



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA LA DEFENSA**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DE LA FUERZA ARMADA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA NAVAL**  
**UNIDAD CURRICULAR: TRANSFERENCIA DE CALOR**

# **UNIDAD I**

## **INTRODUCCIÓN A LA**

### **TRANSFERENCIA DE CALOR**

**REALIZADO POR:**  
**ING. LUIS ARTURO LOVERA**

**PUNTO FIJO, ENERO DE 2015**

## UNIDAD 1: INTRODUCCIÓN A LA TRANSFERENCIA DE CALOR

### 1.- Objetivo de aprendizaje.

Identificar a través de un marco conceptual y metodológico los mecanismos de transferencia de calor.

### 2.- Contenido.

- ✓ Términos básicos.
- ✓ Relación entre la transferencia de calor y la termodinámica.
- ✓ Transferencia de calor en la ingeniería.
- ✓ Dimensiones y unidades.
- ✓ Mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.
- ✓ Transferencia de calor y ley de conservación de energía. **(Investigar el estudiante)**
- ✓ Analogía eléctrica. **(Exposición de la semana 09)**

#### 2.1. -TÉRMINOS BÁSICOS.

A continuación se presenta una serie de definiciones básicas, las cuales son:

➤ **Calor:** es la energía que se da entre diferentes cuerpos o diferentes zonas de un mismo cuerpo como resultado de una diferencia de temperaturas.

➤ **Energía:** (proviene del griego ἐνέργεια *enérgeia*, 'actividad', 'operación'). Se define como la capacidad para realizar un trabajo, transformar o poner en movimiento.

➤ **Temperatura:** es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico.

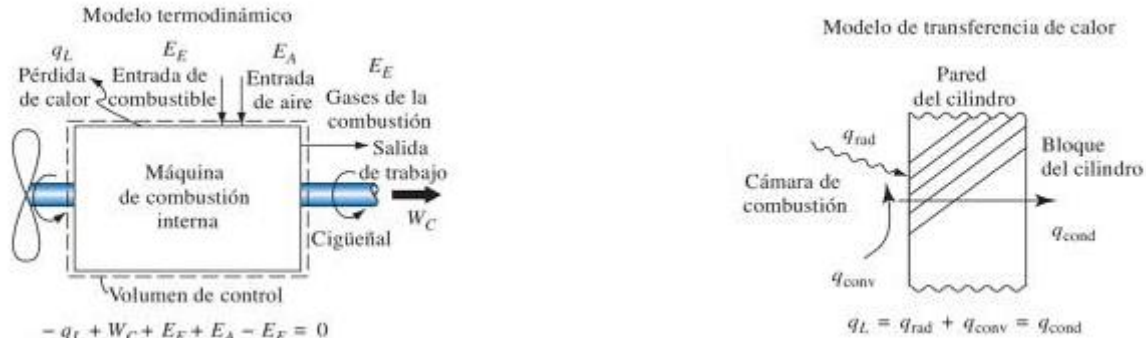
#### 2.2. –RELACIÓN ENTRE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y LA TERMODINÁMICA.

Siempre que existe un gradiente de temperatura en un sistema, o cuando se ponen en contacto dos sistemas con temperaturas diferentes, se transfiere energía. El proceso mediante el cual tiene lugar el transporte de energía se conoce como *transferencia de calor*. Lo que se transporta, denominado calor, no se puede observar o medir de manera directa. Sin embargo, sus efectos se pueden identificar y cuantificar mediante mediciones

y análisis. El flujo de calor, al igual que la realización de trabajo, es un proceso mediante el cual se cambia la energía interna de un sistema.

La rama de la ciencia que trata sobre la relación entre el calor y otras formas de energía, incluyendo el trabajo mecánico en particular, se denomina *termodinámica*. Sus principios, se apoyan en observaciones que se han generalizado en leyes que se consideran válidas para todos los procesos que ocurren en la naturaleza, debido a que no se han encontrado excepciones. Por ejemplo, la primera ley de la termodinámica se basa en el principio de la conservación de la energía, y establece que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma; por lo que rige de manera cuantitativa todas las transformaciones de energía, pero no impone restricciones en la dirección de la transformación. Sin embargo, se sabe por experiencia que no es posible que un proceso tenga por resultado sólo la transferencia neta de calor de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura; este enunciado experimental se conoce como la segunda ley de la termodinámica.

En la figura 01 se muestra el modelo termodinámico y el modelo de transferencia de calor de un motor de combustión interna.



**Figura 01.** Modelo termodinámico clásico y de transferencia de calor de un motor.

(Kreith, 2012)

### 2.3. –TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA INGENIERÍA

De acuerdo con todo lo descrito anteriormente la transferencia de calor se puede definir como la ciencia que se ocupa de la transmisión de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales como resultado de una diferencia de temperatura. Como existen diferencias de temperatura en todo el universo, los fenómenos de flujo de calor son tan universales como los asociados con las atracciones gravitacionales. Sin embargo, a

diferencia de la gravedad el flujo de calor no se rige por una relación única, sino más bien por una combinación de varias leyes físicas independientes.

Cuando sea necesario hacer una suposición o aproximación en la solución de un problema, el ingeniero debe confiar en su ingenio o experiencia. No existen guías simples para la solución de problemas nuevos o inexplorados y una suposición válida para un problema puede no serlo en otro. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que el primer requerimiento para hacer suposiciones o aproximaciones sólidas en ingeniería es un entendimiento físico completo y detallado del problema. En el campo de la transferencia de calor, esto significa estar familiarizado no sólo con las leyes y mecanismos físicos del flujo de calor, sino también con las leyes y mecanismos de la mecánica de los fluidos, la física y las matemáticas.

Es importante tomar en cuenta las suposiciones, idealizaciones y aproximaciones hechas en el curso de un análisis cuando se interpreten los resultados finales. En ocasiones sino se cuenta con información suficiente sobre las propiedades físicas, es necesario utilizar aproximaciones de ingeniería para resolver un problema. Por ejemplo, en el diseño de partes de máquinas que funcionen a temperaturas elevadas, puede ser necesario estimar el límite proporcional o a la resistencia a la fatiga del material a partir de datos a baja temperatura. Para asegurar un funcionamiento satisfactorio de una parte específica, el diseñador debe aplicar un factor de seguridad a los resultados obtenidos en el análisis. También se requieren aproximaciones similares en los problemas de transferencia de calor; por ejemplo, las propiedades físicas como la conductividad térmica o la viscosidad cambia con la temperatura, pero si se seleccionan valores promedios adecuados, los cálculos se pueden simplificar de manera considerable sin introducir un error apreciable en el resultado final. Cuando se transfiere calor de un fluido a una pared, como en una caldera, se forma una incrustación después de una operación continua y se reduce a la tasa del flujo de calor. Para asegurar una operación satisfactoria durante un periodo prolongado, se debe aplicar un factor de seguridad para considerar esta contingencia.

En la transferencia de calor, al igual que en otras ramas de la ingeniería, la solución exitosa de un problema requiere que se haga suposiciones e idealizaciones. Es casi imposible describir con exactitud los fenómenos físicos y a fin de expresar un problema en forma de una ecuación que se pueda resolver, es necesario hacer aproximaciones. Por ejemplo, en los cálculos de circuitos eléctricos se suele suponer que los valores de las resistencias, capacitancias e inductancias son independientes de la corriente que fluye a

través de ellos. Esta suposición simplifica el análisis pero en ciertos casos puede limitar la precisión de los resultados.

Desde el punto de vista ingenieril, el problema clave es la determinación de la *tasa de transferencia de calor para una diferencia de temperatura especificada*. Para estimar el costo, posibilidad y tamaño del equipo necesario para traspasar una cantidad de calor especificada en un tiempo dado, se debe efectuar un análisis de transferencia de calor. Las dimensiones de calderas, calentadoras, refrigeradoras e intercambiadores de calor depende no solamente de la cantidad de calor que se debe transmitir, sino también de las tasa a la que el calor se transferirá ante las condiciones dadas. El funcionamiento exitoso de los componentes de un equipo como los álabes de una turbina o las paredes de una cámara de combustión, depende de la posibilidad de poder enfriar ciertas partes metálicas removiendo de manera continua calor de una superficie a un ritmo rápido. Un análisis de transferencia de calor también se debe realizar en el diseño de máquinas eléctricas, transformadores y cojinetes para evitar condiciones que ocasionen el sobrecalentamiento y daño del equipo.

---

**Tabla 01. Importancia y aplicaciones prácticas diversas de la transferencia de calor.**

---

*Industria química, petroquímica y de proceso:* intercambiadores de calor, reactores, recalentadores, entre otros.

*Generación y distribución de energía:* calderas, condensadores, torres de enfriamiento, calentadores de agua de alimentación, enfriamiento del transformador, enfriamiento del cable de transmisión, entre otros.

*Aviación y exploración espacial:* enfriamiento de álabes de turbina de gas, blindaje de calor de vehículos, enfriamiento de motores/tobera de cohetes, trajes espaciales, generación de energía en el espacio, entre otros.

*Máquinas eléctricas y equipo electrónico:* enfriamiento de motores, generadores, computadoras y dispositivos microelectrónicas, entre otros.

*Manufactura y procesamiento de materiales:* procesamiento de metales, tratamiento térmico, crecimiento de cristales, micromaquinado, maquinado láser, entre otros.

*Transporte:* enfriamiento de motores, radiadores automotrices, control de clima, entre otros.

*Fuego y combustión.*

*Industria naval:* sala de máquinas del barco (generadores, calderas, lastre, entre otros).

*Calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire:* acondicionadores de aires, calentadores de agua, chimeneas, enfriadores, refrigeradores, entre otros.

*Cambios climáticos y medioambientales.*

*Sistema de energía renovable:* colectores de placas planas, almacenamiento de energía térmica, paneles solares fotovoltaicos, entre otros.

---

Fuente: Kreith, 2012.

En la tabla 01 se muestra la importancia extensiva de la transferencia de calor y de sus diferentes aplicaciones prácticas. Estos ejemplos muestran que casi todas las ramas de la ingeniería enfrentan problemas de transferencia de calor, que no se pueden solucionar sólo mediante razonamiento termodinámico, sino que requiere de un análisis basado en la ciencia de la transferencia de calor.

#### 2.4. –DIMENSIONES Y UNIDADES.

Con las unidades fundamentales de metro, kilogramo, segundo y kelvin, las unidades tanto para la fuerza como para la energía o calor son unidades derivadas. Para cuantificar el calor, la tasa de transferencia de calor, flujo y temperatura, las unidades empleadas según la convención internacional se muestran en la tabla 02, donde también se dan sus contrapartes en unidades inglesas junto con sus respectivos factores de conversión, en reconocimiento del hecho de que esas unidades aún prevalece en la práctica en Estados Unidos. El Joule (Newton-metro) es la única unidad de energía en el sistema internacional y el Watt (Joule por segundo) es la unidad correspondiente de potencia. Por otra parte, en el sistema de unidades en ingeniería, la BTU (Unidad Térmica Británica, sigla en inglés) es la unidad de calor o de energía, que se define como la energía requerida para aumentar 1 °F la temperatura de 1 lb de agua a 60 °F y a una atmósfera de presión.

**Tabla 02. Dimensiones y unidades de calor y temperatura.**

Descripción	Sistema Int.	Sistema Inglés	Conversión
Cantidad de calor, Q	Joules (J)	BTU	$1 \text{ J} = 9,4787 \times 10^{-4} \text{ BTU}$
Velocidad de transferencia de calor, q	Watt (J/s)	Btu/h	$1 \text{ Watt} = 3,4123 \text{ BTU/h}$
Flujo de calor, q''	W/m <sup>2</sup>	BTU/h* ft <sup>2</sup>	$1 \text{ W/m}^2 = 0,3171 \text{ BTU/h*ft}^2$
Temperatura	K ó °C	°R ó °F	$T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F})-32]/1,8$ $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{R})/1,8$ $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$ $T[\text{R}] = T[^{\circ}\text{F}] + 459,67$

Fuente: Kreith, 2012.

La unidad de temperatura en el sistema internacional es el kelvin, pero el uso de la escala de temperatura Celsius está muy difundido y en general se considera adecuado. El Kelvin se basa en la escala termodinámica, en donde el cero en la escala Celsius (0 °C) corresponde a la temperatura de congelación del agua y es equivalente a 273,15 K en la escala termodinámica. Sin embargo, observe que las diferencias de temperatura son numéricamente equivalentes en K y °C, ya que 1 K es igual a 1°C.

En el sistema de unidades inglés, la temperatura suele expresarse en grados Fahrenheit (°F) o, en la escala termodinámica en grados Rankine (°R). Aquí, 1 K es igual a 1,8 °R y se dan los factores de conversión para otras escalas de temperatura.

## 2.5. –MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Los mecanismos de transferencia de calor son Conducción, Convección y Radiación, a continuación se describirá cada uno de ellos utilizando los conceptos, ejemplos, gráficas y ecuaciones matemáticas.

### 2.5.1. –Conducción de calor.

Es la transferencia de calor que se produce a través de un medio sólido, líquido o gaseoso, cuando existe un gradiente de temperatura. Se analiza conducción cuando las dos superficies de una pared se encuentran a diferentes temperaturas, para el caso de conducción en líquidos y gases se requiere que estos no tengan un movimiento global significativo o que se encuentren confinados.

La conducción de calor se debe en parte al fenómeno de Difusión de Calor, que no es más que la forma como el calor se distribuye por el medio, en sólidos y líquidos debido al choque de las partículas más energéticas con las menos energéticas, y debido a ese contacto se produce la transferencia de calor. En sólidos la difusión se debe a vibraciones de los enlaces metálicos lo cual se conoce como ondas reticulares.

Siempre que existe un gradiente de temperatura en un medio sólido, el calor fluirá de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La velocidad a la que el calor se transfiere por conducción,  $q_k$ , es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$  por el área ( $A$ ) a través de la que se transfiere calor:

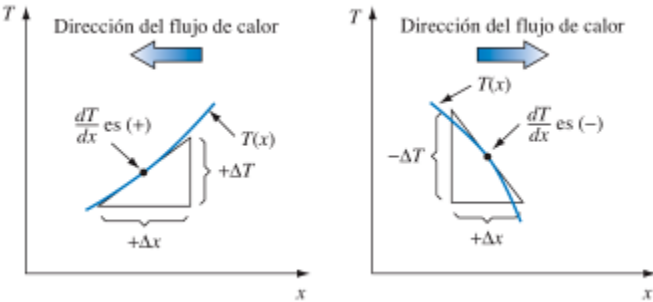
$$q_k \propto A \frac{dT}{dx}$$

En esta relación,  $T(x)$  es la temperatura local y  $x$  es la distancia en la dirección del flujo de calor. La velocidad real del flujo de calor depende de la conductividad térmica  $k$ , que es una propiedad física del medio. Entonces para la conducción a través de un medio homogéneo, la tasa de transferencia de calor es:

$q_k = -kA \frac{dT}{dx}$	(2.5.1)
---------------------------	---------

La ecuación (2.5.1) define la conductividad térmica y se denomina ley de la conducción de Fourier en honor al científico francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), que la propuso en 1822. La conductividad térmica en la ecuación (2.5.1) es una propiedad del material que indica la cantidad de calor que fluye por tiempo unitario a través de un área unitaria cuando el gradiente de temperatura es unitario. El signo menos es consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, que requiere que el flujo de calor debe fluir en dirección de una temperatura mayor a una menor. La conductividad térmica tiene unidades de watts sobre metro por kelvin (W/m K) en el sistema internacional.

En la figura 02 se muestra una figura en el que se representa el gradiente de temperatura, la misma será negativa si la temperatura disminuye al aumentar los valores de x. Por tanto, si el calor transferido en la dirección x positiva debe ser una cantidad positiva, se debe insertar un signo negativo en el lado derecho de la ecuación (2.5.1).



**Figura 02.** Convención de signos para el flujo de calor por conducción (Kreith, 2012).

En la tabla 03 contiene los órdenes de magnitud de la conductividad térmica de varios tipos de materiales.

**Tabla 03.** Conductividades térmicas de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases.

Material	Conductividad térmica a 300 K (540 °R)	
	W/m K	Btu/h ft °F
Cobre	399	231
Aluminio	237	137
Acero al carbono, 1% C	43	25
Vidrio	0.81	0.47
Plásticos	0.2–0.3	0.12–0.17
Agua	0.6	0.35
Etileno glicol	0.26	0.15
Aceite para motores	0.15	0.09
Freón (líquido)	0.07	0.04
Hidrogeno	0.18	0.10
Aire	0.026	0.02

Fuente: Kreith, 2012.



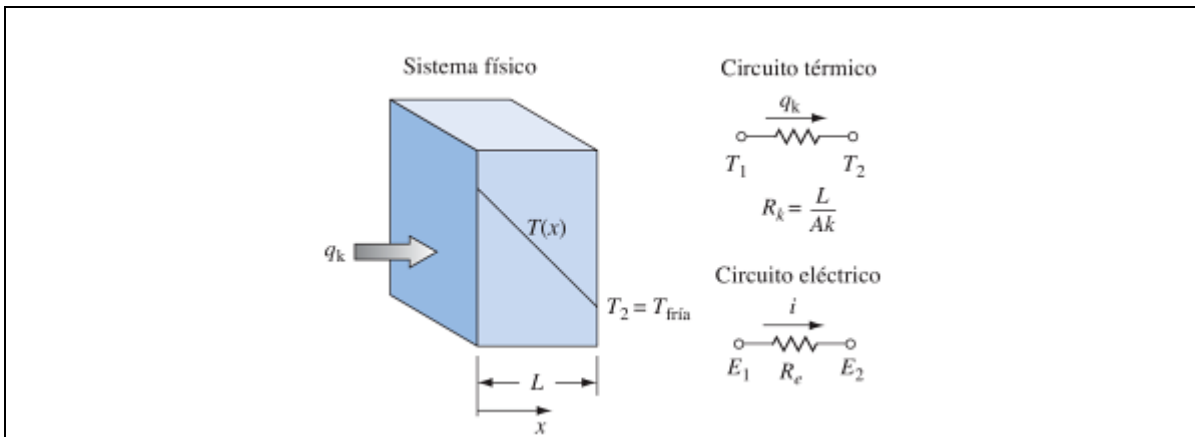
En líneas generales la conductividad térmica varía con la temperatura, en muchos problemas de ingeniería la variación es suficiente pequeña como para ignorarla.

➤ **Paredes planas.**

En el caso de flujo de calor unidimensional en régimen permanente a través de una pared plana, el gradiente de temperatura y el flujo de calor no varían con el tiempo, y el área de sección transversal a lo largo de la trayectoria del flujo de calor es uniforme. Entonces las variables en la ecuación (2.5.1) se pueden separar y la ecuación resultante es:

$$\frac{q_k}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_{caliente}}^{T_{Fría}} k dT = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$$

Los límites de integración se pueden verificar inspeccionando la figura 03 donde la temperatura en la cara izquierda ( $x=0$ ) es uniforme en  $T_{caliente}$  y la temperatura en la cara derecha ( $x=L$ ) es uniforme  $T_{Fría}$ .



**Figura 03.** Distribución de temperatura para conducción en régimen permanente a través de una pared plana y analogía entre circuitos térmico y eléctrico (Kreith, 2012).

Si  $k$  es independiente de  $T$ , después de integrar se obtiene la expresión siguiente para la tasa de conducción de calor de calor a través de la pared:

$$q_k = \frac{Ak}{L} (T_{caliente} - T_{Frío}) = \frac{\Delta T}{L/Ak} \quad (2.5.2)$$

En esta ecuación,  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura mayor ( $T_{caliente}$ ) y la temperatura menor ( $T_{Fría}$ ), el cual es el potencial propulsor que ocasiona el flujo de calor.

La cantidad  $L/Ak$  es equivalente a una resistencia térmica ( $R_k$ ), que la pared opone al flujo de calor por conducción:

$R_k = \frac{L}{Ak}$	(2.5.3)
----------------------	---------

Existe una analogía entre los sistemas de flujos de calor y los circuitos eléctricos DC. Como se muestra en la figura 03, el flujo de corriente eléctrica ( $i$ ) es igual al potencial de voltaje  $E_1 - E_2$  dividido entre la resistencia eléctrica ( $R_e$ ), en tanto que la tasa de flujo de calor ( $q_k$ ) es igual al potencial de temperatura  $T_1 - T_2$  dividido entre la resistencia térmica ( $R_k$ ). Esta analogía es una herramienta útil, en especial para visualizar situaciones más complejas, que se analizarán en temas posteriores. El recíproco de la resistencia térmica se conoce como la conductancia térmica ( $K_k$ ), definida por:

$K_k = \frac{Ak}{L}$	(2.5.4)
----------------------	---------

La relación de la ecuación (2.5.4), la conductancia térmica por área unitaria, se denomina *conductancia térmica unitaria para flujo de calor por conducción*, en tanto que la relación de la ecuación (2.5.3), se denomina *resistencia térmica unitaria*. El subíndice  $k$  indica que el mecanismo de transferencia de energía es por conducción. La conductancia térmica tiene unidades de watts por diferencia de temperatura expresada en Kelvin (W K). Los conceptos de resistencia y conductancia son útiles en el análisis de sistemas térmicos donde ocurren de manera simultánea varios modos de transferencia de calor.

Para muchos materiales, la conductividad térmica se puede aproximar como una función lineal de la temperatura sobre intervalos de temperatura limitados.

$k(T) = k_0(1 + \beta_k T)$	(2.5.5)
-----------------------------	---------

Donde  $\beta_k$  es una constante empírica y  $k_0$  es el valor de la conductividad a una temperatura de referencia. En esos casos la integración de la ecuación (2.5.1) da:

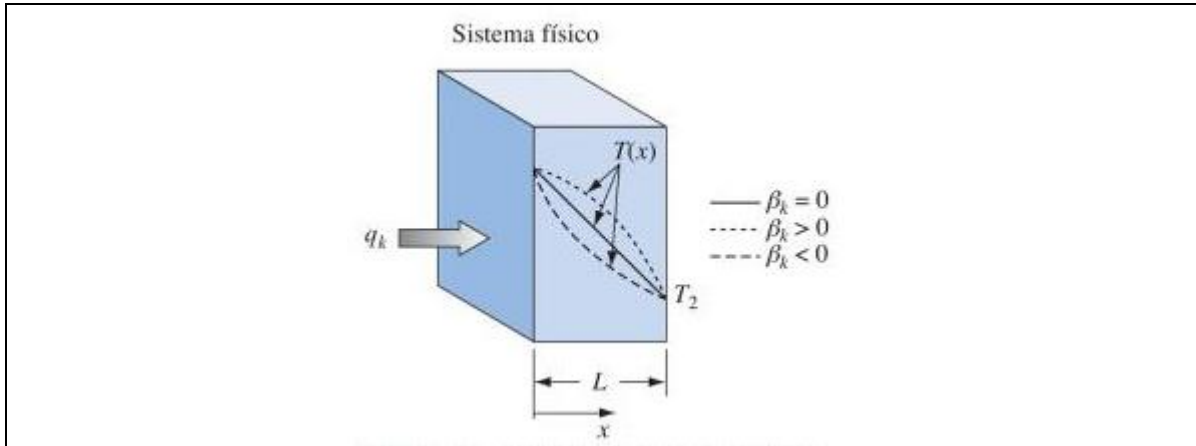
$q_k = \frac{k_0 A}{L} \left[ (T_1 - T_2) + \frac{\beta_k}{2} (T_1^2 - T_2^2) \right]$	(2.5.6)
--	---------

O

$q_k = \frac{k_{av} A}{L} (T_1 - T_2)$	(2.5.7)
--	---------

Donde  $k_{av}$  es el valor de  $k$  a la temperatura promedio  $(T_1 + T_2)/2$ .

La distribución de temperatura para una constante térmica ( $\beta_k = 0$ ) y para conductividades térmicas que aumentan ( $\beta_k > 0$ ) y disminuyen ( $\beta_k < 0$ ) con la temperatura se muestra en la figura 04.



**Figura 04.** Distribución de la temperatura por conducción a través de una pared plana con conductividad térmica constante y variable (Kreith, 2012).

**-Ejercicio propuesto.**

1.- Calcule la resistencia térmica y la tasa de transferencia de calor a través de una hoja de vidrio de ventana ( $k = 0,81 \text{ W/m K}$ ) de 1 m de altura, 0,5 m de ancho y 0,5 cm de espesor, si la temperatura de la superficie exterior es  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura de la superficie interior es de  $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

➤ **Conductividad térmica.**

De acuerdo con la ecuación (2.5.1), la conductividad térmica se define como:

$$k = \frac{q_k/A}{dT/dx}$$

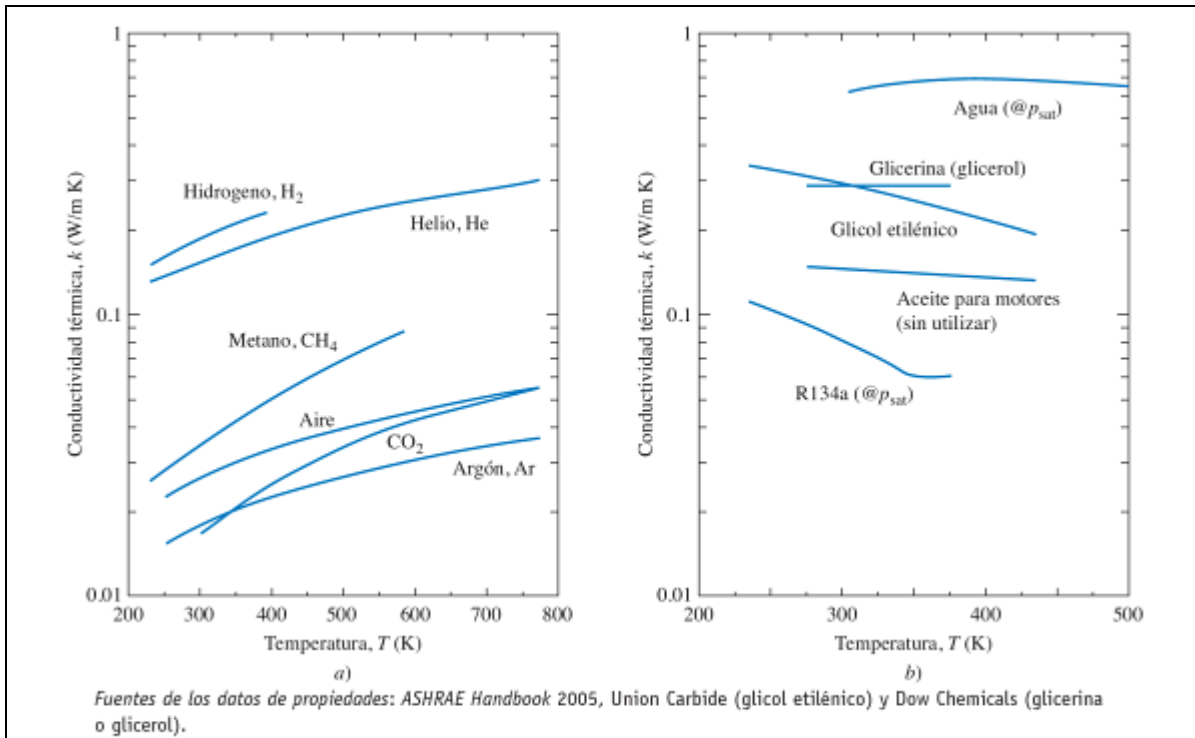
En los cálculos en ingeniería se utilizan valores de la conductividad térmica medidos de manera experimental, aunque para gases a temperaturas moderadas la teoría cinética de los gases se puede emplear para predecir los valores experimentales de manera precisa. También se han propuesto teorías para calcular las conductividades térmicas para otros materiales, pero en el caso de líquidos y sólidos, las teorías no son adecuadas para predecir la conductividad térmica con una precisión satisfactoria.

En la tabla 03 se encuentran los valores de la conductividad térmica de algunos materiales, se puede observar que los mejores conductores son los metales puros y los peores son los gases.

El mecanismo de la conducción térmica en un gas se puede explicar a un nivel molecular a partir de los conceptos básicos de la teoría cinética de los gases. La energía cinética de una molécula está relacionada con su temperatura. Las moléculas en una región a altas temperaturas tienen velocidades mayores que las que se encuentran en una región a baja temperatura. Pero las moléculas están en movimiento aleatorio continuo y conforme chocan unas con otras intercambian energía así como cantidad de movimiento. Cuando una molécula se mueve de una región a mayor temperatura a una a menor temperatura, transporta energía cinética de la parte a temperatura mayor a la parte a temperatura menor del sistema. Al chocar con otras moléculas más lentas, cede parte de esta energía y aumenta la energía de las moléculas con un contenido de energía menor. De esta manera, la energía térmica se transfiere de regiones de temperatura mayor a regiones de temperatura menor en un gas por la acción molecular.

De acuerdo con la descripción simplificada anterior, entre más rápido se muevan las moléculas, más rápido transportarán energía. En consecuencia, la propiedad de transporte que se ha denominado conductividad térmica dependerá de la temperatura del gas. Un tratamiento analítico simplificado indica que la conductividad térmica de un gas es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. A presiones moderadas el espacio entre moléculas es grande comparado con el tamaño de la molécula; por tanto, la conductividad térmica es independiente de la presión. Las curvas de la figura 05(a) muestran las conductividades térmicas de algunos gases que varían con la temperatura.

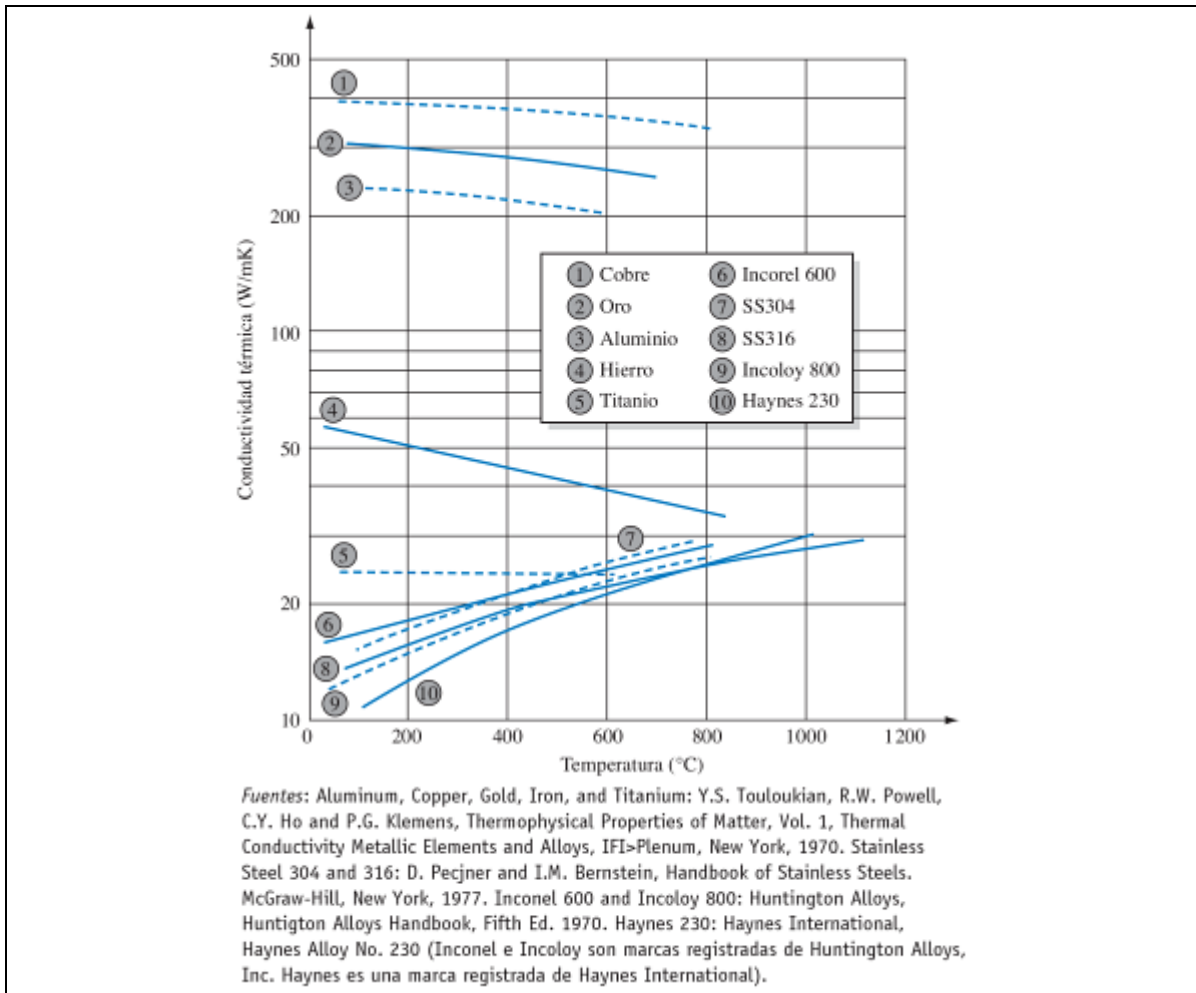
El mecanismo básico de la conducción de energía en líquidos es cualitativamente similar al de los gases. Sin embargo, las condiciones moleculares en los líquidos son más difíciles de describir y los detalles de los mecanismos de conducción en líquidos no son del todo conocidos. Las curvas de la figura 05(b) muestran la conductividad térmica de algunos líquidos no metálicos como una función de la temperatura. Para la mayoría de los líquidos, la conductividad térmica disminuye con el aumento de la temperatura, pero el agua es una excepción notable. La conductividad térmica de los líquidos es insensible a la presión, excepto cuando está cerca del punto crítico. Como regla general, la conductividad térmica de los líquidos disminuye cuando aumenta el peso molecular. Para fines ingenieriles, los valores de la conductividad térmica de los líquidos se obtienen de tablas como una función de la temperatura en estado saturado.



**Figura 05.** Variación de la conductividad térmica con la temperatura de fluidos comunes: (a) gases y (b) líquidos (Kreith, 2012).

De acuerdo con las teorías actuales, los materiales sólidos consisten en electrones libres y átomos en una disposición periódica reticular. Así pues, la energía térmica se puede conducir mediante dos mecanismos; migración de electrones y vibración reticular. Estos dos efectos son aditivos, pero en general, el transporte realizado por los electrones es más efectivo que el transporte debido a la energía vibracional en la estructura reticular. Como los electrones transportan una carga eléctrica de manera similar a la forma en la que transportan energía térmica de una región a mayor temperatura a una menor, los buenos conductores eléctricos también suelen ser buenos conductores de calor, mientras que los buenos aislantes eléctricos son conductores de calor deficientes. En sólidos no metálicos, hay poco o ningún transporte y, por tanto, la conductividad se determinan principalmente por vibración reticular. En consecuencia, estos materiales tienen una conductividad térmica menor que los metales.

En la figura 06 se muestran algunas conductividades térmicas de algunos metales y aleaciones comunes



**Figura 06.** Variación de la conductividad térmica con la temperatura para elementos y aleaciones metálicas comunes (Kreith, 2012)

Los aislantes térmicos son un grupo importante de materiales sólidos para el diseño en la transferencia de calor. Estos materiales son sólidos, pero su estructura contiene espacios de aire que son lo suficientemente pequeños para suprimir el movimiento gaseoso y así aprovechan la baja conductividad térmica de los gases para reducir la transferencia de calor. Si bien suele hablarse de una conductividad térmica para aislantes térmicos, en realidad, el transporte a través de un aislante se compone de conducción así como de radiación a través de los intersticios llenos con gas.

### 2.5.2. –Convección.

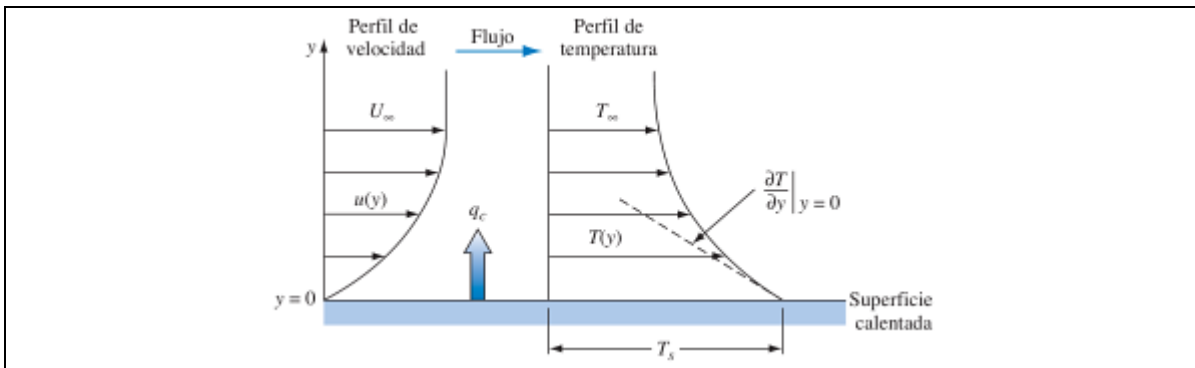
La convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento, cuando están a diferentes temperaturas. En la convección existe movimiento del fluido a nivel macroscópico mientras que en la

conducción existe movimiento a nivel microscópico, atómico o molecular, pero no a nivel macroscópico, entendiendo como nivel macroscópico movimiento de volúmenes relativamente grandes del fluido.

En la figura 07 se muestra una placa a una temperatura superficial ( $T_s$ ) y un fluido a una temperatura ( $T_\infty$ ) que fluye paralelo a la placa. Como resultados de las fuerzas viscosas la velocidad del fluido será cero en la pared y aumentará a ( $U_\infty$ ) como se muestra. Dado que el fluido no se mueve por la interfaz, el calor se transfiere en esa ubicación sólo por conducción. Si se conociera el gradiente de temperatura y la conductividad térmica en esta interfaz, se podría evaluar la tasa de transferencia de calor empleando la ecuación (2.5.1)

$q_c = -k_{\text{fluido}} A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right _{\text{en } y=0}$	(2.5.8)
--	---------

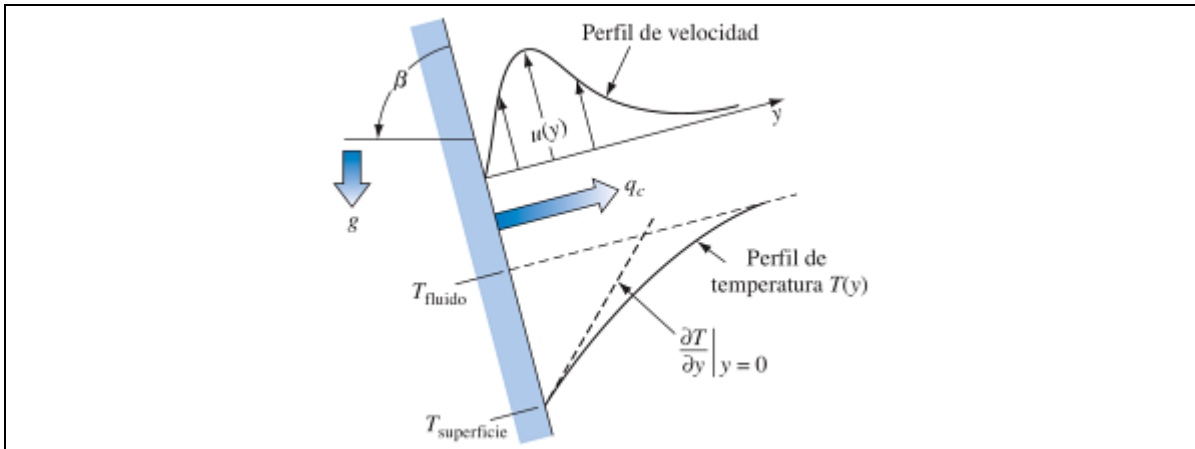
Pero el gradiente de temperatura en la interfaz depende de la tasa a la que el movimiento macroscópico así como el microscópico del fluido transporta el calor en la interfaz. En consecuencia, el gradiente de temperatura en la interfaz fluido-placa depende de la naturaleza del campo de flujo, en particular de la velocidad de corriente libre ( $U_\infty$ ).



**Figura 07.** Perfil de velocidad y temperatura para transferencia de calor por convección de una placa calentada con flujo sobre su superficie (Kreith, 2012).

La convección se clasifica en natural y forzada. En la convección natural el movimiento de del fluido es debido a causas naturales debido a que la velocidad al principio se incrementa con grandes distancias desde la superficie de transferencia de calor y posteriormente disminuye. La razón de este comportamiento se debe al efecto de flotación, el cual se manifiesta con la subida del fluido caliente y el descenso del fluido frío (diferencia de densidades), como se muestra una representación gráfica en la figura 08. En

la convección forzada el fluido se mueve a través de medios externos, como lo es un ventilador o una bomba.



**Figura 08.** Distribución de velocidad y temperatura para convección natural sobre una placa plana, calentada e inclinada a un ángulo  $\beta$  con respecto a la horizontal (Kreith, 2012)

La convección se rige por la Ley de Enfriamiento de Newton en la que se puede notar que la velocidad de transferencia de calor es proporcional al coeficiente de convección ( $h$ ) al área de superficie de contacto y a la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie.

Independientemente de los detalles del mecanismo, la tasa de transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido se puede calcular a partir de la relación

$q_c = \bar{h}_c A \Delta T$	(2.5.9)
------------------------------	---------

Donde:  $q_c$  es la tasa de transferencia de calor por convección expresado en watts (Sistema internacional) o en Btu/h (sistema inglés),  $A$  es el área de transferencia de calor expresado en  $m^2$  (sistema internacional) o en  $pie^2$  (sistema inglés),  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura superficial ( $T_s$ ) y la temperatura del fluido ( $T_\infty$ ) en una ubicación especificada expresado en Kelvin (sistema internacional) y en grado Fahrenheit (sistema inglés), y  $\bar{h}_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio sobre el área expresado en  $W/m^2K$  (sistema internacional) o en  $Btu/h\ pie^2\ ^\circ F$  (sistema inglés).

La relación expresada por la ecuación (2.5.9) la propuso originalmente el científico británico Isaac Newton en 1701. La evaluación del coeficiente de transferencia de calor por convección es difícil debido a que la convección es un fenómeno complejo. En este



punto es suficiente observar que el valor numérico de  $\bar{h}_c$  en un sistema depende de la geometría, superficie, velocidad así como de las propiedades físicas del fluido e incluso de la diferencia de temperatura  $\Delta T$ . En vista de que estas cantidades no necesariamente son constantes sobre una superficie, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede variar de un punto a otro. Por esta razón, se debe distinguir entre un coeficiente de transferencia de calor por convección local y uno promedio. El coeficiente local  $h_c$  se define mediante:

$$dq_c = h_c dA (T_s - T_\infty) \quad (2.5.10)$$

En tanto que el coeficiente promedio  $\bar{h}_c$  se puede definir en términos del valor local por:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA \quad (2.5.11)$$

En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, el interés es en los valores promedio. Los valores comunes del orden de magnitud de los coeficientes de transferencia de calor promedio que se encuentran en la práctica ingenieril se dan en la tabla 04.

**Tabla 04.** Orden de magnitud de coeficientes de transferencia de calor por convección.

Fluido	Coeficiente de transferencia de calor por convección	
	W/m <sup>2</sup> K	Btu/h ft <sup>2</sup> °F
Aire, convección libre	6-30	1-5
Vapor o aire sobrecalentado, convección forzada	30-300	5-50
Aceite, convección forzada	60-1800	10-300
Agua, convección forzada	300-18000	50-3000
Agua, en ebullición	3000-60000	500-10000
Vapor, condensándose	6000-120000	1000-20000

Fuente: Kreith, 2012.

Utilizando la ecuación (2.5.9), se puede definir la conductancia térmica para la transferencia de calor por convección  $K_c$  como:

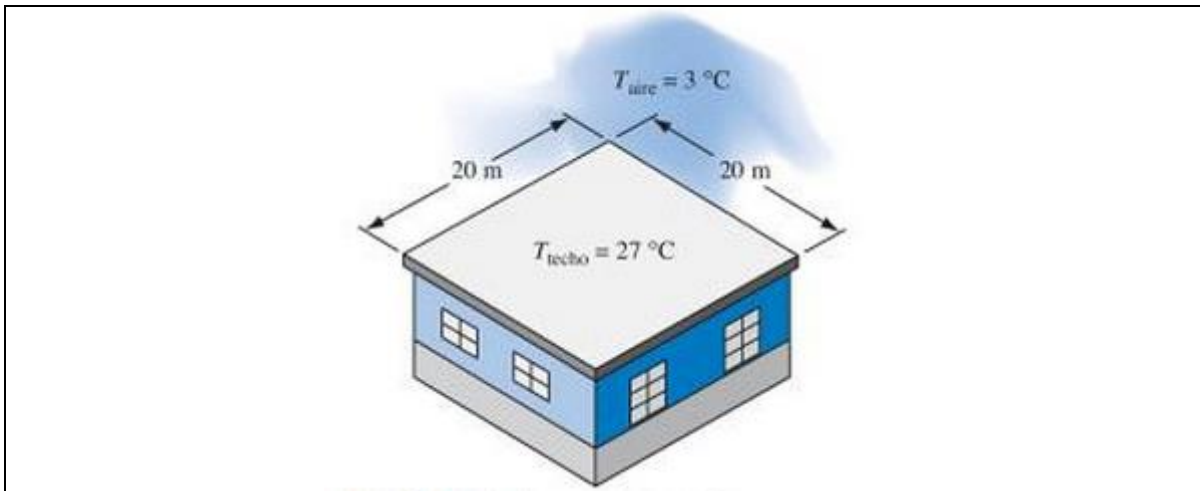
$$K_c = \bar{h}_c A \quad (2.5.12)$$

Y la resistencia térmica a la transferencia de calor por convección  $R_c$  que es igual al recíproco de la conductancia como:

$R_c = \frac{1}{h_c A}$	(2.5.13)
-------------------------	----------

**-Ejercicio propuesto.**

2.- Calcule la tasa de transferencia de calor por convección natural entre un techo de un cobertizo con un área de 20 x 20 m y el aire ambiental, si la temperatura superficial del techo es 27 °C, la del aire es -3 °C y el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio es 10 W/m<sup>2</sup> K (Consulte la figura 09)



**Figura 09.** Bosquejo del cobertizo para el análisis de la temperatura del techo (Kreith, 2012).

**2.5.3. –Radiación.**

La cantidad de energía que sale de una superficie como calor radiante depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto, al cual se le refiere como cuerpo negro, emite energía radiante de su superficie a una tasa dada por

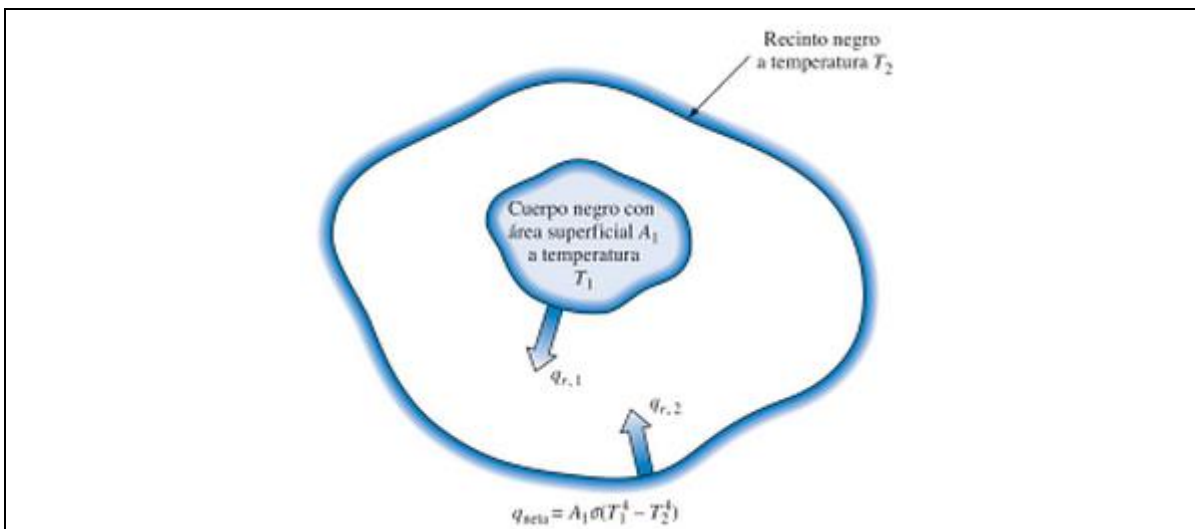
$q_r = \sigma A_1 T_1^4$	(2.5.14)
--------------------------	----------

La tasa de transferencia de calor  $q$ , estará en watt si el área superficial  $A$ , está en metros cuadrados y la temperatura superficial  $T_1$  está en Kelvin;  $\sigma$  es una constante dimensional con un valor de  $5,67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$ . En el sistema inglés, la tasa de flujo de calor estará dada en  $BTU/h$  si el área superficial está en pies cuadrados, la temperatura superficial está en grados Rankine ( $^{\circ}R$ ) y  $\sigma$  es  $0,1714 \times 10^{-8} (BTU/h ft^2 R^4)$ . La constante  $\sigma$  es la constante de Stefan – Boltzmann; nombrada así en honor de dos

científicos austriacos, J. Stefan, quien en 1875 descubrió la ecuación (2.5.14) de manera experimental y L. Boltzmann, quien en 1884 la derivó en forma teórica.

Al analizar la ecuación (2.5.14) se observa que cualquier superficie de un cuerpo negro con una temperatura mayor que el cero absoluto irradia calor a una tasa proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. En tanto que la tasa de la emisión de calor radiante es independiente de las condiciones de los alrededores, una transferencia *neta* de calor radiante requiere una diferencia de temperatura superficial de cualesquiera dos cuerpos entre los que tiene lugar el intercambio. Si el cuerpo negro irradia en un recinto (Ver figura 10) que también es negro (es decir, absorbe toda la energía radiante que incide en él) la tasa neta de transferencia de calor radiante está dada por:

$q_r = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$	(2.5.15)
------------------------------------	----------



**Figura 10.** Diagrama esquemático de la radiación entre el cuerpo 1 y el recinto 2 (Kreith, 2012).

Los cuerpos reales no cumplen con las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación a una tasa menor que los cuerpos negros. Si emiten radiación a una temperatura igual a la de un cuerpo negro (una fracción constante de emisión de un cuerpo negro en cada longitud de onda) se denominan cuerpos grises. Un cuerpo gris  $A_1$  a  $T_1$  emite radiación a una tasa de  $\epsilon_1 \sigma A_1 T_1^4$  y la tasa de transferencia de calor ente un cuerpo gris a una temperatura  $T_1$  y un recinto negro circundante a  $T_2$  es:

$q_r = A_1 \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$	(2.5.16)
---	----------

Donde  $\varepsilon_1$  es la emisividad de la superficie gris y es igual a la relación entre la emisión de la superficie gris y la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura.

Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto y si los dos cuerpos tienen una relación geométrica dada entre sí, la transferencia neta de calor por radiación entre ellos está dada por:

$q_r = A_1 f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$	(2.5.17)
--	----------

Donde  $f_{1-2}$  es un módulo adimensional que modifica la ecuación para radiadores perfectos para tomar en cuenta las emitancias y geometrías relativas de los cuerpos reales. Los métodos para calcular  $f_{1-2}$  se abordarán en los próximos capítulos.

En muchos problemas de la ingeniería, la radiación se combina con otros métodos de transferencia de calor. La solución de esos problemas a menudo se puede simplificar empleando una conductancia térmica  $K_r$ , o una resistencia térmica  $R_r$ , para la radiación. La definición de  $K_r$  es similar a la de  $K_c$ , la conductancia térmica de conducción. Si la transferencia de calor por radiación se escribe

$q_r = K_r (T_1 - T_2)$	(2.5.18)
-------------------------	----------

La conductancia por radiación, por comparación con la ecuación (2.5.11), está dada por:

$K_r = \frac{A_1 f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \text{ (W/K) (BTU/h } ^\circ\text{F)}$	(2.5.19)
--	----------

Entonces la conductancia por radiación térmica unitaria, o coeficientes de transferencia de calor por radiación,  $\bar{h}_r$  es:

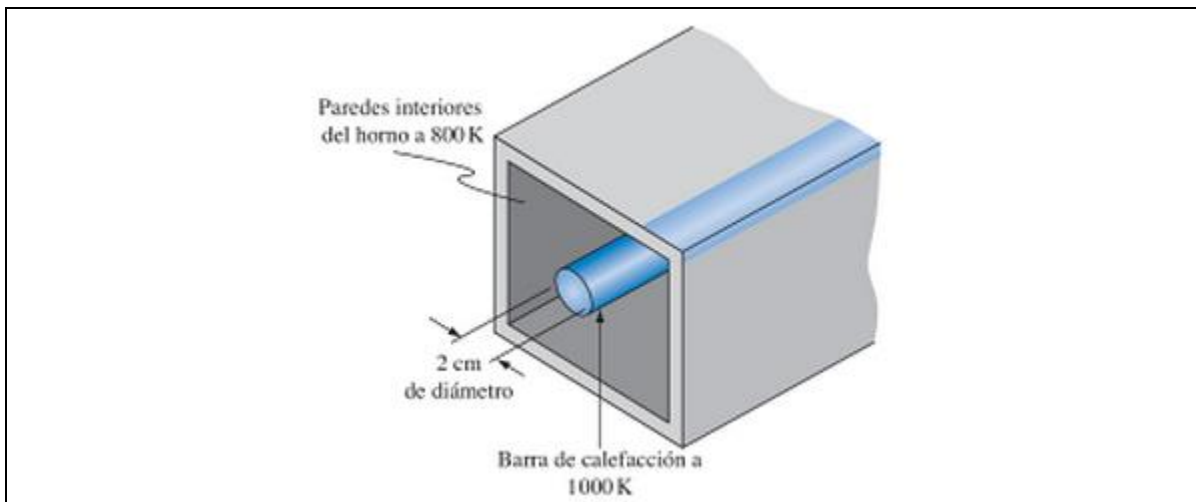
$\bar{h}_r = \frac{K_r}{A_1} = \frac{f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$	(2.5.20)
--	----------

De igual manera la resistencia térmica unitaria para la radiación es:

$R_r = \frac{T_1 - T_2}{A_1 f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)}$	(2.5.21)
--	----------

**-Ejercicio propuesto.**

3.- Una barra larga, cilíndrica, de dos centímetros de diámetro y calentada eléctricamente se instala en un horno de vacío, como se muestra en la figura 11. La superficie de la barra de calefacción tiene una emisividad de 0,9 y se mantiene a 1000 K, mientras que las paredes del horno son negras y están a 800 K. Calcule la tasa neta a la que se pierde calor de la barra por longitud unitaria y el coeficiente de transferencia de calor por radiación.



**Figura 11.** Diagrama esquemático de un horno de vacío con barra de calefacción para el ejemplo 03 (Kreith, 2012).