.

Resistencia de contacto. - Cuando superficies a distintas temperaturas se ponen en contacto, aparece una resistencia térmica en la interfase de los sólidos, que se conoce como *resistencia de contacto*, y que se desarrolla cuando los dos materiales no ajustan exactamente, por lo que entre ambos puede quedar atrapada una delgada capa de fluido. Una vista ampliada del contacto entre las dos superficies mostraría que los sólidos se tocan sólo en picos superficiales, mientras que los huecos estarían ocupados por un fluido, o el vacío.

La resistencia de la interfase depende de:

- *El estado de las superficies caracterizado por la rugosidad superficial*
- *La presión que mantiene en contacto las dos superficies*
- *La naturaleza del fluido entre las superficies*
- *Su temperatura*

En la interfase, el mecanismo de la transmisión del calor, y su determinación, es compleja; la conducción del calor tiene lugar a través de los puntos de contacto del sólido en forma tridimensional por cuanto el calor se transmite por las áreas de contacto a través del fluido de la interfase por convección, y entre las superficies por radiación.

Si el calor a través de las superficies sólidas en contacto es Q , la diferencia de temperaturas a través del fluido que separa los dos sólidos es ΔT_i y la resistencia de contacto R_i se puede expresar en función de una conductancia interfacial h_{Ci} , $\text{W/m}^2\text{K}$, se tiene:

$$Q = h_{Ci} A \Delta T_i = \frac{\Delta T_i}{1/h_{Ci} A} = \frac{\Delta T_i}{R_i}$$

Cuando las dos superficies están en contacto térmico perfecto, la diferencia de temperaturas a través de la interfase es nula, por lo que su resistencia térmica es cero; un contacto térmico imperfecto tiene lugar cuando existe una diferencia de temperaturas en la interfase.

La resistencia por contacto depende de la presión con que se mantiene el contacto, y muestra un descenso notable cuando se alcanza el límite elástico de alguno de los materiales.

En los sólidos mecánicamente unidos no se suele considerar la resistencia de la interfase, a pesar de que siempre está presente. Sin embargo hay que conocer la existencia de la resistencia de la interfase y la diferencia de temperaturas resultante a través de la misma; en superficies rugosas y bajas presiones de unión, la caída de temperatura a través de la interfase puede ser importante, incluso dominante, y

hay que tenerla en cuenta. La problemática de la resistencia de la interfase es compleja y no existe ninguna teoría, o base de datos empíricos, que la describa exactamente para situaciones de interés industrial.

Tabla I.1.- Conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas

Interface	$h_{Ci} (\text{W}/\text{m}^2 \text{K})$
Cerámica-cerámica	500-3000
Cerámica-metal	1500-8500
Grafito metal	3000-6000
Acero inoxidable-acero inoxidable	1700-3700
Aluminio-aluminio	2200-12000
Acero inoxidable-aluminio	3000-4500
Cobre-cobre	10000-25000
Hierro-aluminio	4000-40000

La transmisión de calor a través de paredes compuestas se complica por el hecho de que las conductividades térmicas pueden ser función de la temperatura, al tiempo que el contacto entre las distintas superficies no es perfecto, apareciendo una caída de temperatura en la zona de separación de las citadas superficies. La variación de las conductividades térmicas se puede resolver considerando los efectos de forma aproximada y, para casos extremos, se puede hacer desarrollando en serie la función $k = k(T)$

Las resistencias térmicas de contacto se pueden expresar considerando:

- *La caída de temperatura, utilizando una conductividad térmica equivalente del medio de separación entre las superficies*

- *Los coeficientes de convección que engloban la resistencia de contacto*

La importancia de las resistencias de contacto depende del tipo de aplicación:

- *Cuando se trata de aislamientos, la resistencia de contacto favorece la disminución de las pérdidas de calor*

- *Cuando se trata de extraer calor de un sistema con flujos térmicos elevados, la resistencia de contacto debe ser baja, para evitar un elevado gradiente de temperaturas*

Se pueden establecer como casos límites:

- *Resistencias de contacto pequeñas, cuando la unión entre las superficies presenta muchos puntos de contacto*

- *Resistencias elevadas cuando los puntos de contacto son pocos*

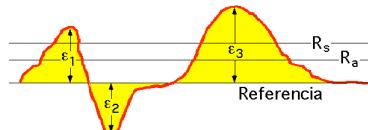


Fig I.6.- Rugosidad en superficies

En la Fig I.6 se indica el perfil de una superficie en la que el grado de rugosidad viene dado por los valores:

$$R_a = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n}{n}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2}{n}}$$

El contacto es tanto mejor cuanto menor es el valor de UA ó R_s. Para materiales blandos la unión es mayor que con materiales duros y, en ambos casos, la presión favorece el contacto.

Tabla I.2.- Resistencias térmicas de contacto

Material	Fluido	$R_s \cdot 10^6 (cm)$	$p (kg/cm^2)$	$h_{Ci} (Kcal/hm^2 \cdot ^\circ C)$	$T (^{\circ}C)$
Al	Aire	25-100	0,5	4000	100
Al	Aire	25-100	0,5	6000	200
Al	Aire	300	0,5	1500	100
Al	Aire	300	0,5	40000	200
Acero inoxidable	Aire	50	0,5	4800	100
Acero inoxidable	Aire	50	0,5	6000	250
Acero inoxidable	Aire	250	0,5	1000	100
Acero inoxidable	Aire	250	0,5	2000	250
Acero inoxidable	Aire	80	30	9000	100
Acero inoxidable	Aire	80	30	12000	250
Soldadura por puntos	Aire			500	
Cu limpio al vacío	Aire		1	1200	
Ag	Aire		1	2500	
Acero al carbono	Aire	500	15	2000	
Acero al carbono	Argón	50	100	24000	
Emparedados de acero inox. con 0,2 mm de amianto	Aire	100	5	500	

La temperatura y el tiempo también favorecen el contacto debido a efectos plásticos en la unión de las superficies.

Cuando los materiales que constituyen las paredes son fibras, polvos o láminas aglomeradas, el problema de la resistencia térmica de contacto es complicado, por lo que resulta práctico considerar una conductividad térmica equivalente que tenga en cuenta los mecanismos de transmisión de calor por conducción, convección y radiación.

Las resistencias térmicas de contacto aparecen también cuando se altera el estado superficial de los cuerpos y se denominan de incrustación o ensuciamiento, cuando se producen por cambios superficiales debidos al medio y condiciones de operación. Es bien conocido el caso de los intercambiadores de calor, que disminuyen su rendimiento térmico después de un cierto período de funcionamiento y en los que para volver a las condiciones normales hay que proceder a la limpieza y eliminación de la capa de ensuciamiento.

Cuando esta capa se adhiere fuertemente a la superficie hay que evitar que el espesor aumente excepcionalmente, utilizando sistemas auxiliares de purificación.

En otros casos se producen alteraciones dimensionales en la superficie:

- Por ataque químico con desprendimiento de capas, como sucede en los productos refractarios
- Por resquebrajaduras de los materiales, como sucede en el caso de los combustibles nucleares cerámicos

Esta clase de fenómenos presenta marcados efectos cuando existen variaciones de las cantidades de calor que alteran el campo de temperaturas estacionario; una ecuación que tiene en cuenta estos efectos es:

$$T_i - T_e = \frac{Q}{A} \left\{ \frac{1}{h_{Ci}} + \frac{1}{h_{Ce}} + \sum_{n=1}^{n-1} \frac{1}{h_{Cn}} + \sum_{n=1}^n \left(\frac{L_x}{k} \right)_n \right\}$$

en la que h_{Ci} considera los coeficientes de convección y radiación, además de la resistencia de contacto por ensuciamiento en la pared interior.

El primer sumatorio se refiere a las superficies de contacto donde se incluyen todos los posibles fenómenos del contacto y el segundo sumatorio comprende el paso de calor por conducción a través de n capas o paredes del sistema.

I.3.- CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica k es una propiedad de los materiales que, excepto en el caso de los gases a bajas temperaturas, no es posible predecir analíticamente; la información disponible está basada en medidas experimentales. En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura, pero en muchas situaciones prácticas se puede considerar con un valor medio constante, si el sistema tiene una temperatura media, lo que proporciona resultados bastante satisfactorios.

En la Tabla I.3 se relacionan los valores típicos de la conductividad térmica de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases, que nos dan una idea del orden de magnitud conque se presenta en la práctica, mientras que en la Fig I.7, se presentan dos gráficas de conductividades térmicas:

- Entre 0 y 450 W/m°K para metales y aleaciones (buenos conductores térmicos)
- Entre 0 y 0,8 W/m°K para algunos gases y líquidos

observándose la gran diferencia existente entre sus coeficientes de conductividad k .

Tabla I.3.- Conductividad térmica de algunos materiales

Material	k (W/m°K), a 300°K
Cobre	386
Aluminio	204
Vidrio	0,75
Plástico	0,2-0,3
Agua	0,6
Aceite de motores	0,15
Freón (líquido)	0,07
Aire	0,026

En los *materiales conductores* el mecanismo de la transmisión de calor por conducción está asociado a las vibraciones de la *estructura reticular* y al movimiento de los electrones libres, (metales y aleaciones), al igual que en los conductores eléctricos, por lo que materiales buenos conductores de la electricidad son también, en general, buenos conductores del calor, (cobre, plata, aluminio, etc).

Los *aislantes térmicos* (vidrio, plásticos, etc) que requieren de una *estructura porosa* y un gas atrapado en la misma, son también buenos aislantes eléctricos; en estos materiales, la transferencia de calor puede tener lugar de diversas formas:

- a) *Conducción a través de la estructura sólida porosa o fibrosa*
- b) *Conducción y/o convección a través del aire atrapado en los espacios vacíos*
- c) *Radiación entre porciones de la estructura sólida, lo cual es especialmente importante a temperaturas elevadas o en recintos vacíos*

Se han desarrollado materiales superaislantes para aplicaciones criogénicas, que constan de varias capas de materiales altamente reflectantes separados por espacios vacíos, que minimizan la conducción y la convección, alcanzándose conductividades térmicas del orden de 0,02 W/m°K.

En muchos materiales el valor de k no es constante, sino que varía con la temperatura y con la composición química de los mismos; cuando sólo depende de la temperatura, el valor de k se puede poner en la forma:

$$k = k(T) = k_0 (1 + \beta T)$$

siendo k_0 el valor de la conductividad a la temperatura de referencia, y β una constante, (coeficiente de dilatación). En tal caso la integración de la ecuación de Fourier proporciona:

$$Q_k = - \int_{T_1}^{T_2} A k_0 (1 + \beta T) dT = \frac{k_0 A}{L} \{T_1 - T_2 + \frac{\beta}{2} (T_1^2 - T_2^2)\} = \frac{k_m A}{L} (T_1 - T_2)$$

en la que k_m es el valor de k a la temperatura $\frac{T_1 + T_2}{2}$

Coefficientes de conductividad térmica para las aleaciones.- En la Fig I.7a se muestra el comportamiento de la conductividad térmica de algunos metales y aleaciones, (cobre, aluminio, acero al carbono, acero inoxidable 18-8, etc), con la temperatura.

La conductividad térmica de las aleaciones, en general, y de los aceros en particular, se puede determinar mediante la relación:

$$k = \frac{k_0}{1 + \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n}$$

en la que k_0 es la conductividad térmica del metal base, y $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, son unos factores de corrección de dicha conductividad, propios de cada metal que la caracterizan. La conductividad térmica del hierro puro viene representada en la Fig I.8, mientras que los factores característicos de los metales adicionales que entran en la composición de un acero aleado, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, en la Fig I.9.

Conductividad térmica de líquidos.- En la Fig I.7b se indica la conductividad térmica de algunos líquidos en función de la temperatura, observándose que la conductividad térmica de los líquidos decrece a medida que aumenta su temperatura, excepto en el caso del agua, pero el cambio es tan pequeño que en la mayor parte de las situaciones prácticas, la conductividad térmica se puede suponer constante para ciertos intervalos de temperatura; asimismo, en los líquidos no hay una dependencia apreciable con la presión, debido a que éstos son prácticamente incompresibles.

Para la determinación de la difusividad térmica en líquidos, se propone la fórmula:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{5}{4} \sqrt[3]{\frac{\rho}{M}}$$

en la que M es la masa molecular y ρ la densidad del líquido.

Como la ecuación no es homogénea, conviene precisar las unidades en que se deben expresar las magnitudes que en ella figuran, k en Kcal/m.hora°C, ρ en kg/dm³ y c_p en Kcal/kg°C

Para definir la variación de la conductividad térmica k en función de la temperatura, Riedel propone la ecuación:

$$k = k_K \{1 - 6,7 (1 - T_r)^{2/3}\}$$

siendo:

k la conductividad a la temperatura $T = T_r T_k$ en °K

k_k la conductividad a la temperatura crítica T_k en °K

T_r la temperatura reducida igual a $\frac{T}{T_k}$

En el caso en que se desconozca la conductividad k_k , la ecuación anterior se puede emplear para determinar la conductividad a una temperatura para la que no existen resultados de medida; en estas circunstancias el valor de k_k se calcula para unas ciertas condiciones en las que se conozca T_k con ayuda de la citada ecuación. Si no se conoce T_k se pueden determinar los valores de k_k y de T_k efectuando dos medidas de k a temperaturas suficientemente espaciadas una de otra; esta ecuación se puede utilizar

para temperaturas reducidas del orden de 0,9, aproximadamente.

La conductividad de los líquidos varía con la temperatura; en las proximidades del punto crítico disminuye más rápidamente, ya que la conductividad del vapor es siempre más baja.

Si se conocen la conductividad del vapor saturado seco k' y la temperatura crítica del líquido T_k en °K, la conductividad del líquido a la temperatura de saturación se puede deducir, con ayuda de la Tabla I.3, de la relación: $\frac{k'}{k} = f(\frac{T}{T_k})$, Tabla I.4.

Tabla I.4.- Valores de k'/k

T/T_k	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1
k'/k	38	33	27	19,3	15,5	12	9,3	4,3	1

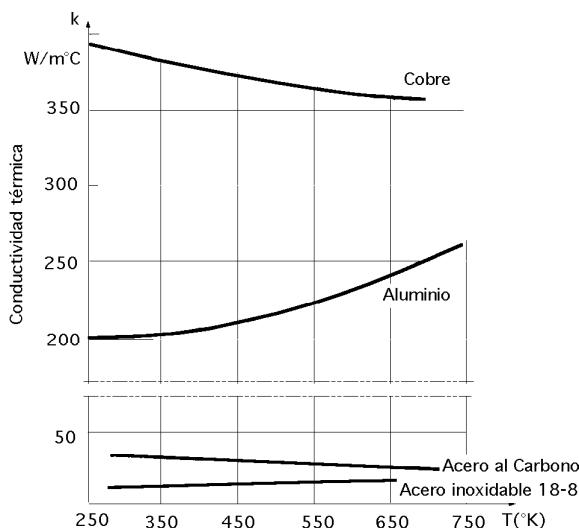


Fig I.7.a.- Conductividad térmica metales y aleaciones

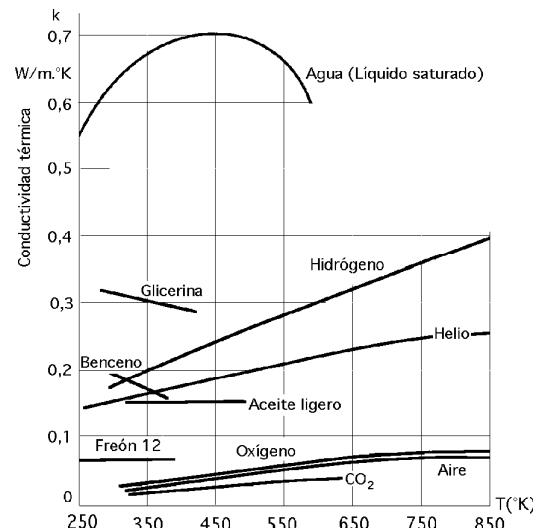


Fig I.7.b.- Conductividad térmica líquidos, gases y vapores

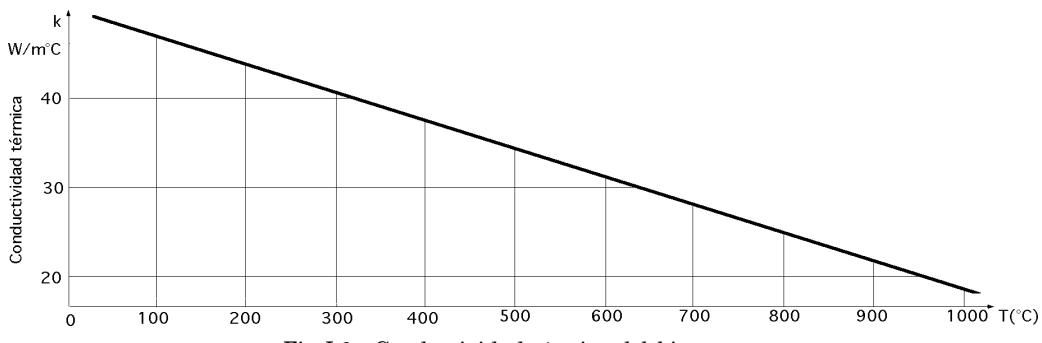


Fig I.8.- Conductividad térmica del hierro puro

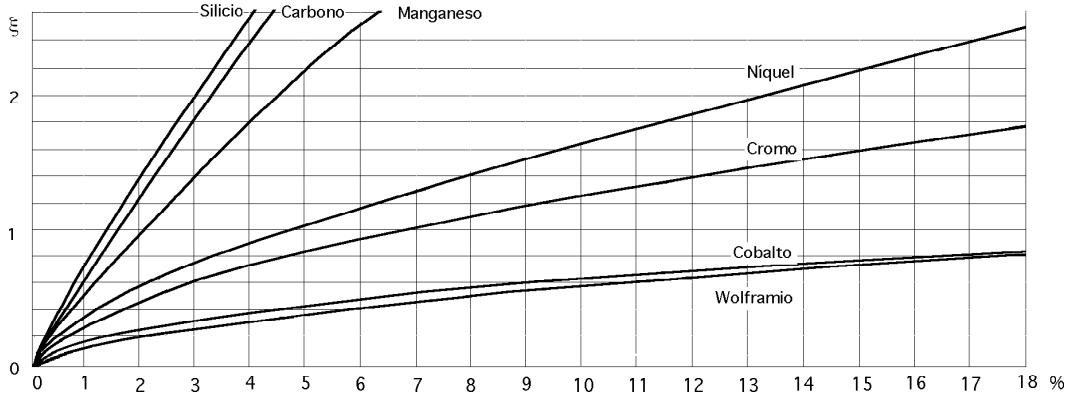


Fig I.9.- Factores de corrección de la conductividad térmica de los aceros aleados

Conductividad térmica de gases y vapores.- En la Fig I.7 y a título de ejemplo, se muestran algunas conductividades térmicas de gases y vapores, observándose su variación con la temperatura. La conductividad térmica de los gases crece con la presión, pero este aumento a presiones normales es tan pequeño que se puede despreciar; sin embargo, en las proximidades del punto crítico, y para presiones o muy bajas, o muy altas, la variación de la conductividad térmica en función de la presión, no se puede despreciar. La conductividad térmica de los gases se incrementa con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Los gases presentan conductividades térmicas muy bajas, tanto más, cuanto más elevado es su peso molecular. Por analogía con el proceso de la transmisión del calor, y sobre la base de la teoría molecular, se propone la siguiente relación (Sutherland) entre la conductividad y la viscosidad dinámica de un gas, de la forma:

$$k = \varepsilon c_v \eta = \varepsilon c_v \eta_0 \frac{1 + \frac{C}{T_0}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

en la que C es una constante con dimensiones de temperatura, y ε un coeficiente numérico (módulo de Maxwell), que depende del número n de átomos contenidos en la molécula, de la forma (B. Koch):

$$\varepsilon = 1 + \frac{4,5}{1 + 2n}, \text{ con: } \begin{cases} \varepsilon = 2,50 \text{ para gases monoatómicos} ; \varepsilon = 1,90 \text{ para gases biatómicos} \\ \varepsilon = 1,64 \text{ para gases triatómicos} ; \varepsilon = 1,50 \text{ para gases tetratómicos} \end{cases}$$

En la Tabla I.5 se indican los valores de C y η_0 para diversos gases industriales.

Tabla I.5.- Valores de C y η_0 de la fórmula de Sutherland

Fluido	C	$\eta_0 = (\text{kg seg} / \text{m}^2)$
Aire	114	0,166
Oxígeno	128	0,18
Hidrógeno	74	0,083
Nitrógeno	110	0,16
Anhídrido carbónico	260	0,137
Monóxido de carbono	---	0,16
Vapor de agua	673	0,087

I.4. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

Cuando un fluido a T_F se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_{pF} el proceso de intercambio de energía térmica se denomina *convección*. En este capítulo introductorio no desarrollamos procedimientos analíticos, sino una visión general del fenómeno, planteando las ecuaciones básicas que se utilizan en los cálculos.

Existen dos tipos de convección: $\begin{cases} \text{Libre o natural} \\ \text{Forzada} \end{cases}$

En la *convección natural*, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascendionales; el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior; ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.

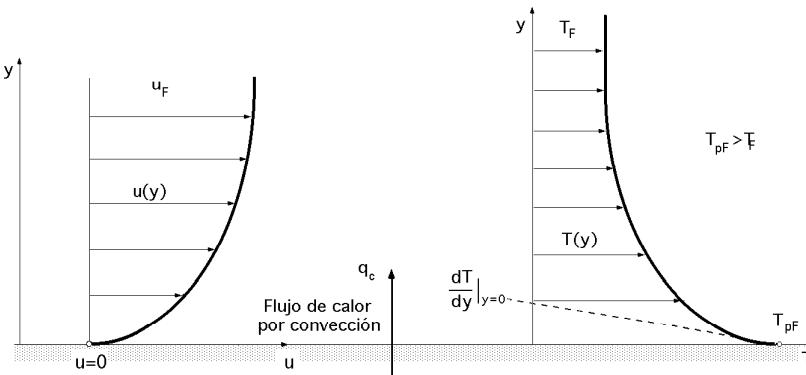


Fig I.10.- Distribución de la temperatura y la velocidad sobre una placa plana en convección forzada

La *convección forzada* tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad u_F sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_{pF} , mayor o menor que la del fluido T_F . Como la velocidad del fluido en la convección forzada u_F es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Independientemente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida Q_c , se puede escribir (Ley de Newton):

$$Q_c = h_{cF} A (T_{pF} - T_F) \text{ en la que:}$$

- h_{cF} es la conductancia convectiva térmica unitaria o coeficiente de transmisión del calor por convección en la interfase líquido-sólido, en $\text{W/m}^2\text{K}$

- A es el área superficial en contacto con el fluido, en m^2

- T_{pF} es la temperatura de la superficie

- T_F es la temperatura del fluido no perturbado

La ecuación anterior sirve como definición del coeficiente de convección h_{cF} ; su valor numérico se tiene que determinar analíticamente o experimentalmente.

En la Tabla I.6 se relacionan algunos valores aproximados de los coeficientes de transmisión de calor por convección, incluyendo la vaporización (ebullición) y la condensación, consideradas usualmente como una parte del área de la convección.

La relación entre el calor transmitido a un fluido por convección y el flujo del fluido, se puede obtener a partir de la Fig I.10, que muestra una placa plana caliente que se enfriá mediante una corriente de aire que fluye sobre aquélla, (convección forzada), y las distribuciones de la velocidad y temperatura.

Se observa que la velocidad $u = u(y)$ decrece en la dirección y hacia la superficie como resultado de la fuerza de rozamiento (viscosidad). Como la velocidad de la capa de fluido adyacente a la pared es $u = 0$, la transmisión de calor por unidad de área entre la superficie y esta capa de fluido se puede considerar debida exclusivamente a la conducción:

$$\frac{Q_c}{A} = - k_F \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = h_C (T_{pF} - T_F)$$

Este punto de vista sugiere que el proceso pudiera ser eminentemente conductivo, pero como el gradiente de temperaturas en la superficie viene determinado por la velocidad con que el fluido situado lejos de la pared puede transportar la energía a la corriente principal, (el gradiente de temperaturas sobre la pared depende del campo de velocidades del fluido), resulta que a mayor velocidad se produce un mayor gradiente de temperaturas y una transferencia de calor superior, por lo que el proceso es prácticamente convectivo, sin despreciar la conductividad térmica que tiene igualmente un papel importante.

Tabla I.6.- Valores representativos del coeficientes de transmisión de calor por convección

Condición	Btu/ft ² h °F	W/m ² °K
Convección natural aire	1 a 5	6 a 30
Convección natural agua	3 a 17	18 a 100
Convección forzada aire	5 a 50	30 a 300
Convección forzada vapor	300 a 800	1800 a 4800
Convección forzada aceite	5 a 300	30 a 1800
Convección forzada agua	50 a 2000	300 a 12000
Vaporización agua	500 a 20000	3000 a 120000
Condensación agua	850 a 20000	5000 a 120000

La situación es muy similar en la convección natural, Fig I.11; la diferencia principal consiste en que en la convección forzada la velocidad lejos de la superficie se aproxima al valor de la corriente libre impuesta por una fuerza externa, mientras que en la convección natural la velocidad depende de las propiedades del fluido, que se indican a continuación:

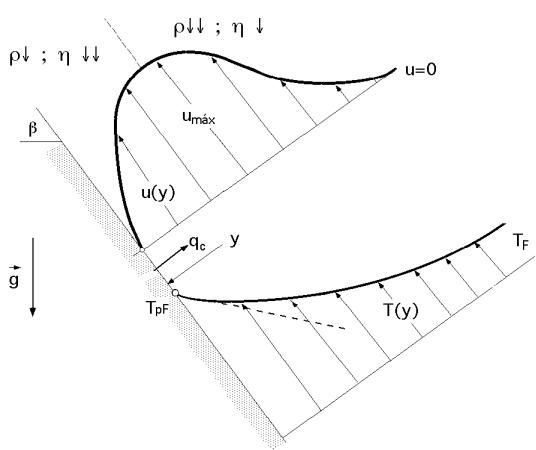


Fig I.11.- Distribución de la temperatura y la velocidad en convección natural sobre una placa plana inclinada

- En los gases, un aumento de la temperatura hace que la densidad disminuya y la viscosidad aumente
- En los líquidos, un aumento de la temperatura implica que la densidad y la viscosidad disminuyan

En la convección natural, si el fluido es un líquido, la velocidad crece al principio con la distancia a la placa, debido a que la viscosidad disminuye más rápidamente que la densidad, que lo hace más lentamente, fenómeno que se invierte desde la zona de velocidad máxima hasta el resto del fluido; la fuerza ascensional decrece a medida que la densidad del fluido se approxima a la del fluido de los alrededores, por lo que la velocidad alcanza, en primer lugar, un máximo y, posteriormente, se aproxima a cero lejos de la superficie caliente.

La distribución de temperaturas en la convección natural y en la forzada tiene una forma similar; en ambos casos, el mecanismo de la transmisión del calor en la interfase *fluido / sólido* corresponde a la conducción.

El coeficiente de transmisión de calor por convección forzada depende, en general, de la densidad, de la viscosidad y de la velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico), es decir:

$$h_{cF} = f(\rho, \eta, u_F, k, c_p)$$

En la convección forzada la velocidad viene impuesta al sistema por una bomba, ventilador, etc, y se puede medir directamente, $u_F = \frac{Q}{\Omega}$

En la convección natural, la velocidad es de la forma: $u_F = f(\Delta T, \beta, g)$, y depende de:

- La diferencia de temperaturas ΔT entre la superficie y el fluido
- Del coeficiente de dilatación térmica del fluido β que determina el cambio de densidad por unidad de diferencia de temperatura
- Del campo de fuerzas exteriores (gravedad)

El número adimensional que caracteriza la convección natural es el número de Grashoff, que es el cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas de viscosidad, de la forma: $Gr = \frac{g \beta}{\nu^2} \Delta T L^3$

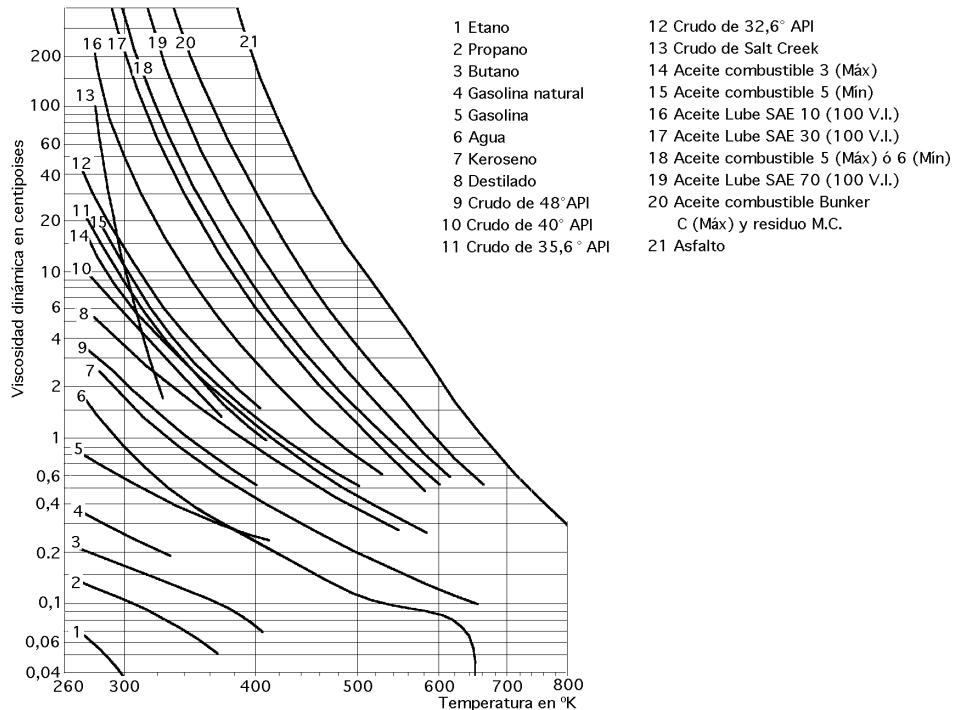


Fig I.12.- Viscosidad del agua y de algunos líquidos derivados del petróleo

Para la convección natural en régimen laminar el n^o de Rayleigh es: $Ra = Gr Pr < 10^7$

Para la convección natural en régimen turbulento el n^o de Rayleigh es: $Ra = Gr Pr > 10^9$

El número adimensional que caracteriza la convección forzada es el número de Reynolds, que es el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad, de la forma:

$$Re = \frac{u_F L}{\nu} \Rightarrow \begin{cases} \text{Régimen laminar por el interior de tuberías: } Re < 2000 \\ \text{Régimen turbulento por el interior de tuberías: } Re > 8000 \end{cases}$$

El número adimensional que define al fluido es el n^o de Prandtl, clasificándolo, en primera aproximación, en cuatro grandes grupos:

Gases: $Pr \approx 1$

Líquidos (agua, aceites calientes, etc): $Pr > 1$

Aceites a bajas temperaturas: $Pr > 1000$

Metales líquidos: $Pr \ll 1$

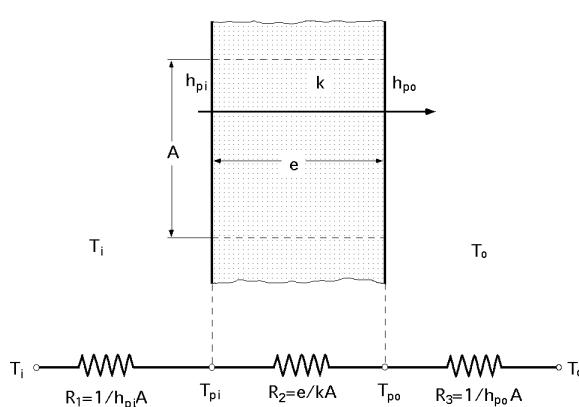


Fig I.13.- Analogía eléctrica correspondiente a la transmisión de calor a través de una pared plana con convección en sus dos caras

La transmisión de calor por convección se puede tratar también dentro de la estructura de una red de resistencias térmicas, en la forma

$$R_C = \frac{1}{h_C A}, \text{ y esta resistencia, en una interfa-}$$

se superficie-fluido, se incorpora fácilmente a una red térmica en la que participen otras formas de transmisión de calor.

El calor transmitido en el ejemplo de la Fig I.13 entre dos fluidos separados por una pared plana, viene dado por:

$$Q = \frac{T_i - T_0}{\sum_{i=1}^3 R_i} = \frac{T_i - T_0}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{h_{ci} A} + \frac{e}{k A} + \frac{1}{h_{co} A}}$$

I.6.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Mientras que la conducción y la convección térmicas tienen lugar sólo a través de un medio material, la radiación térmica puede transportar el calor a través de un fluido o del vacío, en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Existen muchos fenómenos diferentes de radiación electromagnética pero en Ingeniería Térmica sólo consideraremos la radiación térmica, es decir, aquella que transporta energía en forma de calor.

La energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a que se encuentre y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto o cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie Q_r , dada por la ecuación:

$$Q_r = \sigma A T^4 = A E_b$$

en la que: *E_b* es el poder emisivo del radiador, vieniendo expresado el calor radiante Q_r en W, la temperatura T de la superficie en °K, y la constante dimensional σ de Stefan-Boltzman en unidades SI, en la forma:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

La ecuación anterior dice que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

Aunque la emisión es independiente de las condiciones de los alrededores, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio. Si un cuerpo negro a T_1 (°K), irradia calor a un recinto que le rodea completamente y cuya superficie es también negra a T_2 (°K), es decir, absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, la transferencia de energía radiante viene dada por:

$$Q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Si los dos cuerpos negros tienen entre sí una determinada relación geométrica, que se determina mediante un factor de forma F , el calor radiante transferido entre ellos es:

$$Q_r = Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación con un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emiten una fracción constante de la energía que emitirían considerados como cuerpo negro para cada longitud de onda, se llaman cuerpos grises.

Tabla I.7.- Valores representativos de la emisividad ϵ

Material	Emisividad
Metales en estado pulido	$0,01 < \epsilon < 0,08$
Metales tal como se reciben (mates)	$0,1 < \epsilon < 0,2$
Metales en estado oxidado	
Oxidos cerámicos	$0,25 < \epsilon < 0,7$
Pinturas especiales	$0,4 < \epsilon < 0,8$

Un cuerpo gris emite radiación según la expresión: $Q_r = \varepsilon A E_b = \varepsilon \sigma A T^4$

El calor radiante neto transferido por un cuerpo gris a la temperatura T_1 a un cuerpo negro que le rodea a la temperatura T_2 es:

$$Q_r = \varepsilon_1 A_1 (E_{b_1} - E_{b_2}) = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

siendo ε_1 la emitancia de la superficie gris, igual a la relación entre la emisión de la superficie gris y la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura.

Si T_1 y T_2 no difieren demasiado, se puede poner:

$$Q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) =$$

$$= \left| \begin{array}{l} T_1 \approx T_2 \approx T_m ; \quad T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} ; \quad T_1 + T_2 = 2 T_m ; \quad T_1 - T_2 \ll T_1 \\ (T_1^2 + T_2^2) = (T_1 + T_2)^2 - 2 T_1 T_2 = 4 T_m^2 - 2 T_m^2 = 2 T_m^2 \end{array} \right| = \sigma A_1 \varepsilon_1 4 T_m^3 (T_1 - T_2) = A_1 h_r (T_1 - T_2)$$

siendo $h_r = 4 \varepsilon_1 \sigma T_m^3$, el coeficiente de transferencia de calor por radiación

A la temperatura de $25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$, se obtiene: $h_r = 6 \varepsilon_1 \text{ W/m}^2\text{K}$, por lo que el coeficiente de transferencia de calor por radiación a la temperatura ambiente es 6 veces la emitancia de la superficie.

Para: $T_1 = 320^\circ\text{K}$ y $T_2 = 300^\circ\text{K}$, el error debido al empleo de la aproximación es del 0,1%

Para: $T_1 = 400^\circ\text{K}$ y $T_2 = 300^\circ\text{K}$, el error debido al empleo de la aproximación es del 2%

Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto, pero poseen entre sí una determinada relación geométrica, el calor radiante neto transferido entre ellos viene dado por:

$$Q_{12} = \sigma A_1 F_{12}^* (T_1^4 - T_2^4) = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{\rho_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1}{A_2} \frac{\rho_1}{\varepsilon_1}} A_1$$

en la que F_{12}^* es un factor de forma que modifica la ecuación de los radiadores perfectos para tener en cuenta las emitancias y las geometrías relativas de los cuerpos reales.

En muchos problemas industriales, la radiación se combina con otros modos de transmisión del calor. La solución de tales problemas se puede simplificar utilizando una resistencia térmica R_r para la radiación; su definición es semejante a la de la resistencia térmica de convección y conducción.

El calor transferido por radiación se puede poner en la forma convectiva:



Fig I.14.- Concepto de entorno y medio ambiente

$$Q_r = \frac{T_1 - T_{2'}}{R_r} = h_r A (T_L - T_2)$$

en la que $T_{2'}$ es una temperatura de referencia cuya elección viene impuesta por las condiciones de convección, (temperatura media del entorno en contacto con la superficie), mientras que T_2 es una temperatura de referencia que viene impuesta por las condiciones de radiación, (medio ambiente), Fig I.14. La resistencia térmica radiativa viene dada por:

$$R_r = \frac{T_1 - T_2}{\sigma A_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{1}{\sigma A_1 F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}$$

La conductividad térmica unitaria de la radiación h_r se define mediante la expresión:

$$h_r = \frac{1}{R_r A_I} = \frac{\sigma F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} = \sigma F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)$$

I.7.- MECANISMOS COMBINADOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Normalmente la energía térmica se transmite en etapas a través de un cierto número de secciones conectadas en serie, intercalando entre ellas otras situaciones en paralelo; para dar una idea, consideraremos una aplicación de la transmisión de calor en la cámara de combustión de una turbina de gas, en la que los productos de la combustión que la atraviesan, calientan las paredes siendo estas refrigeradas mediante un refrigerante que circula por un anillo exterior a la pared, Fig I.15.

Los productos de la combustión contienen gases como el CO, CO₂ y H₂O que emiten y absorben la radiación; en la primera sección de este sistema el calor se transfiere del gas incandescente a la superficie interna de la pared de la cámara de combustión por los mecanismos de convección y radiación que actúan en paralelo.

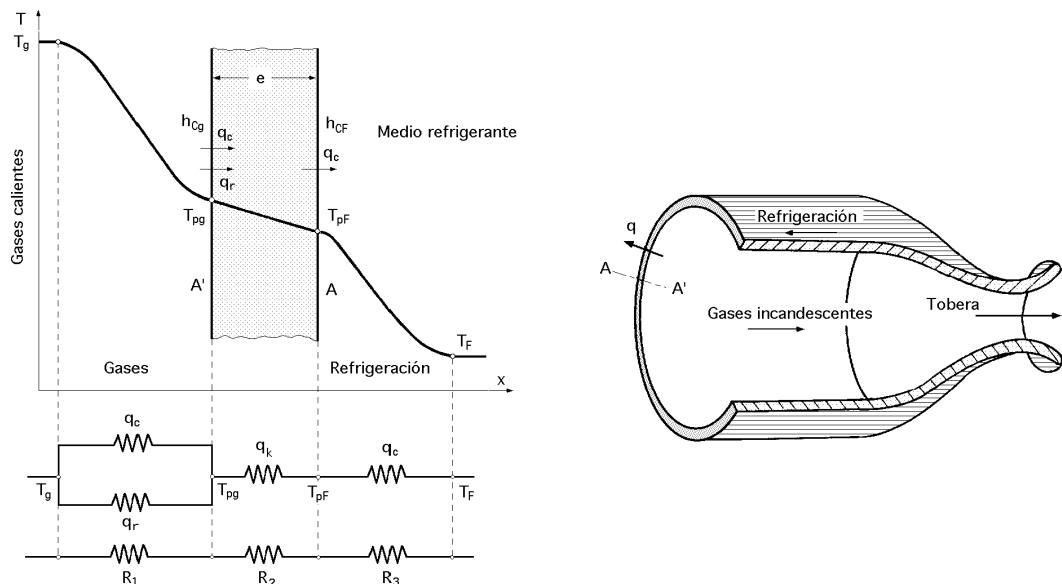


Fig I.15.- Transmisión de calor en la cámara de combustión de una turbina de gas

El calor total Q en la superficie de la pared, a cierta distancia de la tobera es:

$$Q = Q_{c(gases)} + Q_r = h_{cg} A (T_g - T_{pg}) + h_r A (T_g - T_{pg}) = (h_{cg} + h_r) (T_g - T_{pg}) A = \frac{T_g - T_{pg}}{R_1}$$

en la que:

- $R_1 = \frac{1}{(h_{cg} + h_r) A}$ es una resistencia térmica
- T_g es la temperatura del gas incandescente
- T_{pg} es la temperatura de la superficie interna de la pared en contacto con el gas

En estado estacionario el calor se conduce a través de la pared periférica a la misma velocidad que en la superficie y en la que el valor de Q es:

$$Q = Q_k = \frac{k A}{e} (T_{pg} - T_{pf}) = \frac{T_{pg} - T_{pf}}{R_2} ; \quad R_2 = \frac{e}{k A}$$

siendo T_{pF} la temperatura superficial de la pared en el lado refrigerado y R_2 la resistencia térmica de la segunda sección.

Después de atravesar la pared, el calor fluye por convección a través de la tercera sección del sistema hacia el refrigerante. El calor en la última etapa es:

$$Q = Q_c = h_{CF} A (T_{pF} - T_F) = \frac{T_{pF} - T_F}{R_3} ; \quad R_3 = \frac{1}{h_{CF} A}$$

siendo T_F la temperatura del refrigerante y R_3 la resistencia térmica en la tercera sección del sistema.

Hay que hacer constar que los valores numéricos de los coeficientes de convección en la primera h_{cg} y tercera h_{CF} sección del sistema dependen de muchos factores y, por lo tanto, son diferentes.

Además, las áreas de las tres secciones sometidas al flujo de calor no son iguales. No obstante, como la pared es muy delgada, el cambio en el área del flujo de calor es tan pequeño que puede despreciarse en este sistema. En la práctica ocurre con frecuencia que sólo se conocen las temperaturas de los gases incandescentes y del refrigerante, por lo que el calor es:

$$Q = \frac{T_g - T_F}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_g - T_F}{\frac{1}{h_{cg}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{CF}}} A$$

En la ecuación anterior el flujo de calor se ha expresado exclusivamente en función de un potencial global de temperaturas y las características de transmisión del calor de las secciones individuales en que se ha dividido el camino seguido por el flujo. A partir de estas relaciones es posible evaluar cuantitativamente la importancia de cada resistencia térmica individual de la transmisión, por lo que una inspección del orden de magnitud de los términos individuales del denominador indican, frecuentemente, la forma de simplificar el problema, de modo que cuando uno u otro término domine cuantitativamente, se puede, a veces, despreciar el resto.

Existen ciertos tipos de problemas, principalmente en el diseño de intercambiadores de calor, en los que conviene simplificar la ecuación anterior combinando las resistencias o conductancias individuales del sistema térmico, reduciéndolas a una magnitud llamada *coeficiente global de transmisión del calor U*; la última ecuación se puede expresar en función de este coeficiente global en la forma:

$$Q = U A \Delta T_{total} = \frac{\Delta T_{total}}{R_1 + R_2 + R_3} \Rightarrow U A = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Para una pared plana de espesor e entre dos fluidos: $\frac{1}{U A} = \frac{1}{h_c A} + \frac{e}{k A} + \frac{1}{h_F A}$

Para el ejemplo anterior: $\frac{1}{U A} = \frac{1}{(h_{cg} + h_r) A} + \frac{e}{k A} + \frac{1}{h_{CF} A}$

El coeficiente global U se calcula siempre en función de una superficie A de intercambio térmico del sistema, que habrá que fijar de antemano.

Tabla I.8.- Valores aproximados del coeficiente global de transferencia de calor

Componente físico	$W/m^2 \circ K$	Componente físico	$W/m^2 \circ K$
Ventana de cristal plano	6,2	Intercambiador agua-aceite	110-340
Ventana de doble cristal plano	2,3	Vapor a gas	30-300
Condensador de vapor	1100-5700	Agua a gas	55-200
Vaporizador de agua de un ciclo	1100-8500	Intercambiador tubo aleteado con agua por el interior y aire por el exterior	30-300
Intercambiador agua-agua	850-1700		

ANEXO.- MATERIALES AISLANTES

AISLAMIENTOS TÉRMICOS.- Son necesarios para evitar pérdidas de energía térmica al medio que rodea los elementos de una instalación, como recipientes, tuberías y otros accesorios. Como la cantidad de energía térmica que se consume es creciente, el desarrollo de buenos aislamientos térmicos contribuye a una utilización más racional de la misma. Las industrias de mayor consumo energético son las del acero, aluminio, productos químicos, petroquímicas, papel, vidrio, arcillas, cemento, alimentación, etc.

El consumo de energía se distribuye en la siguiente forma:

50% en usos industriales

25% en transportes

25% en edificios

El 50% de la energía que se pierde tiene lugar a temperaturas inferiores a 100°C, el 25% a temperaturas menores de 250°C y el 25% restante a temperaturas superiores a 250°C, estimándose que con buenos aislamientos las pérdidas se podrían reducir un 15% compensando los precios de coste de materiales, amortización y mantenimiento.

En la Fig A-1 se indica el flujo térmico para aislamientos con óxido de magnesio de 85%.

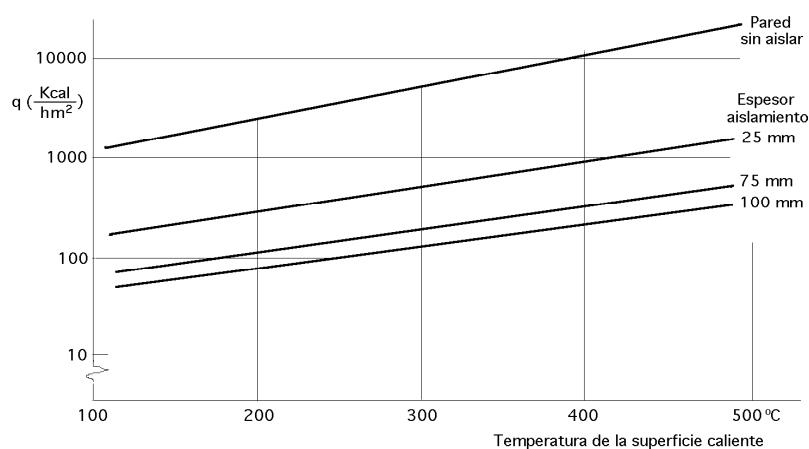


Fig A-1.- Pérdidas térmicas al exterior de una pared de MgO plana sin aislar y aislada con diversos espesores

Los aislamientos térmicos se caracterizan por los bajos valores de la conductividad térmica, aunque en la elección de un determinado aislante hay que tener en cuenta otros factores como, su forma geométrica y tamaño, y propiedades:

- Que afectan a la conductividad térmica, tales como temperatura, humedad, sinterización, emisividad
- Mecánicas, como la resistencia a la tracción y compresión, resistencia al choque térmico, fatiga, dilata-

ciones y contracciones con la temperatura, abrasión, etc

- Eutécticas a distintas temperaturas y humedades
- Químicas, como la corrosión con y sin humedad, puntos de inflamación en medios ambientales de gases, polvos, etc.
- Trabajo, como cortes y preparación de formas, adhesivos, secado, olores, irritación de ojos o piel, toxicidad por polvos o disolventes de los materiales de juntas

La elección de un material aislante exige analizar sus propiedades para la función específica a la que se destina; los datos procedentes de casas comerciales son escasos y los resultados de medidas experimentales en laboratorio no especifican, en muchos casos:

- El comportamiento en servicio
- Los problemas de unión a los elementos principales del equipo
- La degradación del material
- La variación de las propiedades con el tiempo, etc

Los modos de transmisión de calor en un aislante son la conducción, convección y radiación. El aislamiento térmico se logra aumentando la resistencia térmica de un material a la transmisión de calor por cualquiera de los modos anteriores. De acuerdo con el intervalo de temperaturas de funcionamiento los aislantes se suelen agrupar en:

Aislantes para temperaturas	{	elevadas , por encima de 500°C
		intermedias , entre 100°C y 500°C
		bajas , entre -100°C y 100°C
		criogénicas , entre -100°C y -270°C

AISLANTES PARA TEMPERATURAS ELEVADAS.- A temperaturas superiores a 500°C, los aislantes térmicos son, en general, de tipo cerámico tanto más refractarios cuanto mayor es la temperatura de operación. Estos materiales presentan conductividades térmicas elevadas frente a las conductividades que se obtienen cuando estos mismos materiales se preparan con poros o como fibra agrupada en haces, tejidos o aglomerados de ambos tipos.

En casos especiales, como sucede en los aislamientos de componentes de reactores nucleares, éstos se logran con capas múltiples de metales sin puntos o zonas de contacto, y son conocidos como aislamientos reflectores, en los que:

- La resistencia a la conducción se logra por la proximidad de las láminas
- La resistencia a la radiación se logra por el bajo poder emisivo de los metales

Esta distancia se puede aplicar a cualquier temperatura, y es adecuada en equipos que puedan tener
contaminación
necesidades frecuentes de inspección
limpieza especial

Su precio es elevado, pero sus ventajas y vida de funcionamiento, hacen que este sistema se aplique a otros procesos industriales que utilizaban aislamientos clásicos.

Entre los aislantes para temperaturas superiores a 500°C se pueden citar:

- Ladrillos cerámicos aislantes
- Morteros y sus mezclas
- Silicato cárlico
- Fibras minerales
- Fibras cerámicas de $Al_2O_3-SiO_2$

- *Fibras de Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , carbón*
- *Aislamientos reflectores de láminas metálicas*

Los ladrillos aislantes se obtienen mezclando materiales refractarios con productos combustibles que se eliminan por calentamiento, resultando ladrillos porosos con una densidad aparente comprendida entre un 25÷50% de la teórica.

Tabla A-1.- Materiales aislantes para altas temperaturas ($T > 500^{\circ}C$)

	Densidad gr/cm ³	Temperatura °C	k_c Kcal/hm°C
<i>Arcillas ladrillos</i>	0,7	650	0,4
		900	0,5
<i>Arcillas caolín</i>	0,4	500	0,2
		1000	0,4
<i>Arcillas caolín</i>	0,3	1000	0,18
<i>Carbón</i>	0,2	500	0,08
		1000	0,12
<i>Grafito en tela (vacío) 5 mm espesor</i>	0,08	500	0,08
		1000	0,25
		2500	0,5
		1500	0,16
<i>Grafito en tela (atmósfera de N_2) 5 mm espesor</i>		2700	1,5
<i>Diatomeas, polvo</i>	0,2	500	0,08
		900	0,15
<i>Magnesia (85%) bloques y formas</i>	0,17	500	0,05 a 0,06
<i>Roca lana (bloques)</i>		600	0,052
<i>Silice (fibras tela)</i>	0,1	300	0,07
<i>Silice microcuarzo</i>	0,05	350	0,23
<i>Titanato potásico fibras</i>	0,8	550	0,04
<i>Circonia espuma</i>	0,9	500	0,3
		1000	0,35
<i>Circonia con tela (en vacío) 2 mm de espesor</i>	0,32	500	0,05
		1000	0,14
		1700	0,32
		2000	0,47

Los morteros y hormigones hasta temperaturas de $1400^{\circ}C$, se obtienen mezclando materiales como el cemento Portland, con $\begin{cases} \text{arenas y gravas ordinarias} \\ \text{refractarios sílicoaluminosos} \end{cases}$

El aislamiento se puede aumentar, además de por los poros, por materiales aislantes en las zonas exteriores, como la vermiculita.

A temperaturas superiores a $500^{\circ}C$ la conductividad térmica de los aislantes se ve afectada por la radiación, que puede llegar a ser el mecanismo de transmisión de calor predominante:

- *En materiales transparentes, como la sílice fundida, el aumento de la conductividad comienza a $500^{\circ}C$*

- *En materiales translúcidos, como el Al_2O_3 , MgO y porcelanas, el efecto es importante a partir de $1000^{\circ}C$*

A temperaturas elevadas es difícil conocer el efecto de la radiación, aunque las estimaciones son de 2÷3 veces el valor de la conductividad térmica del sólido; el ZrO_2 , presenta menor aumento por radiación.

En los materiales porosos, el tamaño de los poros afecta notablemente a la conductividad térmica; el fluido que, normalmente, llena los poros es el aire; para poros de pequeño tamaño, del orden de 0,005 mm:

- La convección es despreciable

- El camino libre medio de las moléculas es superior al tamaño del poro

- La contribución a la conductividad térmica del gas disminuye al aumentar la temperatura

El efecto de la radiación es mayor cuando el diámetro del poro aumenta de acuerdo con la ecuación

$$k_r = 4 \varepsilon \sigma T^3 d_{poro}$$

siendo d_{poro} el diámetro del poro

Considerando el sólido formado con poros aislados se puede escribir:

$$k_{aisl} = V_{sól} k_{sól} + V_{poros} (k_{gas} + k_r) = V_{sól} k_{sól} + V_{poros} (k_{gas} + 4 \varepsilon \sigma T^3 d_{poro})$$

Para poros de pequeño diámetro: $k_{aisl} = V_{sól} k_{sól}$

Si los poros se agrupan en serie el aislamiento es más efectivo, y una ecuación que representa la conductividad térmica es:

$$k_{aisl} = \frac{k_{gas} + 4 \varepsilon \sigma T^3 d_{poro}}{1 - V_{sól} \left(1 - \frac{k_{gas} + 4 \varepsilon \sigma T^3 d_{poro}}{k_{sól}} \right)}$$

en las que $V_{sól}$ es el % de volumen del sólido.

La ecuación anterior supone capas de poros continuas; los valores más bajos de k_{aisl} se corresponden con poros pequeños y materiales opacos.

Para aislantes de alta temperatura, los materiales porosos presentan fenómenos de sinterización, por lo que hay que elegir materiales poco sinterizables, es decir, puros y con tamaños de poro lo más uniformes posibles.

Para temperaturas superiores a 1100°C, los materiales se sustituyen por sólidos que, normalmente, tienen mayor conductividad térmica que los aislantes porosos, pero son más fáciles de preparar y aplicar. Los ladrillos porosos de carbón constituyen una excepción, alcanzando la conductividad térmica, en el intervalo de temperaturas 1500÷2000°C, valores de 0,86 Kcal/hm°C, lo que indica un efecto despreciable de la radiación en el margen considerado.

Las fibras aislantes de alta temperatura se han desarrollado en los últimos años, siendo las más importantes de carbón, sílicoaluminosas y de óxidos puros, Al_2O_3 , SiO_2 y ZrO_2 ; se emplean en forma de fibras y tejidos con temperaturas máximas de funcionamiento del orden de 1300°C, aunque en períodos de tiempo no muy largos pueden alcanzar 1500°C; su conductividad térmica varía con la temperatura y la densidad de las fibras, Fig 2 y 3.

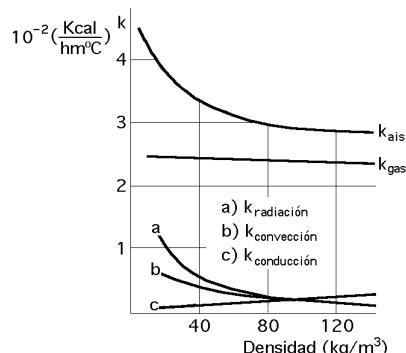


Fig A-2.- Conductividad térmica k_c de materiales fibrosos en función de la densidad y de las contribuciones por conducción, convección y radiación

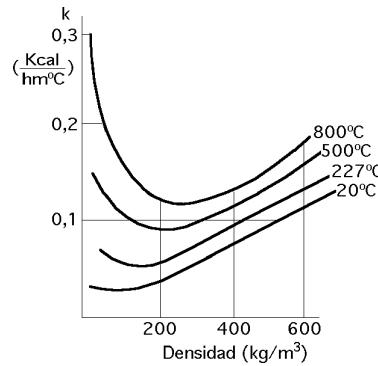


Fig A-2.- Conductividad térmica k_c de materiales fibrosos en función de la densidad y la temperatura

Ejemplo. Se desea estimar el aislamiento para un horno cilíndrico de tratamientos que debe funcionar a 2000°C y cuyas dimensiones interiores son $\begin{cases} \text{diámetro } 0,3 \text{ m} \\ \text{longitud } 1 \text{ m} \end{cases}$.

La temperatura de la pared exterior es de 40°C .

RESOLUCIÓN:

A 2000°C se pueden elegir materiales $\begin{cases} \text{densos} \\ \text{de fibras} \\ \text{reflectores} \end{cases}$

- Los materiales densos, tipo circona, tienen una conductividad térmica elevada frente a los de fibras,

por lo que se eligen: $\begin{cases} \text{Grafito en tela de } 5 \text{ mm de espesor} \\ \text{Circona con } Y_2O_3 \text{ en tela de } 2 \text{ mm de espesor} \\ \text{Láminas finas de wolframio} \end{cases}$

Grafito

$T(^{\circ}\text{C})$	500	1500	2500
k_{aisl} (Kcal/hm°C)	0,08	0,25	0,5

Como k_{aisl} depende de la temperatura, se tiene:

$$k_{aisl} = a + b T^2 (^{\circ}\text{C})^2 = \left| \begin{array}{l} a = 0,0725 \\ b = 7 \cdot 10^{-8} \end{array} \right| = 0,0725 + 7 \cdot 10^{-8} T^2$$

Para una temperatura en la superficie exterior del horno de 40°C :

$$\hat{k}_{aisl} = \frac{1}{2000 - 40} \int_{40}^{2000} (a + b T^2) dT = \dots = a + \frac{b}{2} (2000 + 400) \approx a$$

y despreciando el calor eliminado por las bases del , por considerar están mejor aisladas que la superficie lateral:

$$Q = 2 \pi \hat{k} L \frac{T_{pF} - T_{p0}}{\ln \frac{r_e}{r_i}} = 2 \pi \cdot 0,0725 \cdot 1 \frac{2000 - 40}{\ln \frac{r_e}{0,15}} = \frac{892}{\ln \frac{r_e}{0,15}}$$

obteniéndose:

N° de capas aislantes	1	2	5	10	20	50	100
r_e (m)	0,155	0,16	0,175	0,2	0,25	0,4	0,65
Q (Kcal/h)	27210	13824	5693	3100	1746	910	608

Circona

$T(^{\circ}\text{C})$	500	1000	1700	2000
k_{aisl} (Kcal/hm°C)	0,05	0,14	0,32	0,47

Al igual que en el caso anterior: $k_{aisl} = a + b T^2 = 0,033 + 10,9 \cdot 10^{-8} T^2$ ($^{\circ}\text{C}$) 2

N° de capas aislantes	5	10	20	50	100
r_e (m)	0,16	0,17	0,19	0,25	0,35
Q (Kcal/h)	6200	4900	2500	1200	723

Láminas de wolframio

La emisividad del wolframio viene dada en la siguiente Tabla:

$T(^{\circ}\text{C})$	40	500	1000	2000
Emisividad ε	0,02	0,08	0,15	0,5

Por la ecuación: $Q = q_{1(neta)(N)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{(N+1)(\frac{2}{\varepsilon} - 1)} A$, (Cap XVIII, Ingeniería Térmica), se tiene, para N

$$\text{láminas : } Q = \frac{4,875 \cdot 10^{-8} (2273^4 - 313^4)}{(N+1)(\frac{2}{\varepsilon} - 1)} 2 \pi \times 0,15 \times 1$$

N° de capas aislantes	5	50	500
Q (Kcal/h)	66000	5400	533

En consecuencia el orden de preferencia sería: circona, grafito, reflector.

Tabla A-2.- Materiales aislantes para temperaturas intermedias ($100^{\circ}\text{C} < T < 500^{\circ}\text{C}$)

	Densidad gr/cm ³	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	k Kcal/hm $^{\circ}\text{C}$
Amianto papel	0,3	150	0,06
		200	0,07
Amianto tela	0,3	300	0,07
Arcillas	0,7	200	0,3
		400	0,34
Arcillas caolín		400	0,36
Diatomeas, moldes	0,36	100	0,06
		250	0,09
		400	0,12
Diatomeas, polvo	0,2	100	0,045
		200	0,07
		400	0,08
Diatomeas, polvo	0,4	100	0,05
		200	0,073
		400	0,1
Magnesia (85%) bloques y formas	0,17	100	0,034
		500	0,05
Roca, lana	0,12 a 0,2	100	0,045
		200	0,06
		400	0,09
Silicato cárlico hidratado, formas moldeadas	0,2	100	0,05
		250	0,06
Silice fundida, fibras	0,04	100	0,037
		500	0,16
Silice fundida, fibras	0,14	100	0,027
		500	0,09
Vidrio, lana	0,04	100	0,038
		200	0,045
		400	0,067

AISLANTES PARA TEMPERATURAS INTERMEDIAS.- Cubren un gran número de aplicaciones industriales en sistemas de producción y distribución de vapor, industrias de transformación e industrias químicas. Entre los más utilizados se encuentran:

- *Polvo de caparazones de diatomeas*
- *Ladrillos cerámicos de baja densidad*
- *Silicato cálcico con amianto*
- *Oxido de magnesia en polvo y aglomerado con amianto*
- *Lanas o fibras de roca*
- *Lanas o fibras de vidrio*
- *Vermiculita expandida con y sin cementos*
- *Fibras térmicas*
- *Vidrio celular*
- *Sistemas metálicos reflectores*

Estos materiales se preparan en placas, tubos o telas, rígidos, semirígidos o flexibles según modelos y normas de aplicación de las firmas comerciales. En estos intervalos de temperatura se utilizan mucho las fibras de roca o de vidrio que sustituyen con ventaja a los aislamientos de silicato cálcico con amianto, debido a los efectos nocivos para la salud de este último. La conductividad térmica varía generalmente en forma lineal entre 100÷400°C y sus valores son del orden de 0,06 Kcal/hm°C.

AISLANTES PARA BAJAS TEMPERATURAS.- Las aplicaciones en este intervalo de temperatura son:

- *Usos domésticos y alimentación*
- *Procesos físicoquímicos como la separación y almacenamiento de gases, acondicionamiento de aire, recuperación de disolventes, fermentaciones, etc.*

Los materiales aislantes son numerosos y se extienden desde productos naturales tratados convenientemente como, corcho, madera, fibras, vegetales, hasta productos orgánicos como gomas o plásticos en placas o fibras.

Los materiales de fibras minerales mencionados anteriormente también tienen aplicación a bajas temperaturas.

Dada la gran variedad de materiales resulta mas conveniente agruparlos por su estructura:

- *Materiales sólidos utilizados en construcción, ladrillos, cementos, yesos, morteros, estructuras compuestas, etc*
- *Fibras o lanas de vidrio, rocas, maderas, papel, cerámicas*
- *Estructuras celulares porosas y no porosas como materiales orgánicos e inorgánicos, vidrio celular, espumas de cloruro de vinilo, poliuretano, poliestireno, polivinilacetato*
- *Polvos inorgánicos, diatomeas, vermiculita, óxidos cerámicos*
- *Láminas finas generalmente Al, recubiertas con materiales aislantes*

Un aspecto importante en los aislamientos para bajas temperaturas es la presencia de humedad; los materiales aislantes suelen ser higroscópicos, del orden del 10% a una atmósfera y humedad relativa del 50÷60%. Si la presión de vapor de agua en el exterior del aislamiento es superior a la correspondiente al interior, se produce una difusión y el vapor pasa a la estructura del aislante.

La conductividad térmica del agua es del orden de 25 veces superior a la del aire, por lo que un aislante cuando está seco presenta una baja conductividad térmica, pero cuando está instalado puede quedar afectado por la humedad ambiental y comportarse peor que un aislante de conductividad más elevada,

pero menos sensible a la humedad. La distribución de humedad dentro del aislante no es lineal y la concentración de agua es mayor en las partes más frías.

Si la temperatura es baja, se produce hielo con un aumento notable de la conductividad térmica.

La condensación de agua desprende el calor latente que se transmite a través del vapor de agua si la estructura no es muy cerrada, además de favorecer los fenómenos de convección. Una forma empírica para calcular la conductividad térmica en función de la humedad, y utilizar los factores de convección sobre la conductividad térmica de los materiales en estado seco, es la siguiente:

Un método efectivo de evitar la pérdida de capacidad de un aislante por humedad, es disponer barreras al vapor de agua, utilizando varios materiales en los que la última capa presente un cierre cuasi estanco.

<i>Humedad %</i>	<i>1</i>	<i>2,5</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>	<i>25</i>
<i>Factor de multiplicación de k (en estado seco)</i>	<i>1,3</i>	<i>1,55</i>	<i>1,75</i>	<i>2,1</i>	<i>2,35</i>	<i>2,55</i>	<i>2,75</i>

Tabla A-3.- Materiales aislantes para bajas temperaturas (-100°C < T < 100°C)

	<i>Densidad ρ gr/cm³</i>	<i>Conductividad térmica k_c °C</i>	<i>Kcal/hm°C</i>
<i>Algodón cinta</i>		<i>30</i>	<i>0,06</i>
<i>Algodón capas</i>		<i>100</i>	<i>0,045</i>
<i>Amianto, papel</i>		<i>25</i>	<i>0,14</i>
<i>Amianto láminas</i>		<i>25</i>	<i>0,05</i>
<i>Amianto+acetato, láminas</i>		<i>25</i>	<i>15</i>
<i>Amianto (polvo)</i>	<i>0,46</i> <i>0,7</i>	<i>0</i> <i>0</i>	<i>0,1</i> <i>2</i>
<i>Coque (polvo)</i>	<i>0,5</i>	<i>100</i>	
<i>Corcho bruto</i>	<i>0,09</i>	<i>20</i>	<i>0,03</i>
<i>Corcho grano fino</i>	<i>0,1</i>		<i>0,037</i>
<i>Corcho cartón</i>	<i>0,12</i>	<i>-100</i> <i>20</i>	<i>0,02</i> <i>0,03</i>
<i>Diatomeas, polvo</i>	<i>0,15-0,2</i>	<i>-100</i> <i>20</i> <i>100</i>	<i>0,035</i> <i>0,045</i> <i>0,048</i>
<i>Magnesia hidratada</i>	<i>0,1-0,15</i>	<i>-80</i>	<i>0,02</i> <i>0,034</i>
<i>Rosa, lana</i>	<i>0,4</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,034</i> <i>0,047</i>
<i>Rosa, lana</i>	<i>0,26</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,025</i> <i>0,034</i>
<i>Rosa, lana</i>	<i>0,095</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,017</i> <i>0,029</i>
<i>Vidrio, lana</i>	<i>0,058</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,025</i> <i>0,036</i>
<i>Vidrio, espuma</i>	<i>0,2</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,034</i> <i>0,043</i>
<i>Vidrio, perlita</i>	<i>0,2</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,03</i> <i>0,05</i>
<i>Vidrio, aerogel</i>	<i>0,1</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,012</i> <i>0,017</i>
<i>Poliestireno (espuma)</i>	<i>0,04</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,029</i> <i>0,03</i>
<i>Polivinilo (espuma)</i>		<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,032</i> <i>0,043</i>
<i>Vermiculita</i>	<i>0,216</i>	<i>-100</i> <i>0</i>	<i>0,038</i> <i>0,055</i>

Se deben cuidar especialmente las zonas débiles tales como:

- *Sujecciones*
- *Uniones en ángulo*
- *Válvulas*
- *Salidas de elementos de instrumentación*

colocando cementos o materiales plásticos a los que no afecten las dilataciones, contracciones y vibraciones de la instalación, cuidados que deben ser tanto mayores cuanto menores sean las temperaturas de funcionamiento.

Los problemas de humedad han dado origen al desarrollo de materiales de estructura celular o expandidos, conocidos como espumas, de tipo:

- *Inorgánico, (vidrios y cementos)*
- *Orgánico, (poliestireno, cloruro de polivinilo, uretanos)*

Los poros contienen aire o gases de baja conductividad y, por sus dimensiones, la convección es prácticamente despreciable; la fase gaseosa ocupa un elevado volumen del material, la conducción es el mecanismo que predomina, y estos materiales son sensibles al envejecimiento; una disminución de su resistencia al vapor de agua afecta notablemente a sus propiedades aislantes.

El aislamiento con capas múltiples se logra con fibras o polvos de baja conductividad térmica, entre láminas de Al de baja emisividad; estos materiales son también sensibles a la humedad por lo que es frecuente la necesidad de hacer un vacío, tanto mayor cuanto menor es la temperatura. Con estructuras de 60 capas/cm se pueden obtener conductividades térmicas del orden de $1,54 \cdot 10^{-5}$ (Kcal/hm°C).

Los materiales en polvo se utilizan también para temperaturas bajas en vacío, la conducción se hace a través del material del aislamiento rodeado de una capa de gas, lográndose un sistema equivalente al aislamiento de capas múltiples; presenta la ventaja de utilizar vacíos moderados, de 0,01 mm de Hg, si bien hay que asegurar la ausencia de humedad. Con tierra de diatomeas, o perlita se pueden obtener conductividades térmicas equivalentes, tal como se indica en la Tabla A-3.

AISLAMIENTOS EN EDIFICIOS.- Las personas desarrollan sus actividades físicas e intelectuales con esfuerzo mínimo cuando disponen de un clima agradable, por lo que los edificios deben estar protegidos para las temperaturas extremas en invierno y en verano, con unas condiciones de humedad adecuadas en el aire y ausencia de gases nocivos; como el consumo racional de energía, en cualquier sistema, impone la necesidad de buenos aislamientos, el acondicionamiento climático de las casas se debe estudiar en el doble aspecto humano y energético.

El aislamiento térmico de un edificio depende de las estructuras utilizadas en su construcción, proporciones volumétricas, orientación, huecos de ventanas, puertas, etc.

Normalmente se introducen aislamientos suplementarios en conjuntos normalizados, de lana de vidrio o roca, materiales de estructura celular o mezclas con cementos; dada la variedad de estructuras de materiales compuestos que se utilizan en la construcción, se insiste en el análisis térmico de estas estructuras porque los efectos de la humedad alteran considerablemente las hipótesis de cálculo.

La energía (calor o frío) necesaria para acondicionar un edificio se puede estimar en primera aproximación, compuesta de tres factores:

- *Ventilación*
- *Pérdidas por paredes*
- *Orientación*

El calor de ventilación se expresa por la ecuación:

$$q_{vent} = c_p V_{aire} (T_{int} - T_{ext})$$

en la que: $\begin{cases} V_{aire} \text{ es el volumen de aire a renovar} \\ T_{int} \text{ y } T_{ext} \text{ son las temperaturas interior y exterior respectivamente} \\ c_p \text{ es el calor específico a presión constante} \end{cases}$

Las pérdidas por las paredes:

$$q_{pérd} = UA (T_{int} - T_{ext})$$

siendo: U el coeficiente global de transmisión de calor para la estructura considerada, con aire a T_{int} en el interior del edificio y a T_{ext} en el exterior.

Las pérdidas por orientación q_{orient} se expresan en % de las pérdidas por las paredes.

El calor total necesario es:

$$q = q_{vent} + q_{pérd} + q_{orient}$$

En las Tablas siguientes se indican los valores necesarios para calcular los términos de la ecuación anterior para elementos estructurales simples.

Tabla A-4.- Coeficientes totales de transmisión de calor expresados en Kcal/hm²°C

PAREDES EXTERIORES	Espesor cm	Coeficiente total Kcal/hm ² °C
<i>Piedra dura con revestimiento interior</i>	30	2,4
	45	2,06
	60	1,72
<i>Piedra semidura con revestimiento interior</i>	30	2,15
	45	1,97
	60	1,63
<i>Ladrillo macizo con revestimiento interior</i>	30	1,29
	45	1,03
	60	0,94
<i>Ladrillo hueco revestido por las dos caras</i>	15	1,54
	20	1,37
	30	0,94
<i>Hormigón composición normal</i>	12	1,97
	20	1,37
	30	1,11
<i>Ladrillos huecos de hormigón</i>	40	1,03

PAREDES EXTERIORES COMPUESTAS Composición de la pared	Espesor total cm	Coeficiente total Kcal/hm ² °C
<i>Ladrilo macizo + cámara de aire de 5 cm + + pared interior de ladrillo hueco de 5 cm + + revestimiento de 2 cm</i>	20	1,37
	35	1,03
	45	0,86
<i>Idem, con aislante de 7 cm</i>	20	0,86
	35	0,77
	45	0,68
<i>Ladrillo hueco revestido + cámara de aire de 9 cm + + ladrillo hueco de 5 cm + revestimiento 2 cm</i>	25	1,1
	30	0,94
	40	0,77
<i>Idem, con aislante de 7 cm</i>	30	0,77
	35	0,68
	40	0,68

SUELOS Y TECHOS	Espesor total cm	Coeficiente total Kcal / hm ² °C
Suelo madera		Suelo: 1,63
Techo, vigas madera	20 a 25	Techo: 1,8
Suelo madera sobre ladrillo		Suelo: 0,86
Techo listones madera, con yeso, vigas madera, ladrillo	20 a 25	Techo: 0,94
Suelo madera sobre hormigón		Suelo: 0,86
Techo, yeso, vigas hierro, hormigón	20 a 25	Techo: 0,94
Suelo madera sobre bovedilla ladrillo		Suelo: 0,86
Techo, yeso, vigas hierro, bovedilla ladrillo	20 a 25	Techo: 0,94
Suelo vidrio	3	Suelo: 3,18
Techo, vigas hierro, vidrio		Techo: 3,87
Suelo madera sobre vigas de hormigón armado		Suelo: 0,04
Techo, yeso, zona intermedia hormigón	25	Techo: 1,11
Suelo madera sobre cemento		Suelo: 1,97
Techo, yeso, zona intermedia hormigón	25	Techo: 2,06
Suelo madera sobre vigas de hormigón armado		Suelo: 0,86
Techo, yeso zona intermedia, cuña cerámica	25	Techo: 1,03

		Kcal / hm ² °C
VENTANAS	Ventana exterior de madera (30% madera, cristal simple)	4,98
	Ventana exterior metálica	6,02
	Ventana exterior de madera y cristal doble	3,18
	Ventana exterior metálica y cristal doble	3,69
	Ventana doble de madera	3,18
	Ventana doble metálica	3,18
	Ventanas interiores de madera	3,09
PUERTAS	Ventanas interiores metálicas	3,61
	Puerta madera	3,18
	Puerta metálica	6,27
	Puertas interiores de madera	2,49
	Puertas interiores de madera de doble pared	1,97

		Espesor total cm	Kcal / hm ² °C
PAREDES INTERIORES	Ladrillo macizo	15	1,89
		25	1,37
		35	1,03
	Ladrillo hueco	10	1,72
		15	1,37
		35	1,03
TABIQUES	Hormigón	25	1,8
		40	1,48
	Ladrillo macizo	10	2,06
	Ladrillo hueco	10	1,72

		Espesor total cm	Kcal / hm ² °C
AZOTEAS	Suelo de losetas cerámicas Vigas de hormigón armado Techo de yeso Zona entre suelo y techo cuñas cerámicas	30	Suelo y techo 1,4
CUBIERTAS	Suelo de losetas cerámicas Vigas de hormigón armado Techo de yeso Suelo de cemento Vigas de madera	20	Suelo y techo 2,4
CUBIERTAS	Pizarra con recubrimiento Placas de uralita sobre madera	5	4,5
		10	4
		15	3,6
			5,8
			4,4

ORIENTACIÓN: En paredes orientadas al N, NE y NO aumentar un 10%

CLIMA: En zonas húmedas, en paredes exteriores aumentar un 10%

VIENTOS.- Para velocidades de $\begin{cases} 4 \text{ m/seg, aumentar un } 5\% \\ 8 \text{ m/seg, aumentar un } 10\% \\ 20 \text{ m/seg, aumentar un } 15\% \end{cases}$

PAREDES EXTERIORES.- $\begin{cases} \text{En 2 paredes contiguas en ángulo recto aumentar un } 20\% \\ \text{En 2 paredes opuestas entre sí aumentar un } 30\% \\ \text{En 3 paredes unidas entre sí aumentar un } 40\% \\ \text{En 4 paredes unidas entre sí aumentar un } 50\% \end{cases}$

ALTURAS.- $\begin{cases} \text{Hasta } 4 \text{ m aumentar } 2\% \\ \text{Para alturas superiores a } 4 \text{ m aumentar un } 4\%, \text{ hasta un máximo del } 20\% \end{cases}$

VENTILACIÓN.- Salas comunes renovación de $\begin{cases} 25 \text{ m}^3/\text{h para locales de } 0 \div 100 \text{ m}^3 \\ 20 \text{ m}^3/\text{h para locales de } 100 \div 500 \text{ m}^3 \\ 15 \text{ m}^3/\text{h para locales de } 500 \div 1000 \text{ m}^3 \end{cases}$

Ejemplo.- Estimar las pérdidas de calor en una nave de las siguientes características:

- $7 \times 12 \text{ m}^2$ de superficie; orientación NE y NO para la dimensión de 12 m; la longitud de 7 m es una pared medianera a otras naves a 15°C
- 3 plantas de 3,8 m de altura con 36 ventanas metálicas de doble vidrio de $2 \times 1 \text{ m}^2$, 18 en cada fachada.
- Azotea compuesta de suelo de losetas cerámicas, vigas de hormigón armado con cuñas cerámicas y encubrido de yeso interior.
- Suelo de la nave de cemento de 20 cm de espesor.
- Puerta de entrada metálica de $4 \times 3,5 \text{ m}^2$
- Renovación de aire $25 \text{ m}^3/\text{h}$ cada 100 m^3 .
- Temperatura interior 22°C , y temperatura mínima exterior 0°C ; funcionamiento continuo.
- Paredes fachada y medianeras de ladrillo hueco, cámara de aire y aislamiento de 7 cm con espesor total de 40 cm

RESOLUCIÓN:

- Volumen interior aproximado: $7 \times 12 \times 3 \times 3,8 = 957,6 \text{ m}^3$
- Calor ventilación: $q_{ventilación} = 0,29 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}} \times 25 \times 9,596 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 1530,56 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
- Pérdidas en ventanas: $q_{ventanas} = 36 \times 2 \text{ m}^2 \times 3,69 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 5845 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
- Pérdidas en puertas: $q_{puertas} = 4 \times 3,5 \text{ m}^2 \times 6,27 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 1931,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
- Pérdidas en suelo nave: $q_{suelo} = 96 \text{ m}^2 \times 3,6 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 7603,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
- Pérdidas en la azotea: $q_{azotea} = 96 \text{ m}^2 \times 1,3 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 27456 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$

- Pérdida paredes fachada: $q_{fachada} = 187,6 \text{ m}^2 \times 0,68 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 0)^\circ\text{C} = 2806,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$

en la que la superficie de la fachada es: $12 \times 3,8 \times 3 \times 2 - (36 \times 2) - (4 \times 3,5) = 187,6 \text{ m}^2$

- Pérdidas paredes medianeras:

$$q_{p. \text{ medianera}} = 2 \times 7 \times 3,8 \text{ m}^2 \times 0,68 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times (22 - 15)^\circ\text{C} = 253,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

- Pérdidas por orientación: $2806,5 \times 0,1 = 280,6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$

- Pérdidas por disposición: $2806,5 \times 0,3 = 841,95 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$

- Calor total = $1530,56 + 5845 + 1931,2 + 7603,2 + 2745,6 + 2806,5 + 187,6 + 253,2 + 280,6 + 841,95 = 24025 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$



AISLAMIENTO PARA TEMPERATURAS CRIOGÉNICAS. Los materiales para aislamientos a temperaturas muy bajas son, en general, los mismos que para temperaturas bajas, con la salvedad de una mayor calidad, distribución de estructuras, vacíos superiores y perfección de las instalaciones.

{ Reflectores con vacío

Los tipos de aislamientos más frecuentes son:

{ Capas múltiples
Polvos

Los reflectores son metales muy pulidos, con emisividades muy bajas del orden de 0,01.

Estos metales se obtienen por:

- Deposición en los más caros como oro o plata

- Pulido con eliminación de vestigios de impurezas de grasa o aceites en materiales estructurales de cobre o aluminio

La transmisión de calor por conducción en el gas del medio, se reduce mediante un vacío superior a 0,001 mm de Hg.

Las pérdidas por conducción se calculan por la ecuación de Kundsen para gases en vacío, de la forma:

$$\frac{q}{A} = k_{acom.} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8 \pi M T}} p (T_1 - T_2)$$

en la que el coeficiente de acomodación es:

$$k_{acom.} = \frac{1}{\frac{1}{k_{acom(1)}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{k_{acom(2)}} - 1 \right)}$$

siendo $k_{acom(1)}$ y $k_{acom(2)}$ los coeficientes de acomodación a las temperaturas T_1 y T_2 , y que definen los intercambios de energía entre las moléculas del gas y la superficie.

En superficies limpias metálicas a 300°K, { $k_{acom.} = 0,3$ para el H_2 y el He
 $k_{acom.} = 0,7$ para el Ne
 $k_{acom.} = 0,8 \div 0,9$ para el N_2 y el O_2 ; en el punto de licuación del gas, tienden a la unidad.

$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ es la temperatura media, γ el coeficiente adiabático, p la presión del gas, M su peso molecular y A la superficie de intercambio térmico.

En los aislamientos de capas múltiples, se disponen capas alternadas de láminas de Al con láminas de fibra de vidrio de 0,01 mm de espesor, formando conjuntos de $15 \div 40 \frac{\text{capas}}{\text{cm}}$ y una densidad global de $50 \div 300 \text{ kg/m}^3$.

- La resistencia térmica a la radiación la dan las láminas de Al

- La resistencia a la conducción la proporciona el material de fibra de vidrio

Para aumentar la resistencia a la conducción, se hace el vacío en el sistema, obteniéndose valores de la conductividad térmica equivalente:

- Desde $2,6 \cdot 10^{-3}$ Kcal/hm°C, a 0,0001 mm de Hg
- Hasta $2 \cdot 10^{-5}$ Kcal/hm°C a 0,00001 mm de Hg

para un intervalo de temperaturas de la pared fría comprendido entre 20ºK y 75ºK.

Las conductividades térmicas de los materiales pulverulentos de bajas temperaturas oscilan entre $2,4 \cdot 10^{-3}$ (Kcal/hm°C), con densidades de 100 kg/m³, y son de naturaleza:

- Orgánica, como esférica fenólicas

Tabla A-5.- Materiales aislantes para temperaturas criogénicas (-270°C < T < -100°C)

Cuerpos reflectores				
Material	T(°K)	ε (%)	T(°K)	ε (%)
Aluminio	5	1,1	100	1,8
Bronce	5	1,8	100	2,9
Cobre	5	0,5	100	0,8
Oro			100	1
Plata	5	0,4	100	0,4

Material en capas múltiples	Densidad kg/m³	Temper. °K	$k \cdot 10^4$ Kcal/hm°C
Emparedado de 70 capas espesor total 33 cm de { papel de fibra de vidrio de 0,8 mm láminas de Al de 0,006 mm }	120	20 70	0,34 0,47
Emparedado de 75 capas espesor total 35 cm de { papel de fibra de vidrio de 0,12 mm láminas de Al de 0,127 mm }	110	20 70	0,37 0,44
Emparedado de 96 capas espesor total 5 cm de { papel de fibra de vidrio de 0,8 mm láminas de Al de 0,006 mm }	120	70	0,94
Emparedado de 24 capas cm } con { tejido de Nylon (0,15 mm) y vacío de 0,001 mm de Hg } { láminas de Al (6,3+13).10⁻³ mm }	90	70	0,2

Polvos	φ mm	Densidad kg/m³	Temperatura °K	Vacío mm de Hg	$k_c \cdot 10^3$ Kcal/hm°C
Aerogel	0,25	120	20	0,001 0,1	1,29 1,97
Sílice	0,005	180	90	0,001 0,1	0,7 1,46
Perlita expandida	0,25	250	90	0,001 0,1	0,58 2,7
Vermiculita	0,2	280	90	0,001	3,26
Lana de vidrio	0,018	160	90	0,001 0,1	4 1,4

- Inorgánica, como perlita, obtenida por calcinación de rocas volcánicas con agua de cristalización
- Aerogel de sílice, obtenido por vaporización de gel de sílice con expansión y condensación posterior

Su resistencia a la radiación se puede aumentar por recubrimiento con polvo de Al, obteniéndose conductividades equivalentes del orden de $4 \cdot 10^{-4}$ Kcal/hm°C. El vacío aumenta la resistencia a la conducción, y con valores 100 veces inferiores al vacío de capas múltiples, del orden de 0,001 mm de Hg, se obtienen conductividades térmicas equivalentes con gel de sílice de $4,5 \cdot 10^{-4}$ Kcal/hm°C.

Los polvos presentan la desventaja de la abrasión, propiedades higroscópicas y combustión con aire si son orgánicos, consideraciones a tener en cuenta en la elección y diseño de estos aislamientos.

- Los aislamientos tipo multicapa se utilizan frecuentemente para líquidos de bajas temperaturas de ebullición He (4,21°K), H₂ (20,39°K), Ne (27,07°K)

- Los polvos se usan para líquidos de temperaturas de ebullición superiores, Aire (78,8° a 81,8°K), Ar (87,27°K), N₂ (77,35°K), O₂ (90,19°K), CO (81,63°K), CH₄ (71,73°K)