

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
"FRANCISCO DE MIRANDA"
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA
FENÓMENOS DE TRANSPORTE

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Realizado Por: Prof. Pedro Vargas

Disponible en: www.fenomenosdetransporte.wordpress.com

Nomenclatura

A:	Área de transferencia de calor	[m ²]
C _p :	Capacidad calorífica a presión constante	[J/kg K]
D:	Diámetro de cilindro o esfera	[m]
g:	Calor generado por unidad de volumen	[W/m ³].
h:	Coefficiente convectivo de transferencia	[W/m ² K]
K:	Conductividad térmica	[W/mK]
L:	Longitud de cilindro o espesor de placa	[m]
L _c :	Longitud característica	[--]
Nu:	Número de Nusselt	[--]
Pr:	Número de Prandtl	[--]
Q:	Flujo de calor	[W]
q:	Flujo de calor por unidad de área	[m ²]
R:	Radio de cilindro o esfera	[m]
r:	Coordenada radial	[--]
Re:	Número de Reynolds	[--]
T:	Temperatura absoluta	[K]
T _f :	Temperatura de la película	[K]
T _s :	Temperatura de superficie	[K]
T _∞ :	Temperatura de bulto	[K]
x,y,z:	Coordenadas espaciales sistema rectangular	[--]

Alfabeto griego

ρ:	Densidad	[kg/m ³]
α:	Difusividad térmica	[m ² /s]
Δh _{fg} :	Calor latente de vaporización	[J/kg]

I. Introducción a la transferencia de calor

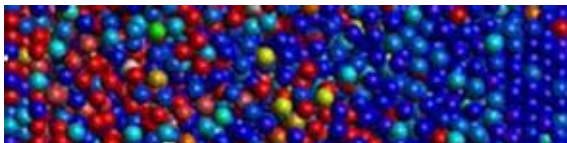
Antes de introducir las Leyes que regulan los procesos de transferencia de calor debemos definir algunos conceptos fundamentales que nos ayudaran a construir definiciones más complejas.

Temperatura

El concepto de temperatura nos es muy familiar en nuestro quehacer diario. Siempre escuchamos frases como *¡tengo frío!* o *¡tengo calor!* Sin embargo, definir exactamente el concepto de temperatura no es una tarea fácil. Algunas referencias que muy probablemente manejemos es que el agua se congela a 0 °C y que ebulle o hierve a los 100 °C. Pero **¿cómo podremos definir exactamente a la temperatura?** Como sabemos la materia puede encontrarse en diferentes fases (líquido sólido o gas, Fig. 1.3), la diferencia entre un estado y otro depende del arreglo molecular que varía desde menor orden en el estado gaseoso hasta un mayor orden en el estado sólido.

En este sentido, la temperatura es una propiedad que depende del nivel de **interacción molecular**. Específicamente la temperatura es un reflejo del nivel de agitación molecular que presenta una sustancia en un estado determinado. Cuanto mayor sea la temperatura de una sustancia, mayor será el nivel de agitación molecular. En la figura 1.1, se muestra un sólido con diferentes valores de temperatura, las moléculas en rojo están asociada a una gran interacción y movimiento molecular, mientras que las moléculas en azul presentan en promedio menor movimiento un menor movimiento y por consiguiente un menor valor de temperatura.

T alta T baja



Arreglo molecular

Figura 1.1. Actividad molecular de solido a diferente temperatura.

Escalas de medición de temperatura

Como toda propiedad, la temperatura posee unidades correspondientes al sistema internacional y al sistema inglés, para los cuales existen dos escalas de temperatura, una conocida como escala absoluta, y otra conocida como escala relativa. La diferencia de una a otra es que las escalas absolutas todos los valores de temperaturas tienen valores positivos, y el mínimo valor posible es el “cero”, o “**cero absoluto**”, mientras que los sistemas de temperaturas relativos pueden poseer valores negativos (tabla 1.1), razón por la cual escuchamos con frecuencia que en los países donde hace **mucho frío** al caer nieve las temperaturas son entre -10 °C y -15 °C por ejemplo.

Tabla 1.1. Escalas de temperatura.

Sistema Internacional	Sistema Inglés
Grados Centígrados (°C) (Escala relativa)	Grados Fahrenheit (°F) (Escala relativa)
Grados Kelvin (K) (Escala absoluta)	Grados Rankine (°R) (Escala absoluta)

Las relaciones matemáticas entre las diferentes escalas son mostradas a continuación, y representadas de manera grafica en la figura 1.2.

$$T[°F] = 1.8T[°C] + 32$$

$$T[K] = T[°C] + 273.15$$

$$T[°R] = T[°F] + 459.7$$

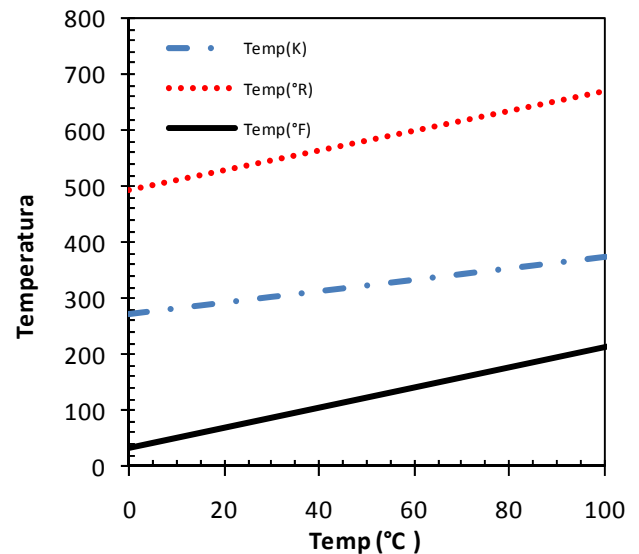


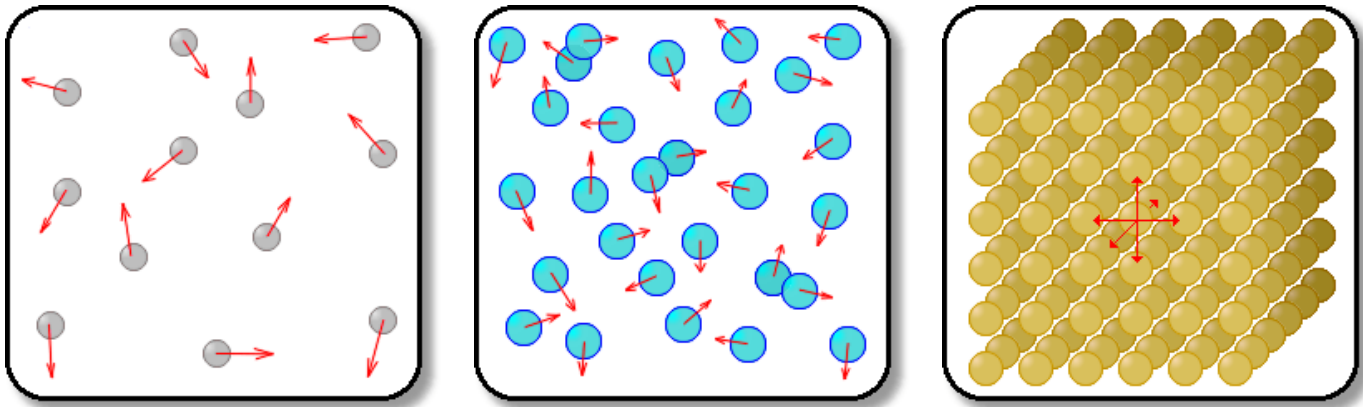
Figura 1.2. Relación grafica entre las escalas de temperaturas.

Un tratamiento especial se le da a las diferencias de temperaturas, las cuales aparecerán con frecuencia en las Leyes asociadas a la transferencia de calor, la relación entre estas diferencias son presentadas a continuación:

$$\Delta T[K] = \Delta T[°C] = 1.8\Delta T[°R] = 1.8\Delta T[°F]$$

Instrumentos de medición

Por ser la temperatura una propiedad de gran interés existen un gran número de dispositivos basados en diferentes principios que sirven para medir o estimarla de algún modo. Los más usados y familiares para nosotros son los **termómetros de mercurio** con los que normalmente se mide la temperatura corporal, pero también existen otros dispositivos que tienen un mayor uso a nivel industrial como los **termopares**, **termistores** y **radiómetros**, todos basados en principios de funcionamiento distintos. En la figura 1.3 se muestran algunos de estos dispositivos de medición de temperatura.



Gas Líquido Sólido

Figura 1.3. Arreglo molecular en diferentes fases de la materia

Calor y mecanismos básicos de transferencia

Como ya mencionamos la temperatura es un reflejo del nivel de agitación molecular, imaginemos que colocamos dos zonas de un sólido a diferente temperatura (diferente nivel de agitación molecular) ¿qué sucederá?

Veamos la figura 1.4. Las moléculas de la zona de mayor temperatura y mayor movimiento molecular (en rojo), empezarán a chocar con las de menor movimiento transfiriéndole parte de este hasta que al pasar cierto tiempo se estabilicen cerca de un valor. A esta transferencia de movimiento molecular por choque directo entre moléculas, se le denomina **TRANSFERENCIA DE CALOR** y al mecanismo en particular, se le denomina **CONDUCCIÓN**, y como hemos visto, tiene lugar de una zona de alta temperatura, hasta una zona de baja temperatura.

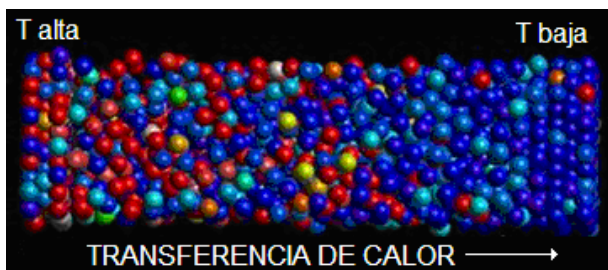


Figura 1.4. Transferencia de calor por conducción

De forma general podemos definir **LA TRANSFERENCIA DE CALOR (CALOR)** como la energía en tránsito o movimiento debida a una diferencia de temperatura.

¿Que otros mecanismos de transferencia de calor existen?

El requisito básico para que tenga lugar la transferencia de calor, es que exista una diferencia de temperatura, sin embargo la forma como ocurre o el mecanismo a través del cual tiene lugar la transferencia puede variar. A continuación presentamos los mecanismos básicos de transferencia de calor:

Conducción: es un proceso mediante el cual el calor fluye desde una región de alta temperatura hasta una región de baja temperatura, dentro de un medio sólido, líquido o gaseoso, o entre medios diferentes en **contacto físico directo entre las moléculas.**

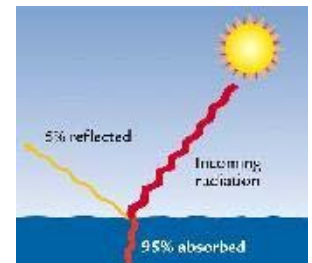


Las moléculas de mayor agitación molecular transfieren ese movimiento a las de menor agitación, produciendo una elevación en la temperatura es estas últimas.

Convección: es un mecanismo de transporte de energía por **acción combinada** de **conducción** de calor, almacenamiento de energía y **movimiento de materia** en grandes grupos de moléculas. Cuando un fluido se mueve sobre una superficie que se encuentra a otra temperatura, se produce transferencia de calor en las adyacencias de la frontera cuyo signo dependerá del valor relativo de las temperaturas.



Radiación: es un proceso mediante el cual el calor fluye desde un cuerpo de alta temperatura a otro de baja temperatura cuando entre estos no existe contacto físico directo. El mecanismo molecular de transferencia es a través de **ondas electromagnéticas.**



Para entender un poco más los mecanismos de transferencia de calor y como pueden funcionar de manera conjunta imaginemos una fogata (Fig. 1.5). El aire caliente que asciende en la superficie superior de la llama por moverse en

grupos de moléculas corresponde a lo que sería el transporte de calor por **convección**. Si **tocamos** la llama con una barra metálica la cual se calienta, estaremos recibiendo calor por **conducción**, y si sentimos como si nos **encandilara** la llama aunque el aire a nuestro alrededor no esté caliente, en ese caso estaremos recibiendo calor por **radiación**.

es **CALOR SENSIBLE** en el sentido que fue invertido en variar la temperatura de la sustancia. En caso de que el calor produzca un cambio de fase en la sustancia, el calor se denomina **CALOR LATENTE** y dependiendo del tipo de cambio de fase puede ser calor latente de vaporización si el cambio de fase es de líquido a vapor por ejemplo.

Cuando el calor transferido a una sustancia por cualquier mecanismo hace que esta eleve su temperatura, se dice que



Termómetro de mercurio



Termopar



Radiómetro

Figura 1.5. Dispositivos para la medición de temperatura.

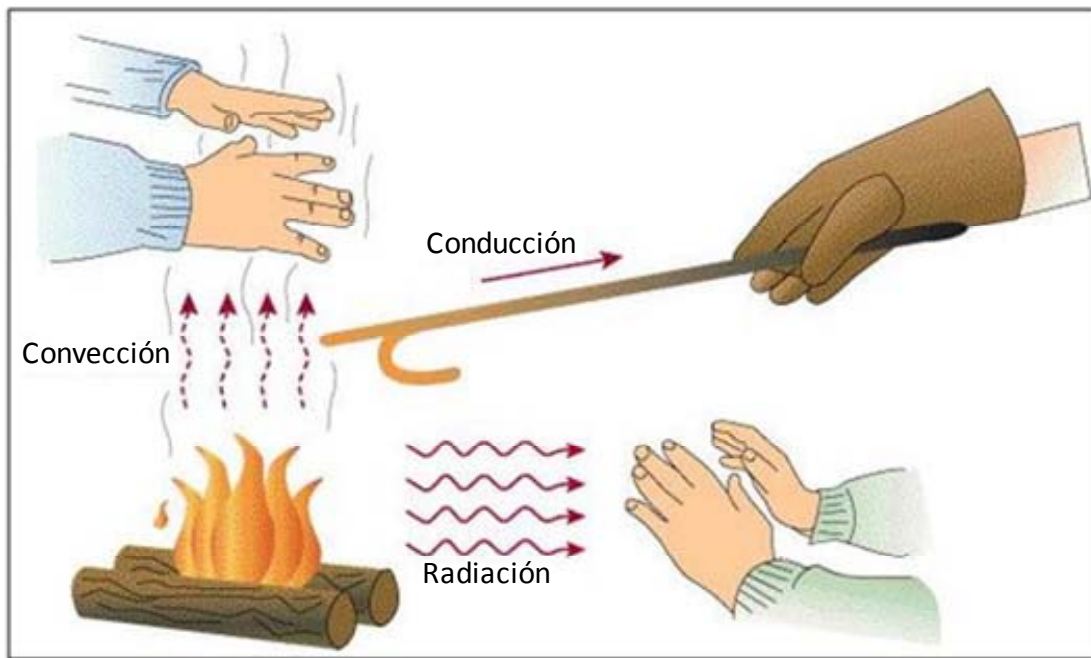


Figura 1.4. Mecanismos básicos de transferencia de calor.

EJERCICIOS I

1. Defina los mecanismos básicos de transferencia de calor.
2. Convierta 25 °C a K °F y °R.
3. La diferencia de temperatura entre el interior de un refrigerador y el ambiente de aproximadamente 40 °C. ¿Cuánto será esta diferencia en K °F y °R?
4. ¿Es el mecanismo de conducción exclusivo de los sólidos?

II. Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción ocurre básicamente debido a una diferencia de temperatura. Es una forma de energía en tránsito que se transmite por comunicación molecular directa, sin desplazamiento observable de las moléculas. El calor como en todo proceso de transferencia fluirá en la dirección de temperatura decreciente (desde mayor hasta la menor temperatura).

La transferencia ocurre porque las moléculas que poseen mayor energía transferirán ésta a las de energía inferior. En todo proceso de transferencia de calor por conducción podemos encontrar tres características fundamentales, que lo diferencian de los procesos de convección y radiación que estudiaremos más adelante. Estas son:

- Una diferencia apreciable de temperatura entre las dos zonas en las cuales fluirá el calor.
- Contacto físico directo entre las zonas de transferencia.
- No existe movimiento apreciable de la materia en la que fluirá el calor.

¿Cómo medimos el calor que fluye por conducción?

Hasta ahora solo hemos dicho que el flujo de calor ocurre en la dirección de temperatura decreciente, pero ¿Cómo lo estimamos y de que variables depende? Para ello, imaginemos una barra metálica de longitud L que se encuentra entre dos temperaturas T_1 y T_2 en sus extremos (Fig. 2.1) con $T_1 > T_2$ por lo que según lo que ya mencionamos el calor fluye desde 1 hacia 2. La barra está aislada por los lados de forma tal que todo el calor que entra en 1 sale en 2.

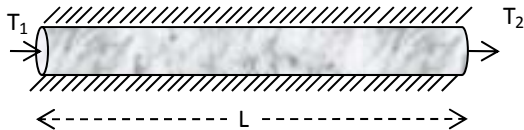


Figura 2.1. Barra con transferencia de calor

Imaginemos que repentinamente incrementamos la diferencia de temperatura entre 1 y 2 ¿Cómo se verá afectado el flujo de calor a lo largo de la barra? (flujo de energía en WATTS). Nuestra intuición pareciera indicarnos que el flujo de calor aumentaría en ese caso a medida que se incrementa la diferencia de temperatura, esto matemáticamente lo podemos escribir como:

$$Q \propto \Delta T \quad (2.1)$$

Donde

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad [K]$$

Es decir que el flujo de calor a lo largo de la barra es proporcional a la diferencia de temperatura. Hagamos otro experimento. Imaginemos dos barras del mismo grosor que se mantienen entre los mismos valores de T_1 y T_2 pero una es

más larga que la otra (Fig. 2.2) ¿Cómo ser el calor que fluye entre 1 y 2?

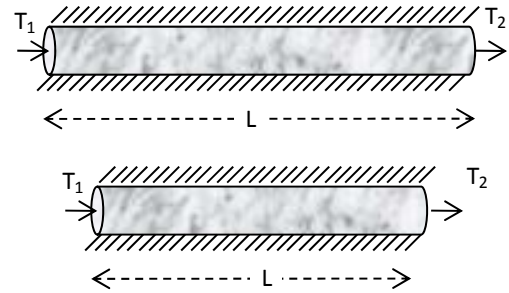


Figura 2.2. Flujo de calor en barras de diferente longitud.

En realidad no es igual, de hecho si la barra es más larga y la diferencia de temperatura se mantiene el calor entre 1 y 2 disminuye, matemáticamente lo escribimos como:

$$Q \propto \frac{1}{L} \quad (2.2)$$

Es decir que el calor que fluye es inversamente proporcional a la distancia a través de la cual se produce el flujo de calor. Ahora imaginemos que tenemos dos barras de la misma longitud y material sometidas a la misma diferencia de temperatura pero de un área transversal de flujo de distinta (Fig. 2.3) ¿Cómo será el calor total que fluye entre 1 y 2 en ambos casos?

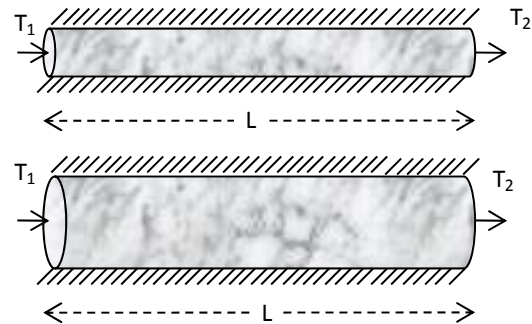


Figura 2.3. Flujo de calor en barras de diferente área de transversal.

El flujo será mayor en el caso de la barra de mayor área de flujo, lo que podemos escribir como. Es decir que el flujo calor es directamente proporcional al área de flujo.

$$Q \propto A \quad (2.3)$$

Es decir que si combinamos todas las conclusiones a las que hemos llegado podremos escribir el calor de la siguiente forma:

$$Q \propto A \frac{\Delta T}{L} \quad (2.4)$$

Hasta este punto debemos preguntarnos si esta ecuación es suficiente para describir el flujo de calor por conducción. Para verificar si es completa o no, imaginemos dos barras, sometidas a la misma diferencia de temperaturas, con la misma área de flujo y de la misma longitud, con la única diferencia que una es de madera y otra es de aluminio (Fig. 2.4), Imaginemos que tomamos ambas barras por el extremo que están calientes ¿Experimentarán las barras el mismo flujo de calor?

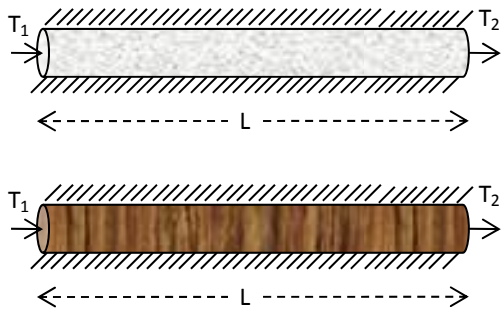


Figura 2.4. Flujo de calor en barras de diferente material.

La respuesta es **NO**. En la práctica seguramente sentiremos un mayor flujo de calor en el caso del aluminio lo que hará que **“NOS QUEMEMOS”** mientras que en el caso de la madera seguramente el flujo de calor será menor y la podremos tomar sin quemarnos. Es decir a que nuestra ecuación para estimar flujo de calor le falta una variable para que esté completa, a esa variable la denominaremos **Conductividad térmica** y es mayor en el caso del aluminio que en la madera, por lo que por último escribiremos la expresión para el calor por conducción como sigue:

$$q = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.5)$$

Esta expresión que acabamos de construir es lo que se conoce como la **Ley de Fourier** y define cuantitativamente el proceso de transferencia de calor por conducción y nos sirve para saber cómo se relacionan variables como flujo de calor, temperatura y propiedades de un material. Dicha ley puede expresarse para un material homogéneo, en el que ocurre un proceso de transferencia de calor por conducción en estado estacionario y en una sola dirección, de la manera siguiente:



“la cantidad de calor conducido en la dirección x, a través de un material sólido homogéneo en un intervalo de tiempo, es el producto entre el área expuesta y la transmisión de calor normal al eje x, el gradiente de temperatura y una propiedad del material conocida como conductividad térmica”

**JEAN BAPTISTE JOSEPH
FOURIER (1768-1830)**

Y matemáticamente en una dimensión tiene la siguiente forma:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dX} \quad (2.6)$$

Donde:

q: Flujo de calor perpendicular al área de transferencia de calor [W/m²]
A: Área de la superficie de transferencia [m²]
k: Conductividad Térmica del material [W/mK]
 $\frac{dT}{dX}$: Gradiente de temperatura a lo largo del eje X [K/m]

Por convención, el flujo de calor es positivo mientras ocurre desde la zona de alta a la de baja temperatura, por lo tanto se hace necesario colocar un signo negativo en la ecuación, puesto que en esta misma dirección el gradiente de temperatura es negativo.

En caso de que la transferencia de calor por conducción tenga lugar en más de una dirección, la Ley de Fourier puede ser escrita de la siguiente forma:

$$q = -k \nabla T \quad (2.7)$$

Donde:

$\nabla T = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z}$ Gradiente de temperatura en tres dimensiones para un sistema de coordenadas rectangulares.

Conductividad térmica

Como ya mencionamos la conductividad térmica es una propiedad de los materiales que nos permite estimar los flujos de calor a través de la Ley de Fourier. De manera más genérica la podemos definir como: La cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria (normal a la dirección del flujo), en la unidad de tiempo, si el gradiente de temperatura entre las dos superficies entre las cuales fluye el calor es unitaria.

La conductividad térmica es una propiedad física que determina la facilidad con la cual un material conduce el calor. Esta propiedad depende de la composición química de la sustancia o sustancias que componen el material, de la fase en que se encuentra el material (sólida, líquida o gaseosa), de la estructura del material, de la temperatura y de la presión en el caso de que el material se encuentre en estado gaseoso.

Dada la importancia de esta propiedad se le da un análisis bien detallado a los valores que adopta dependiendo del material que se estudie. En términos generales, puede indicarse que la conductividad térmica de los sólidos es mayor que la conductividad térmica de los líquidos y esta a su vez mayor que la de los gases, lo que equivale a decir que los sólidos son mejores conductores que los líquidos y estos son mejores conductores que los gases.

a. **Conductividad térmica de los sólidos:** La influencia de la presión es despreciable, aumenta o disminuye con la temperatura y para la mayoría de los problemas prácticos se puede asumir un modelo lineal o independiente de la Temperatura (Ec. 2.8).

$$K(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T \quad (2.8)$$

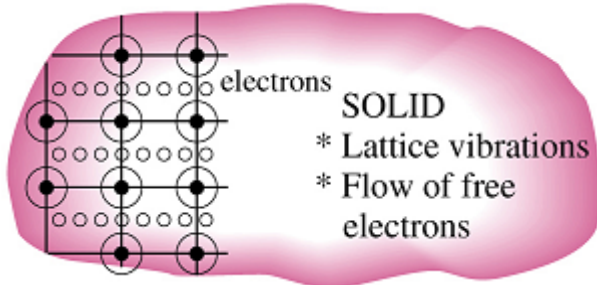


Figura 2.5. Arreglo molecular de los sólidos.

Algunos valores típicos de conductividades térmicas de sólidos son (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Valores de conductividad térmica de sólidos (Kern, 1999).

Material	K a 32 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)	K a 212 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)
Cobre	224,0	218
Hierro forjado	34,6	27,6
Acero	26,0	26,0
Aluminio	117,0	119,0

b. **Conductividad térmica de los líquidos:** La mayoría de los líquidos son incompresibles, razón por la cual la influencia de la presión es despreciable en particular sobre el valor de la conductividad es despreciable. Para la mayoría de los líquidos k decrece con la temperatura, excepto para el agua (Tabla 2.2).

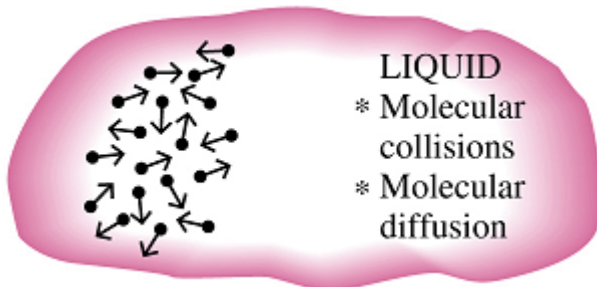


Figura 2.6. Arreglo molecular de los líquidos.

Tabla 2.2. Valores de conductividad térmica de líquidos (Kern, 1999).

Material	K a 80 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)	K a 155 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)
Agua	0,330	0,356

Aceite	0,104	0,100
Benceno	0,086	0,082
Cloruro	0,111	0,089

c. **Conductividad térmica de gases y vapores:** A diferencia de los líquidos y sólidos, para el caso de los gases la presión si modifica considerablemente la conductividad térmica de los gases. En general, a medida que aumenta la presión aumenta la conductividad térmica. También se incrementa con el incremento de la temperatura y disminuye a medida que aumenta el peso molecular del gas (Tabla 2.3).

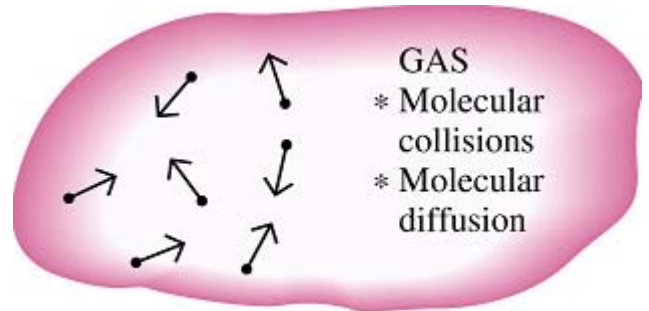


Figura 2.7. Arreglo molecular de los gases.

Tabla 2.3. Valores de conductividad térmica de gases (Kern, 1999).

Material	K a 100 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)	K a 150 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)
Aire	0,0095	0,0140
Benceno	0,0730	0,0103
Amoníaco	0,0128	0,0157
Butano	0,0078	0,0135

Conductividad térmica de aislantes

Clasificación aparte se les da a los aislantes debido a su frecuente uso en la industria. En general son materiales sólidos de muy baja conductividad térmica utilizados con la finalidad de disminuir las pérdidas de calor en sistemas industriales. Algunos valores típicos de conductividades térmicas de aislantes e muestran a continuación (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Valores de conductividad térmica de aislantes (Kern, 1999).

Material	K a 68 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)	K a 212 °F (Btu h ⁻¹ Pie ⁻¹ °F ⁻¹)
Asbesto	0,0920	0,1100
Lana mineral	0,0225	0,0219
Arena seca	0,1900	0,1800

El comportamiento en general de la conductividad térmica de diversos materiales es resumido a continuación (Fig. 2.8).

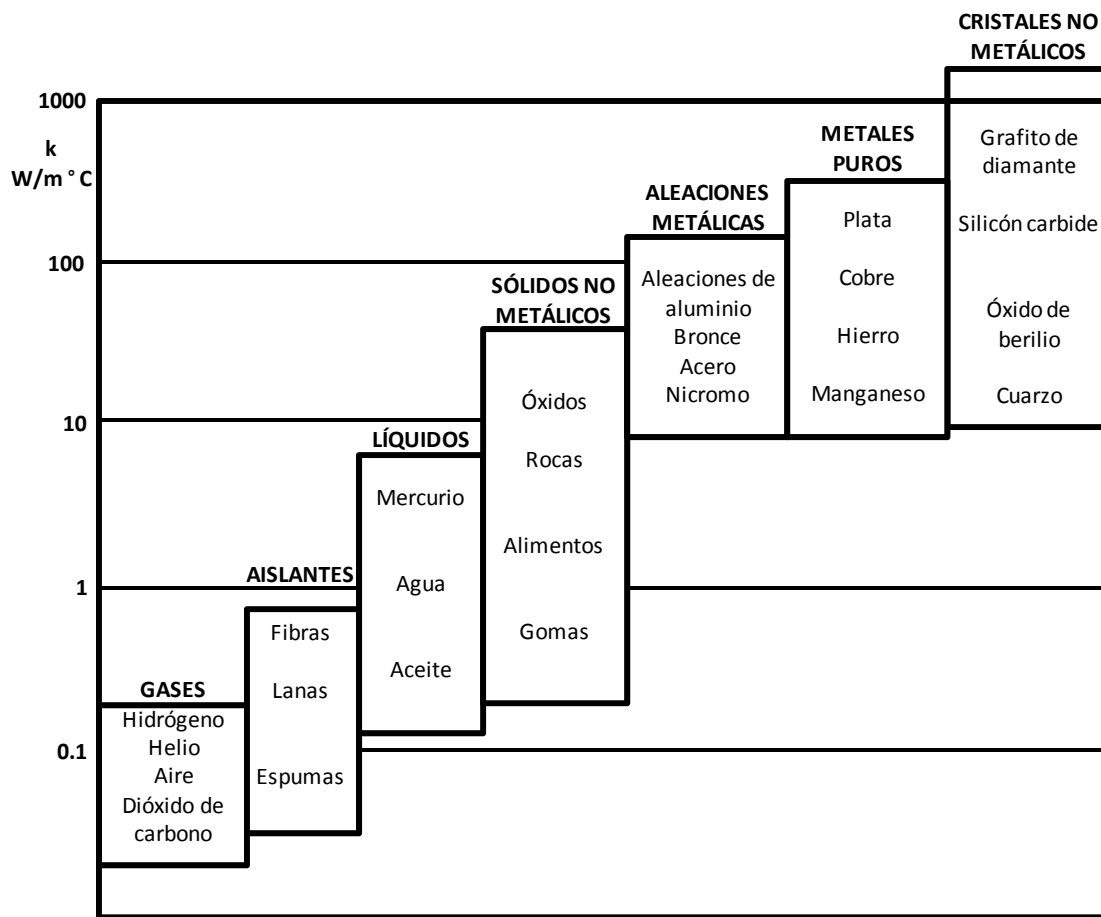


Figura 2.8. Conductividad térmica de diversos materiales (Geankoplis, 1995).

EJERCICIOS II

- 2.1 ¿Cómo se comparan las conductividades térmicas de los líquidos, sólidos y gases en general?
- 2.2. Explique el significado físico de cada uno de los elementos de la Ley de Fourier.

III. Ecuación de difusión de calor

Hasta ahora hemos estudiado la ecuación que regula la transferencia de calor por conducción. Cuando se construye una relación más compleja en la que se contempla la posibilidad de transferencia en más de una dirección y la variación de la temperatura en el tiempo (estado transitorio), nace lo que se conoce como la ecuación fundamental de la transferencia de calor por conducción, la cual se obtiene de un balance de energía sobre un elemento diferencial de volumen (Fig. 3.1).

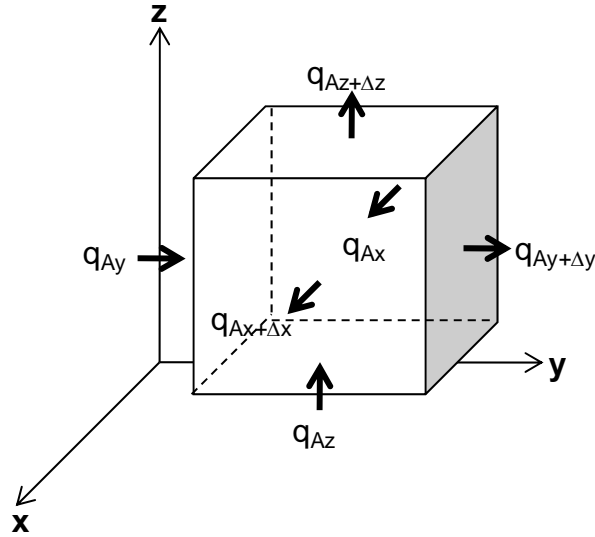


Figura 3.1. Transferencia de calor en un elemento diferencial de volumen.

Haciendo un balance de energía en un elemento diferencial de volumen.

Entra-Sale+Genera-Consumo= Acumula

La energía que entra lo hace solo a través del mecanismo de conducción:

$$\begin{aligned} & (q_x|_x - q_x|_{x+\Delta x})\Delta y\Delta z + (q_y|_y - q_y|_{y+\Delta y})\Delta x\Delta z \\ & + (q_z|_z - q_z|_{z+\Delta z})\Delta x\Delta y + \dot{g}\Delta x\Delta y\Delta z = \Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Si el calor se transfiere solo por conducción y tomando los límites cuando Δ tiende a cero, entonces

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} + \dot{g} = \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde:

\dot{g} : Calor generado o consumido por el sólido por unidad de volumen	[W/m ³].
C_p : Capacidad calórica del sólido	[J/KgK]
ρ : Densidad	[kg/m ³]

Y si no hay generación de energía (Ec. 3.3) y las propiedades son constantes, entonces la ecuación de balance de energía queda expresada para un sistema de coordenadas rectangulares de la siguiente forma (Ec. 3.4):

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.4)$$

Tabla 3.1. Ecuación fundamental de conducción de calor en diferentes sistemas de coordenadas para propiedades constantes.

Ecuación de la energía	
<i>Rectangulares</i>	
$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$	
<i>Cilíndricas</i>	
$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$	
<i>Esféricas</i>	
$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin(\theta) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)$	

Esta ecuación cuando es resuelta nos aportara el valor de la temperatura como función de la posición y del tiempo ($T(t,x,y,z)$). Esta ecuación es una ecuación diferencial en derivadas parciales, que tiene una infinidad de soluciones de acuerdo al caso en el que se estudie. Para poder ser resuelta, básicamente deben especificarse las siguientes condiciones

Condiciones iniciales

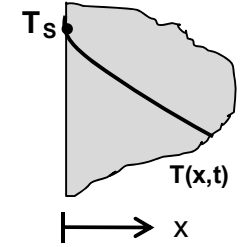
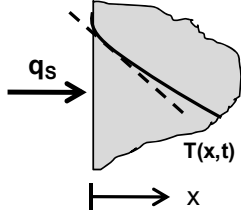
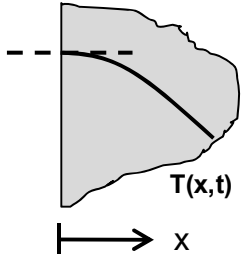
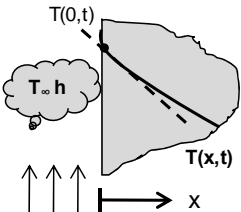
En caso de que el proceso tenga lugar en estado transitorio o no estacionario, se necesita saber con certeza cuál es el perfil de temperaturas al inicio del proceso de transferencia de calor a lo largo de la geometría sobre la cual se quiere predecir el perfil de temperatura. Un ejemplo de una condición inicial es por ejemplo un perfil de temperatura uniforme el cual puede ser escrito matemáticamente como:

$$T(t=0, x, y, z) = T_0 \quad (3.2)$$

Condiciones de borde

Las condiciones de borde especifican como es el proceso de transferencia de calor a través de las fronteras de la región cuyo comportamiento se está modelando y dependiendo de la naturaleza, pueden ser (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Condiciones de borde para la ecuación de difusión de calor.

Expresión matemática	Condición
Temperatura superficial constante $T(0,t) = T_s$	
Flujo superficial de calor constante $-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = q_s$	
Superficie adiabática o aislada $\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0$	
Convección Superficial $-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h(T_\infty - T(0,t))$	

IV. Conducción unidimensional en estado estacionario

La primera solución de la ecuación fundamental de la conducción de calor es la de conducción en una sola dirección (unidimensional) en estado estacionario y sin generación de energía, en cuyo caso la ecuación 3.2, se simplifica y queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.1)$$

Esta situación físicamente puede ser representada por la transferencia de calor solo en una dirección a través de una pared plana (Fig. 4.1).

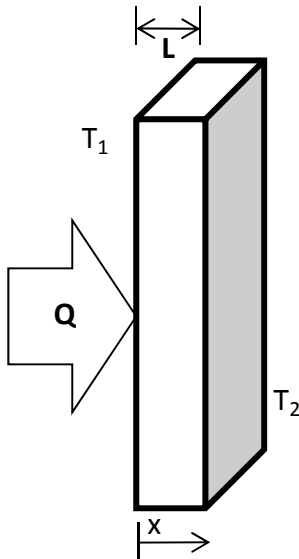


Figura 4.1. Transferencia de calor a través de una placa plana.

La ecuación 4.1, implica que el flujo de calor en cada una de las posiciones a lo largo de x es constante

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = \text{cte}$$

Si la conductividad térmica no varía a lo largo de la pared, y tomando en consideración las condiciones de borde de la pared en $x=0$ y $x=L$, tenemos que:

$$T(x=0) = T_1 \quad \text{Condición de borde 1}$$

$$T(x=L) = T_2 \quad \text{Condición de borde 2}$$

La expresión para determinar la temperatura en el interior de la pared quedara expresada como:

$$T(x) = T_2 + \frac{(T_1 - T_2)}{L} x$$

Lo cual nos lleva a la segunda conclusión importante (aparte del hecho de que el flujo de calor es constante), y es el hecho

de que el perfil de temperatura bajo las condiciones de conducción unidimensional en estado estacionario sin generación de energía es **LINEAL** para un sistema de coordenadas rectangulares. De forma tal que si queremos estimar el flujo de calor entre T_1 y T_2 , retomamos la definición de la Ley de Fourier

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

Sustituyendo la expresión para el perfil de temperatura

$$Q = kA \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right)$$

$$\frac{Q}{A} = q = k \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) = k \frac{\Delta T}{L}$$

A través de esta expresión se puede relacionar muy fácilmente el flujo de calor con la diferencia de temperatura bajo condiciones de transferencia unidimensional en estado estacionario.

Resistencia Térmica

La ecuación 3.4 nos sugiere una idea muy importante y es el hecho de que el flujo de calor lo podemos visualizar como la relación entre un coeficiente de transferencia y una fuerza impulsora o haciendo analogía con el caso eléctrico como

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Potencial de transmisión}}{\text{Calor Transferido}}$$

De esa forma la **RESISTENCIA TÉRMICA** a la conducción en una pared plana será

$$R_t = \frac{\Delta T}{kA \frac{\Delta T}{L}} = \frac{L}{kA} \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (4.2)$$

La potencia de este nuevo concepto queda en evidencia sobre todo en el análisis de geometrías compuestas con diferentes mecanismos de transferencia de calor.

Como concepto la resistencia térmica de una etapa de transferencia de calor cuantifica la capacidad de la pared en función de su geometría y conductividad térmica a oponerse al flujo de calor, lo cual tiene dos implicaciones directas tomando en consideración la expresión derivada para el flujo de calor

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

Caso 1: bajo condiciones de caída de temperatura constante, la resistencia térmica aumenta o disminuye el flujo de calor directamente. A mayor resistencia menor flujo de calor y a menor resistencia mayor flujo de calor.

Caso 2: bajo condiciones de flujo de calor constante, la resistencia térmica aumenta o disminuye la caída de temperatura de manera directamente proporcional.

Pared compuesta

Ahora intentemos generalizar el resultado obtenido para una pared a diferentes arreglos de paredes compuestas. Esto se conoce como circuitos térmicos. A continuación se muestra un sistema de tres paredes compuestas colocadas una a continuación de otra respecto al flujo de calor (Fig. 4.2).

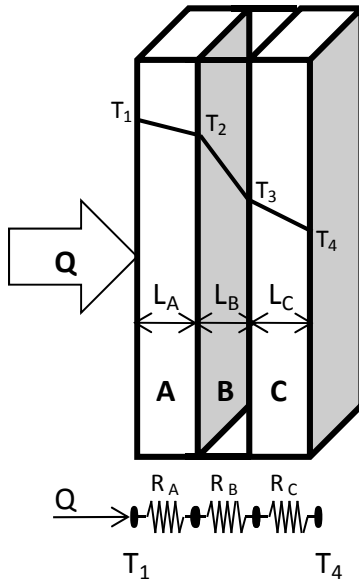


Figura 4.2. Circuito térmico de tres resistencias térmicas.

Debemos recordar que bajo las condiciones de conducción unidimensional en estado estacionario, sin generación de energía y con conductividad térmica constante, el perfil de temperaturas a lo largo de cada pared es **LINEAL**. Lógicamente la caída individual de temperatura dependerá del valor de la resistencia térmica de cada material.

Aplicando el concepto de resistencia térmica el flujo de calor a lo largo de todo el arreglo lo podemos expresar de la siguiente forma

$$Q = \frac{T_4 - T_1}{R_t}$$

Donde R_t , es la resistencia térmica de toda la resistencia térmica que se encuentra entre T_1 y T_4 , la cual es la contribución de las tres paredes, y por encontrarse una a continuación de la otra respecto al flujo de calor, la resistencia térmica total será

$$R_t = R_A + R_B + R_C = \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A}$$

A este arreglo de las resistencias se le conoce como **ARREGLO EN SERIE**.

Bajo condiciones de estado estacionario, debido a que no hay acumulación de energía, el calor total Q , que fluye entre T_1 y T_4 , es el mismo que fluye a través de la pared A, B y C. Matemáticamente puede ser escrito como:

$$Q = Q_A = Q_B = Q_C$$

$$\frac{T_1 - T_4}{R_t} = \frac{T_1 - T_2}{R_A} = \frac{T_2 - T_3}{R_B} = \frac{T_3 - T_4}{R_C}$$

Escribiendo la expresión para el flujo de calor entre 1 y 4, tenemos que:

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A}}$$

Reordenando la ecuación

$$(T_1 - T_4) = Q \left[\frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} \right] = Q \frac{L_A}{k_A A} + Q \frac{L_B}{k_B A} + Q \frac{L_C}{k_C A}$$

$$\Delta T_{1-4} = \Delta T_{1-2} + \Delta T_{2-3} + \Delta T_{3-4}$$

Esta última expresión es muy importante, ya que nos refuerza el hecho de que la caída de temperatura a lo largo del arreglo puede ser analizada como la contribución de la caída de cada etapa individualmente, la cual a su vez depende de la resistencia térmica de cada material.

Resistencia de contacto

Aunque no lo hemos tomado en cuenta hasta ahora, la caída de temperatura a ambos lados de la interfaz de dos superficies que se encuentran en contacto es con frecuencia considerable. Esta variación se le atribuye a lo que se conoce como resistencia térmica de contacto R_{tc} . Físicamente esta resistencia se debe a los efectos de rugosidad entre las superficies lo que hace que el contacto entre ellas no sea perfecto (Figura 4.3)

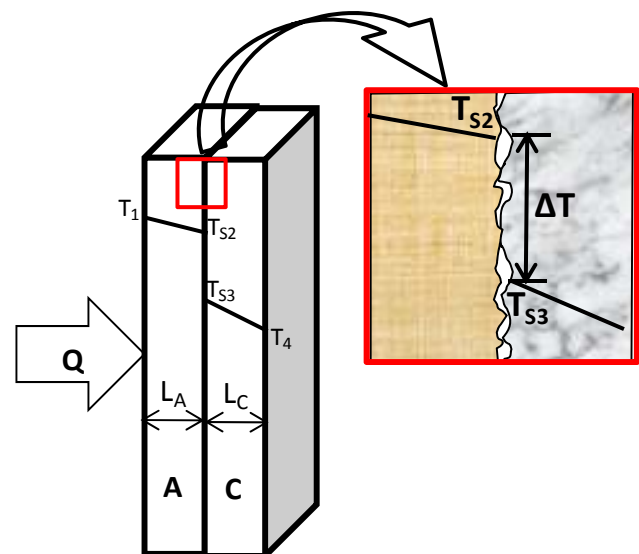


Figura 4.3. Resistencia térmica de contacto entre dos superficies.

Por lo que aplicando el concepto de resistencia, la expresión matemática queda expresada de la siguiente forma:

$$R_{tc} = \frac{T_{s2} - T_{s3}}{Q} = \frac{T_{s2} - T_{s3}}{qA}$$

Entonces

$$R_{tc}'' = R_{tc}A = \frac{T_{s2} - T_{s3}}{q} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Donde R_{tc}'' es la resistencia térmica de contacto expresada por unidad de área de la interfaz.

Los valores de la resistencia térmica de contacto dependerán básicamente de la rugosidad de los materiales y de lo que ocupe el espacio entre los huecos que generalmente es aire. La transferencia de calor en la región interfacial, se lleva a cabo por diversos mecanismos como conducción y radiación básicamente. A fin de predecir los valores de la resistencia térmica de contacto se han medido gran cantidad de estos valores experimentalmente, algunos de los cuales son mostrados a continuación (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Resistencia térmica de contacto para interfaces metálicas en condiciones de vacío y con diferentes fluidos en la interfaz.

Resistencia térmica de contacto			
$R_{tc}'' \times 10^4 \text{ (m}^2 \cdot K/W)$			
	a) interfaz al vacío	b) fluido en la interfaz	
Presión de contacto	100 kN/m ²	10000 kN/m ²	Aire 2.75
Acero inoxidable	6-25	0.7-4.0	Helio 1.05
Cobre	1-10	0.1-0.5	Hidrogeno 0.720
Magnesio	1.5-3.5	0.2-0.4	Aceite de silicio 0.525
Aluminio	1.5-5	0.2-0.4	Glicerina 0.265

Tabla 4.2. Resistencia térmica de interfaces solido-solido.

Interfaz	$R_{tc}'' \times 10^4 \text{ (m}^2 \cdot K/W)$
Chip de silicio/aluminio recubierto en aire	0.3-0.6
Aluminio/Aluminio con relleno de hoja de indio	0.07
Acero inoxidable/Acero inoxidable con relleno de hoja de indio	0.04
Aluminio/Aluminio con recubrimiento metálico	0.01-0.1
Aluminio/Aluminio con grasa	0.07
Acero inoxidable/Acero inoxidable con grasa	0.04
Chip de silicio/aluminio con resina epóxica	0.2-0.9
Bronce/Bronce con soldadura de estaño	0.025-0.14

Sistemas radiales

Pared cilíndrica

La ecuación de la energía para conducción unidimensional en estado estacionario para una pared cilíndrica puede ser escrita como sigue

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

Físicamente puede ser representado como

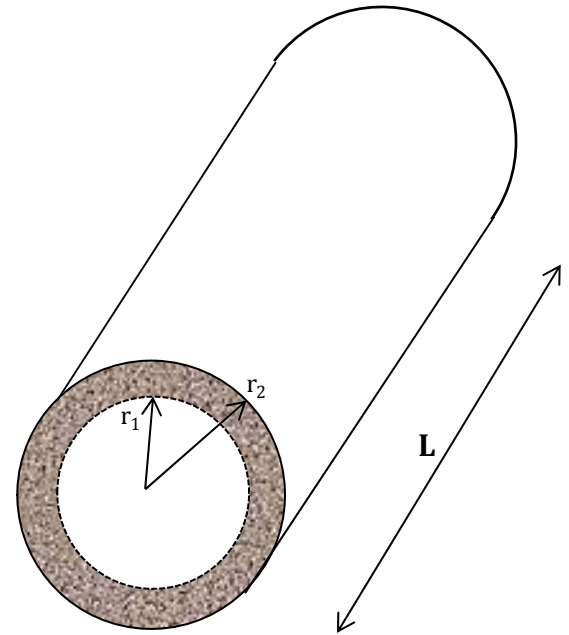


Figura 4.4. Transferencia de calor a través de una pared cilíndrica.

Por lo que si por ejemplo el calor se transfiere desde adentro hacia afuera del cilindro en la dirección radial, entonces $T_1 > T_2$. Para resolver la ecuación anterior, se deben incluir las siguientes condiciones de borde

$$T(r = r_1) = T_1 \quad \text{Condición de borde 1}$$

$$T(r = r_2) = T_2 \quad \text{Condición de borde 2}$$

La solución de la ecuación, arroja lo que se conoce como el perfil de temperatura para la conducción unidimensional en estado estacionario para una pared cilíndrica

$$T(r) = T_2 + (T_1 - T_2) \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)}$$

Por lo que el flujo de calor será

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{Rt} = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} 2\pi Lk$$

Y la resistencia térmica de una pared cilíndrica

$$Rt = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

Pared esférica

La ecuación de la energía para conducción unidimensional en estado estacionario para una pared esférica puede ser escrita como sigue

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

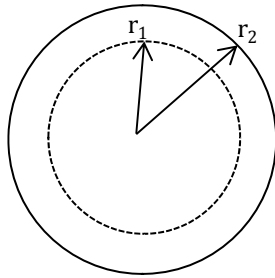


Figura 4.5. Transferencia de calor a través de una pared esférica.

Y con la incorporación de las condiciones de borde

$$T(r = r_1) = T_1 \quad \text{Condición de borde 1}$$

$$T(r = r_2) = T_2 \quad \text{Condición de borde 2}$$

EJERCICIOS IV

1. Ejercicio 3 (4.3.1 Geakoplis). Aislamiento necesario para un almacén de alimento refrigerado. Se desea construir un almacén refrigerado con una capa interna de 19,1 mm de madera de pino, una capa intermedia de corcho prensado y una capa externa de 50,8 mm de concreto. La temperatura de la pared interior es de $-17.8\text{ }^\circ\text{C}$ y la de la superficie exterior de $29,4\text{ }^\circ\text{C}$ en el concreto. Las conductividades medias son, para el pino, 0,151; para el corcho, 0,0433; y para el concreto 0,762 W/mK. El área superficial total interna que se debe usar en los cálculos es aproximadamente 39 m^2 (omitiendo los efectos de las esquinas y los extremos). ¿Qué espesor de corcho prensado se necesita para mantener la pérdida de calor en 586 W?

Respuesta: 0.128 m de espesor

2. (4.3.2 Geakoplis). Aislamiento de un horno. La pared de un horno de 0.244 m de espesor se construye con un material que tiene una conductividad térmica de 1.30 W/mK. La pared estará aislada en el exterior con un material que tiene una k promedio de 0.346 W/mK, de tal manera que las pérdidas de calor en el horno sean iguales o inferiores a 1830 W/m^2 . La temperatura de la superficie interior es 1588 K y la de la externa es 299 K. Calcule el espesor del aislante necesario.

3. (10.2 Mc Cabe). Una tubería estándar de acero de 1 pulg, Catálogo 40, conduce vapor de **agua saturado**. La tubería está aislada con una capa de 2 pulg de magnesia al 85 por 100, y sobre la magnesia lleva una capa de corcho de 3 pulg de espesor. La temperatura de la pared interior es de $249\text{ }^\circ\text{F}$ y la de la exterior de corcho está $90\text{ }^\circ\text{F}$. Las conductividades térmicas son en [BTU/h pies $^\circ\text{F}$] para el acero 26; para la magnesia, 0,034, y para el Corcho 0.03. Calcúlense:

- Las pérdidas de calor en 100 pies de tubería, en Btu por hora.
- Las temperaturas de los límites comprendidos entre el metal y la magnesia y entre la magnesia y el corcho.

4. La pared de un horno consiste en una serie de: 4 pulg de ladrillo refractario de caolín, 7 pulg de ladrillo de caolín aislante y suficiente ladrillo de arcilla refractaria para reducir las pérdidas de calor a $100\text{ Btu/(h)(pie}^2)$ cuando las temperaturas del interior y del exterior son de $1500\text{ }^\circ\text{F}$ y $100\text{ }^\circ\text{F}$, respectivamente.

- ¿Qué grosor de ladrillo de arcilla refractaria deberá usarse? ¿Qué pasaría si se colocara un ladrillo de arcilla refractaria de mayor o menor espesor?
- Si se coloca otro material adicional de $1/8$ de pulgada de grueso entre el ladrillo de caolín aislante y el ladrillo de arcilla refractaria cuya conductividad térmica es $K = 0,0095\text{ BTU h}^{-1}\text{ pie}^{-1}\text{ }^\circ\text{F}^{-1}$. ¿Qué grosor de ladrillo aislante se requerirá?

La solución de la ecuación, arroja lo que se conoce como el perfil de temperatura para la conducción unidimensional en estado estacionario para una pared esférica.

$$T(r) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{(1 - (r_1/r))}{(1 - (r_1/r_2))}$$

Por lo que el flujo de calor será

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{Rt} = \frac{(T_1 - T_2)}{(1/r_1 - 1/r_2)} 4\pi k$$

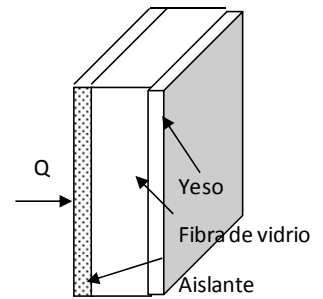
Y la resistencia térmica de una pared cilíndrica

$$Rt = \frac{(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi k}$$

- Dibuje el sistema descrito identificando cada una de las partes y la dirección del flujo de calor.
- Dibuje el circuito de resistencias térmicas asociado.
- Escriba todas las suposiciones de su modelo.

K arcilla refractaria $0,58\text{ BTU h}^{-1}\text{ pie}^{-1}\text{ }^\circ\text{F}^{-1}$; k de caolín aislante $0,15\text{ BTU h}^{-1}\text{ pie}^{-1}\text{ }^\circ\text{F}^{-1}$; K refractario de caolín $0,050\text{ BTU h}^{-1}\text{ pie}^{-1}\text{ }^\circ\text{F}^{-1}$.

5. Una casa tiene una pared compuesta de interior a exterior por 3 cm de aislante ($k=0,045\text{ W/mK}$), 10 cm de fibra de vidrio ($k=0,082\text{ W/mK}$) y 2 cm de yeso ($k=0,17\text{ W/mK}$). En los días fríos, la temperatura del interior excede a la exterior y la caída de temperatura a lo largo de la pared de yeso es de $2,5\text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuánto calor se pierde a lo largo de una pared de 5 m de ancho por 4 metros de alto?



6. La pared de un horno consta de 200 mm de un ladrillo refractario, 200 mm de ladrillo Sil-o-ce1 y 6 mm de chapa de acero. La superficie del refractario en contacto con el fuego está a $1150\text{ }^\circ\text{C}$, y la superficie exterior del acero está a $30\text{ }^\circ\text{C}$. Un preciso balance de calor aplicado al horno indica que la pérdida de calor desde la pared es de 6300 W y el área de transferencia de calor es de 20 m^2 . Se sabe que existen delgadas capas de aire entre las superficies del ladrillo y el acero que **equivalen a otra resistencia térmica**.

- Construya el circuito de resistencias térmicas y escriba todas las suposiciones de su modelo.
- ¿Cuánto es la resistencia térmica adicional del aire?
- Calcule las temperaturas en cada lado de las tres resistencias. Grafique el perfil de temperaturas en el interior de las tres resistencias
- ¿Cuál es la resistencia térmica mayor? ¿Qué porcentaje de la caída de temperatura total se debe sólo a ella?

k ladrillo refractario ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k ladrillo Sil-o-ce1 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k acero ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
1,52	0,061	15

IV. Transferencia de calor por Convección

Hasta este punto solo hemos estudiado la transferencia de calor que se da a lo largo de uno o varios sólidos. Una situación física que aparece con frecuencia es un fluido en movimiento sobre una superficie a diferente temperatura. En este caso la transferencia de calor, tendrá lugar gracias a otro mecanismo de transferencia que es conocido como la convección.

Considere un fluido que se desplaza a una temperatura T_∞ y a una velocidad U_∞ sobre las adyacencias de una superficie que se encuentra a una temperatura uniforme T_s . El flujo de calor que tendrá lugar, puede ser determinado mediante la siguiente expresión

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (4.1)$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia convectivo	[W/m ² K]
T _s : Temperatura superficial	[K]
T _∞ : Temperatura en el seno del fluido	[K]
A: Área de transferencia de calor por convección	[m ²]
Q: tasa de transferencia de calor por convección	[W]

A esta ecuación se le conoce como ley de enfriamiento de Newton y nos proporciona una relación para determinar la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido en movimiento que se encuentra a una temperatura diferente.

Aplicando el concepto de resistencia térmica a la etapa de convección, tenemos la siguiente expresión:

$$R_{cv} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta T}{hA\Delta T} = \frac{1}{hA} \quad (4.2)$$

Es importante resaltar que el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), representa la capacidad del SISTEMA, a transferir calor con la superficie gracias a este mecanismo. Su determinación es materia de suma importancia en este tema ya que puede tener una naturaleza más o menos compleja de acuerdo a cada caso en particular.

Teoría de la capa limite

Cuando un fluido se mueve sobre una superficie que se encuentra a diferente temperatura, se formará todo un perfil de velocidades y de temperatura sobre la superficie. El fluido que está más cerca de la superficie tendrá una velocidad cercana a la de la superficie ($U_x=0$, si la superficie esta en reposo), y en la medida que se aleje de la superficie, la velocidad se parecerá mas a la de la corriente libre (U_∞), la forma como varía la velocidad entre estos dos límites constituye lo que se conoce como la Capa limite Hidrodinámica (Fig. 4.1).

Algo muy similar ocurre con la temperatura, el fluido adyacente a la superficie tendrá una temperatura cercana a esta y en la medida que se aleje su temperatura se acercará a la de la corriente libre (T_∞), y el comportamiento del perfil de temperaturas a lo largo del fluido se conoce como la capa limite Térmica.

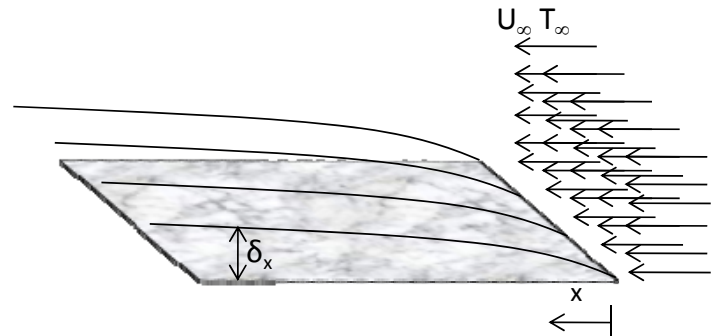


Figura 4.1. Representación de la capa limite hidrodinámica.

Las características de transferencia de calor a través del mecanismo de convección, obedecerá básicamente al comportamiento de estas dos capas límites, las cuales dependen de las propiedades del fluido que se mueve y de la geometría de la superficie.

Las relaciones matemáticas que regular el comportamiento de ambas capas límites son presentadas a profundidad en el Incropera y muchos otros libros de transferencia de calor e involucran la resolución de las ecuaciones de energía, conservación de la masa y cantidad de movimiento.

En este capítulo vamos a estudiar algunas de las soluciones propuestas en la literatura para diferentes casos. Para ello, debemos introducir los números adimensionales que regulan el proceso

$$\text{Prandtl} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{Difusividad momento}}{\text{Difusividad termica}} \quad (4.3)$$

$$\text{Reynolds} = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} \quad (4.4)$$

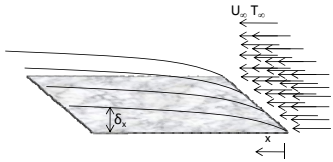
$$\text{Nusselt} = \frac{hL}{k_f} = \text{Gradiente de temperatura superficial} \quad (4.5)$$

$$\text{Biot} = \frac{hL}{k_s} = \frac{\text{Calor por conveccion}}{\text{Calor por conduccion}} \quad (4.6)$$

$$\text{Fourier} = \frac{\alpha t}{L^2} = \text{Tiempo adimensional} \quad (4.7)$$

Las soluciones matemáticas a la teoría de la capa limite, con frecuencia se expresan en función de estos parámetros. En general en el proceso de transferencia de calor por convección, el movimiento del fluido se puede dar gracias a fuerzas externas (convección forzada) o a fuerzas internas (convección natural o libre). Los casos que a continuación mostraremos se basan en soluciones de convección forzada.

Flujo paralelo a superficies planas



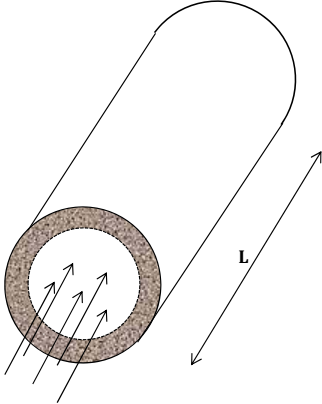
$$Nu_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.8)$$

$Re_L < 2 \times 10^5$ (propiedades evaluadas a la temperatura de bulto T_∞)

$$Nu_L = 0.360 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (4.9)$$

$Re_L > 3 \times 10^6$ (propiedades evaluadas a la temperatura de bulto T_∞)

Flujo laminar interior tubería



$$Nu_D = 1.86 Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (4.10)$$

EJERCICIOS

1. (7.19 Incropera). Sobre la superficie superior de una placa plana que se calienta a una temperatura uniforme de 100 °C hay aire en flujo paralelo a una presión de 1 atm y una temperatura de 50 °C. La placa tiene una longitud de 0.20 m (en la dirección del flujo) y un ancho de 0.10 m. El número de Reynolds basado en la longitud de la placa es 40000.

¿Cuál es la transferencia de calor de la placa al aire? Si la velocidad de flujo libre del aire se duplica y la presión aumenta a 10 atm, ¿Cuál es la transferencia de calor?

2. Las paredes de una cava de almacenamiento de alimentos fríos, está constituida de adentro hacia afuera por una pared delgada de aluminio, por una pared mitad de fibra de vidrio (A) y la otra mitad de corcho granulado (B), y por último una pared delgada de aluminio. La cava está expuesta tanto interna como externamente a corrientes convectivas de aire. Si las temperaturas en el interior y exterior del aire, son respectivamente: -5 °C y 35 °C, estime el flujo de calor que recibe una cava cuadrada de 5 metros de lado. Desprecie el flujo de calor por la cara de la cava que se encuentra en contacto con el suelo.

$Re_D < 2300$, (propiedades evaluadas a la temperatura de bulto T_∞)

Flujo turbulento interior de tubería

Dittus-Boeltler

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^n \quad (4.11)$$

$Re_D > 10^4$, $L/D > 10$, $0.7 < Pr < 160$, $n=0,4$ si el fluido se está calentando y $n=0,3$ si se está enfriando (propiedades evaluadas a la temperatura de bulto T_∞)

Sieder Tate

$$Nu_D = 0.027 Re^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (4.12)$$

$Re_D > 10^4$, $L/D > 10$, $0.7 < Pr < 16700$, todas las propiedades excepto T_s se evalúan a T_f temperatura de la película $T_f = (T_s + T_\infty)/2$

Flujo externo a superficie cilíndrica

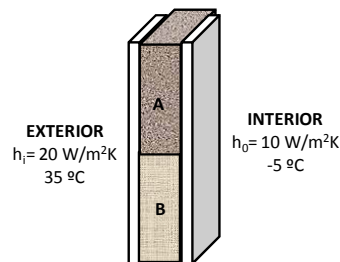
$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (4.13)$$

$0,4 < Re < 4 \times 10^5$

Propiedades evaluadas a la temperatura de la película

$T_f = (T_s + T_\infty)/2$

Re_D	C	m
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40000	0.193	0.618
40000-400000	0.027	0.805



3. Se desea enfriar agua que va por el interior de una tubería de acero de 8 pulg de diámetro nominal cat 40 a 80 °C. Para ello se dispone de dos posibilidades de convección por el exterior de la tubería.

La primera es agua fluyendo paralelamente a la tubería a una temperatura de 20 °C y una velocidad de 0,1 m/s.

La segunda es aire fluyendo paralelamente a la tubería a 15°C a una velocidad de 10 m/s.

El flujo de agua por el interior de la tubería es tal que mantiene la temperatura interna de la pared de la tubería a una temperatura de 79,5 °C.

¿Cuál de las dos opciones será la mejor para cumplir con los requerimientos?

Construya el circuito de resistencias térmicas

Escriba todas las suposiciones de su modelo