

2. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

2.1. INTRODUCCIÓN.

El calor es energía en tránsito, debido a diferencia de temperaturas. Transferencia de calor es el área de ingeniería que trata los mecanismos encargados de la transferencia de energía de un lugar a otro cuando existe una diferencia de temperaturas.

El área de transferencia de calor tiene un gran impacto en todos los problemas relacionados con energía, cubre un amplio espectro que varía desde la tarea rutinaria de calentamiento o enfriamiento de edificios, hasta los problemas complejos que aparecen relacionados con la generación de energía nuclear así mismo la transferencia de calor tiene amplias aplicaciones en tecnología y su alcance no está limitado a una o dos áreas aisladas.

Con la constante escasez y encarecimiento de energía, se hace aún más importante estudiar la transferencia de calor, de tal modo que se haga posible utilizar nuestras reservas energéticas con mayor eficiencia. Mediante métodos más adecuados de transporte de energía, una generación de potencia más eficiente, un mejor uso de la potencia y en lo que a nuestra área como ingeniero civil corresponde, con nuevos diseños más eficientes que minimicen las pérdidas de calor, se hará posible utilizar nuestras limitadas fuentes de energía más convenientemente.

Cotidianamente en ingeniería se encuentran un gran número de problemas de transferencia de calor. En el caso de Ingenieros Civiles y Constructores se debe ser cuidadoso para prevenir la creación de esfuerzo térmico en estructuras de concreto, ya que durante el curado (secado) de concreto se genera calor, dando por resultado expansiones diferenciales de los componentes estructurales; también en la clasificación de materiales para construcción los cuales si son hechos de un material térmico se da un gran ahorro de energía.

En el caso de control del clima en un edificio, se deben hacer balances de calor que igualen la adición de calor debida a luces, motores eléctricos, encendidos de máquinas, personas y energía solar que entra hacia las construcciones, con las pérdidas de calor a través de paredes, techos, rendijas y puertas.

Existen tres procesos o mecanismos por los cuales el calor se transporta, estos son: conducción, convección y radiación.

2.2. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

2.2.1. CONDUCCIÓN:

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. En el caso de líquidos y gases, esta transferencia es importante siempre y cuando se tomen las precauciones debidas para eliminar las corrientes naturales de flujo que pueden presentarse como consecuencia de las diferencias en densidad que experimentan éstos. De ahí que la transferencia de calor por conducción sea de particular importancia en sólidos sujetos a una diferencia de temperaturas.

Los primeros adelantos acerca de la conducción de calor se deben en gran parte a los esfuerzos del matemático francés Fourier (1822), que propuso la ley que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier o segunda ley de la termodinámica (Fig. 2.1) y su expresión define la conductividad térmica k . Aun cuando ésta varía con la temperatura, en muchas aplicaciones puede suponerse como constante. Dicha ley predice como se conduce el calor a través de un medio, partiendo de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura.

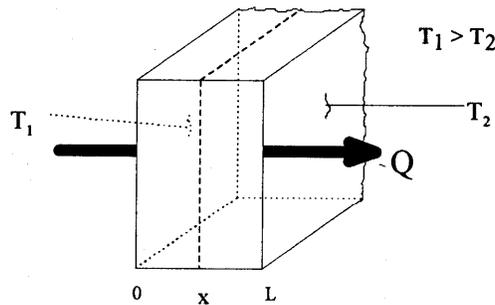


Fig. 2.1. Ley de Fourier.

Donde:

x : Espesor

ΔT = Diferencial de temperatura.

k : Conductividad térmica (constante de proporcionalidad).

Q: Ganancias por conducción.

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta T}{x} \therefore Qc = -kA \frac{\Delta T}{x} \text{ Ley de Fourier}$$

En estas circunstancias se dice que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura. Es decir,

$$Q \propto \frac{A(T_{int} - T_{ext})}{L} \quad \text{o bien} \quad Q = kA \frac{(T_{int} - T_{ext})}{L} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Q = Razón de flujo de calor, BTU/h o W

A = Área de la pared normal al flujo de calor, pies² o m²

T_{int} = Temperatura de la superficie interior de la pared, °F o °C

T_{ext} = Temperatura de la superficie exterior de la pared, °F o °C

ΔT = Diferencias de espesores, m.

K = Conductividad térmica del material de la pared, $\frac{Btu}{h - pie \cdot ^\circ F}$ o $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$$\frac{1Btu}{h - pie \cdot ^\circ F} = \frac{1Btu}{hr - ft \cdot ^\circ R}, \quad \text{y} \quad \frac{1W}{m \cdot ^\circ C} = \frac{1W}{m \cdot ^\circ K}$$

Cabe aclarar que la conductividad térmica y la conductividad eléctrica de los metales puros están relacionadas entre sí. Sin embargo, a temperaturas muy bajas los metales se hacen superconductores de la electricidad, pero no de calor.

Así pues mediante la ecuación 2.2 se puede determinar la transferencia de calor por conducción en un sistema, siempre y cuando la conductividad térmica y el gradiente de temperatura sean conocidos. En otras circunstancias, por ejemplo cuando el flujo de calor sea constante, puede determinarse mediante una integración directa de la Ley de Fourier de Conducción. En una sección posterior se profundiza en el concepto de conductividad térmica.

2.2.1.1. ANALOGÍA ENTRE CONDUCCIÓN DE CALOR Y CONDUCCIÓN ELÉCTRICA.

Si un resistor eléctrico que tiene un valor de resistencia constante, R , tiene una diferencia de voltaje, V , que se imprime a través de él, sabemos por experiencia que fluirá una corriente eléctrica, I , a través del resistor. La magnitud de la corriente varía linealmente con la magnitud de la diferencia de voltaje impresa por el resistor.

Por la Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R_{eléctrica}} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Una situación análoga se encuentra en el flujo de calor a través de una pared. La diferencia de temperatura a través de la pared representa la diferencia de potencial, Q representa el flujo de corriente, y (L/kA) representa la resistencia térmica al flujo de calor por conducción cuando el estado es estable.

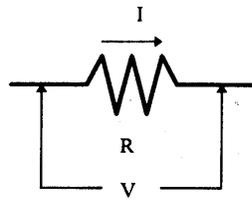
$$Q = \frac{kA(T_{int} - T_{ext})}{L} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Analogía

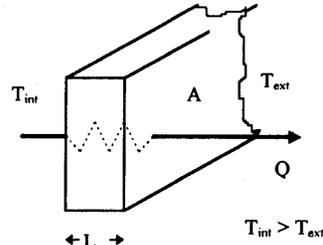
$$I = \frac{V}{R_{eléctrica}} \Rightarrow Q = \frac{\Delta T}{R_{térmica}} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

es decir

$$R = \frac{L}{kA} \quad \text{Ec. (2.6)}$$



Sistema eléctrico.



Sistema de conducción de calor.

Fig. 2.2. Análogos eléctrico y térmico

Para el caso de paredes compuestas tenemos la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Analogía entre el flujo de calor y flujo eléctrico.

CASO	ELECTRICO	TERMICO
En serie	$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_i$	$R_{tot} = \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \dots + \frac{L_i}{k_i A_i}$
En paralelo	$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i}$	$R_{tot} = \frac{1}{\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \dots + \frac{L_i}{k_i A_i}}$

En general, escribimos

$$Q = \frac{\Delta T_{sobreeltotal}}{\Sigma R_i} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Con la normalización de la construcción en cuanto al comportamiento térmico es muy útil conocer la resistencia térmica ya que los parámetros de cálculo se darán en base a este factor. Por lo tanto para conocer la resistencia térmica de cualquier material será necesario primero conocer la conductividad térmica del mismo, ya que sus demás variables como el espesor y su área son fácilmente de obtener.

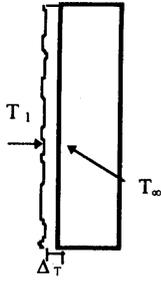
2.2.2. CONVECCIÓN:

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con su movimiento. Considérese como vía de explicación una placa cuya superficie se mantiene a una temperatura T_2 (Fig. 2.3), la cual disipa el calor hacia un fluido cuya temperatura es T_1 . La experiencia indica que el sistema disipa más calor cuando se le deja pasar aire proveniente de un ventilador que cuando se encuentra expuesto al aire ambiental simplemente, deduciéndose que la velocidad del fluido tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor a lo largo de la superficie. De manera análoga, la experiencia indica que el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua o aceite en vez de aire. De ahí que las propiedades del fluido tengan un efecto importante sobre la transferencia de calor.

En ese sentido, puesto que la velocidad relativa del fluido con respecto a la placa es general igual a cero en la interfaces sólido-fluido ($y=0$)*, el calor se transfiere por conducción solamente en este plano. Sin embargo, aun cuando el calor disipado por la placa puede obtenerse mediante la ecuación 2.2, el gradiente de temperatura en el fluido depende de las características, a menudo complejas, del fluido de éste. Por consiguiente, es más conveniente calcular el flujo de calor disipado por el sistema en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie de éste y el flujo. Es decir,

$$Q = hA(T_\infty - T_s) = hA\Delta T \quad \text{Ec. (2.8)}$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor, o coeficiente de película. Sus unidades en el sistema Internacional de Unidades son W/m^2K (Watts por metro cuadrado grado Kelvin). A esta segunda ecuación (2.8) se le conoce como la Ley de enfriamiento de Newton (Fig. 2.3). Debe señalarse que esta expresión, más que una ley fenomenológica, define el coeficiente de transferencia de calor h .



A mayor velocidad del aire
más delgada la película.

- Por lo tanto disminuye la resistencia del aire.
- Aumenta la transferencia de calor.

$$Q = h A \Delta T$$

h = COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

h_o = EXTERIOR

h_i = INTERIOR.

Fig. 2.3. Ley de enfriamiento de Newton.

El fenómeno de transferencia de calor por convección se clasifica como convección forzada y convección libre o natural. En el primer caso, el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo, por ejemplo un ventilador, una bomba o agentes meteorológicos. Por otra parte, el movimiento del fluido resulta en el segundo caso como una consecuencia de los gradientes en densidad que éste experimenta, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (o centrífugo). Un ejemplo típico de convección forzada sería el radiador en el sistema de enfriamiento de un motor de automóvil. De igual manera, un típico ejemplo de convección libre sería el calentamiento de agua en un recipiente antes de sufrir ebullición o el enfriamiento de equipo eléctrico (transformadores, transistores).

De lo anterior se desprende que, aún cuando en apariencia la ecuación 2.8 es muy sencilla, el proceso de transferencia de calor por convección es muy complejo, haciendo que el coeficiente h dependa de muchos factores. Entre otros, de la geometría del sistema, además de las propiedades físicas y características de flujo del fluido.

2.2.3. RADIACIÓN.

Tanto los mecanismos de transferencia de calor por conducción como convección requieren un medio para la propagación de la energía. Sin embargo, el calor puede también propagarse aun en el vacío absoluto mediante radiación. Puede decirse que a una temperatura dada, todos los cuerpos emiten radiación en forma de energía electromagnética en diferentes longitudes de onda, siendo la radiación dependiente de la temperatura absoluta del cuerpo y de sus características superficiales. Sin embargo, solo aquella fracción que se encuentra en el rango de longitudes de onda de 0.1 a 100 micrones, aproximadamente, se considera como radiación térmica. Dentro de este intervalo del espectro electromagnético se localiza el rango ultravioleta, el visible y el infrarrojo.

Un radiador perfecto o cuerpo negro es aquel que emite energía radiante de su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. Es decir:

$$Q = \sigma(T)^4 \quad \text{Ec. (2.9)}$$

donde σ es una constante que adquiere un valor igual a $5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ en el sistema Internacional de Unidades y se conoce como la constante de Stefan Boltzmann. De la cual se deduce que la superficie de todo cuerpo negro emite radiación, si es que se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto, independientemente de las condiciones ambientales.

Pero un cuerpo real no satisface las características de un cuerpo negro, dado que emite una menor cantidad de radiación que éste. Designándoseles como cuerpo gris.

Es decir,

$$Q = \varepsilon\sigma(T^4) \text{ Ley de Stefan Boltzmann} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

donde:

ε : emitancia de la superficie gris y es numéricamente igual al cociente de la emisión de radiación de un cuerpo gris, con respecto a la de uno negro. Emisividad del cuerpo que desprende la radiación.

Q : energía radial.

σ : constante de Stefan Boltzmann = $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$.

T : temperatura absoluta en °K.

* El cuerpo negro perfecto absorbe y emite el 100% de la radiación.

2.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

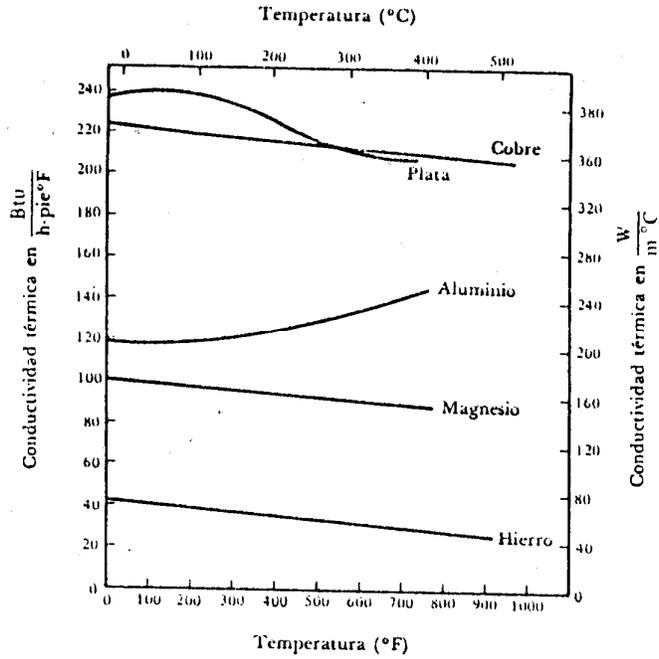
2.3.1. LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES.

Propiedades térmicas de los materiales. El uso de la Ley de Fourier necesita el conocimiento de la conductividad térmica. lo anterior es referido como una propiedad de transporte, provee una indicación de la velocidad a la cual la energía es transferida por el proceso de difusión. Esto depende de la estructura física del material, tanto atómica como molecular que está relacionada al estado del material. En esta sección se consideran diversos materiales, identificando importantes aspectos de su comportamiento y presentando valores típicos de esta propiedad.

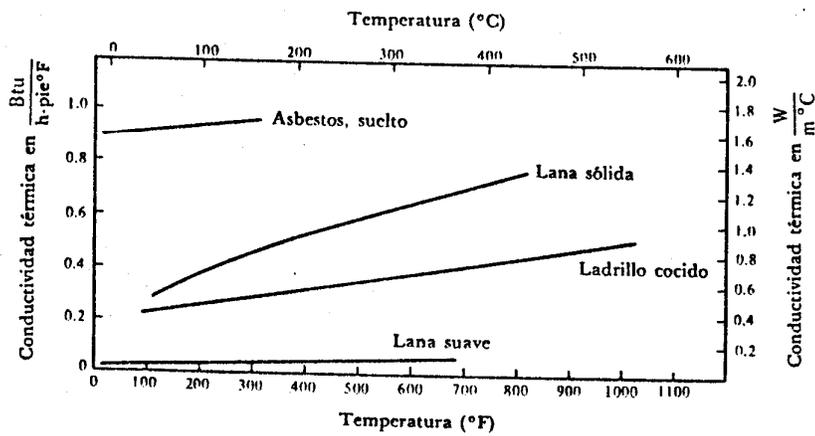
La constante de proporcionalidad k es una propiedad de transporte obtenida de la Ley de Fourier:

$$k \equiv -q_x / (\partial T / \partial x)$$

Por consiguiente, para un gradiente de temperatura prescrito, la conducción de flujo de calor incrementa con el incremento de conductividad térmica. Los mecanismos físicos asociados con la conducción en general son los siguientes, la conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, la cual a su vez, es mayor que la de un gas. Como se ilustra en la (Graf. 2.1), la conductividad térmica de un sólido puede ser más de cuatro veces de mayor magnitud que la de un gas. Esta tendencia está dada principalmente por las diferencias en espacios intermoleculares para los dos estados.



Gráfica 2.1. Conductividad térmica de los metales



Gráfica 2.2. Conductividad térmica de materiales aislantes.

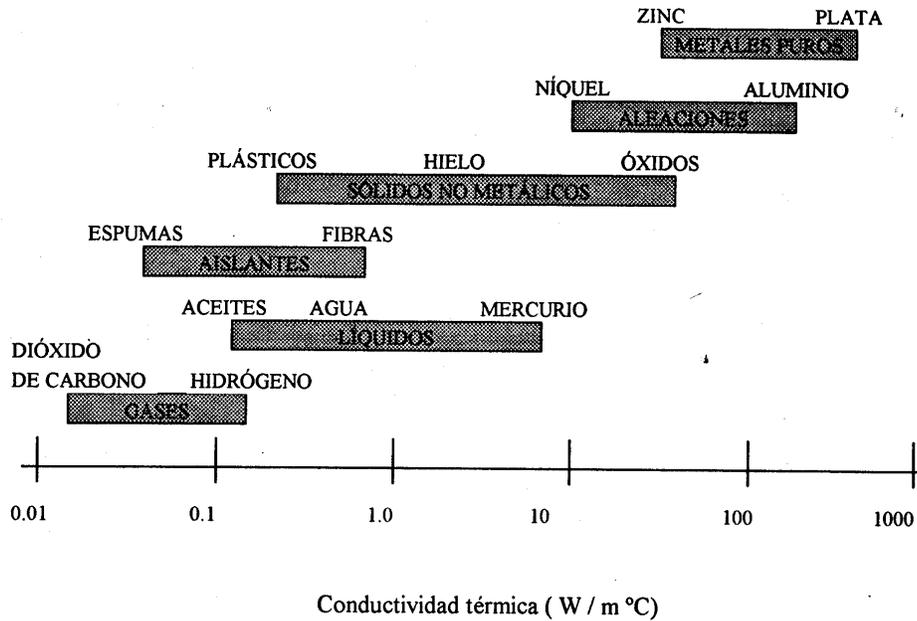


Fig. 2.4. Rango de conductividad térmica para varios estados de la materia a temperaturas y presiones normales.

La conductividad térmica de los materiales puede definirse mediante la ecuación de Fourier para la transferencia de calor por conducción vista anteriormente:

$$q \propto A \frac{dT}{dx} \quad \text{EC. (2.11)}$$

Esta proporción se convierte en ecuación cuando se multiplica por K, que es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica, y cuyo valor numérico depende de la sustancia que se estudia.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Una sustancia que tiene gran conductividad térmica es un buen conductor de calor, en cambio un material con pequeña conductividad térmica es un mal conductor del calor, también conocido como Aislante Térmico. No existe ninguna sustancia que sea un conductor perfecto ($k=\infty$) o un aislador perfecto ($k=0$).

El estado sólido. En la visión moderna de materiales, un sólido puede estar compuesto de electrones libres y de átomos en una disposición llamada red. Por consiguiente, el transporte de energía térmica está dado por dos efectos: la migración de electrones libres y las ondas vibratorias de la red. Estos efectos se complementan, tal que la conductividad térmica k es la suma del componente electrónico k_e y la componente de red k_l

$$k = k_e + k_l$$

Para una primera aproximación, k_e es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica Y_e . Para metales puros, los cuales son de baja Y_e , esto no es por lo tanto sorprendente que k_e sea mucho mayor que k_l . En contraste, para aquellos, los cuales son substancialmente de mayor Y_e , la contribución de k_l para k no es insignificante. Para sólidos no metálicos, k está determinada básicamente por k_l , la cual depende de la frecuencia de interacciones entre los átomos de la red. La regularidad del arreglo de red será un importante efecto sobre k_l con materiales cristalinos (transparentes) como cuarzo, teniendo una alta conductividad térmica que materiales amorfos como el vidrio. En realidad para cristalinos, sólidos no metálicos tales como el diamante y el óxido de berilio, k_l puede ser demasiado grande, excediendo valores de k asociados con buenos conductores, tal como el aluminio.

El valor de k depende de la temperatura para sólidos metálicos y no metálicos. La dependencia de k con la temperatura se muestra en la Figura. 2.4 para sólidos representativos.

Sistemas aislantes. Los sistemas de aislantes térmicos combinan materiales de baja conductividad térmica para lograr en conjunto un bajo nivel en el valor de conductividad térmica. En aislante del tipo de fibras, polvos y escamas, el material sólido está finamente dispersado alrededor del espacio de aire. Tales sistemas son caracterizados por una conductividad térmica equivalente, la cual depende de la conductividad térmica y de las propiedades radiactivas de las superficies del material sólido, además de la naturaleza y fracción volumétrica del aire o espacio. Un parámetro especial del sistema es su densidad de volumen (masa sólida entre volumen total), la cual depende fuertemente de la manera en la cual el material sólido está interconectado.

Si los pequeños vacíos o espacios huecos son formados por lazos o porciones fundidas del material sólido, una sólida matriz es creada. Cuando esos espacios son sellados y no se comunican entre si, el sistema es llamado aislante celular. Ejemplos de este tipo de aislantes rígidos son los sistemas de espumas particularmente aquellos hechos de materiales plásticos y vidrio. Los

aislamiento reflectivos están compuestos de multicapas paralelas, hoja delgada o láminas finas de metal de alta reflectividad, los cuales están espaciados para reflejar calor radiante de regreso a su origen. El espaciamiento entre las láminas finas de metal está diseñado para restringir el movimiento de aire, y en aislamiento de alto rendimiento, el espacio plano evacuado. En todos los tipos de aislantes, la evacuación del aire en el espacio vacío reducirá la efectividad de la conductividad térmica del sistema.

Esto es importante para reconocer que la transferencia de calor a través de cualquiera de estos sistemas de aislamiento deben incluir varios modos: conducción a través del material sólido, conducción o convección a través del aire en los espacios vacíos, y si la temperatura es suficientemente alta, los intercambios de radiación entre las superficies de la matriz sólida.

El estado líquido. Desde que el espaciamiento intermolecular es mucho mayor y el movimiento de las moléculas es mucho más aleatorio por el estado líquido que por el estado sólido, el transporte de energía térmica es más efectiva. La conductividad térmica de los gases y líquidos es por lo general más pequeña que la de los sólidos.

El efecto de temperatura, presión y la composición química sobre la conductividad térmica de un gas tal vez se explique en términos de la teoría cinética de los gases. De esta teoría es conocida que la conductividad térmica es directamente proporcional al número de partículas por unidad de volumen n , la velocidad media molecular \bar{c} , y la dirección media libre O , la cual es la trayectoria libre media de molécula antes de chocar. Por lo tanto

$$k \propto n \bar{c} O$$

A causa de que se incrementa \bar{c} con el incremento de la temperatura y decrece la masa molecular, la conductividad térmica de un gas se incrementa con el incremento de la temperatura y decrece el peso molecular. De cualquier forma, porque n y O son directa e indirectamente proporcional a la presión del gas respectivamente, la conductividad térmica es independiente de la presión.

Las condiciones moleculares asociadas con el estado de los líquidos son más difíciles de describir y los mecanismos físicos para explicar la conductividad térmica no son bien entendidos. La conductividad térmica de líquidos no metálicos, generalmente decrece con el incremento de temperatura, las notables excepciones existen con la glicerina y el agua. Esta propiedad es

insensible a la presión excepto cerca del punto crítico. Si además, generalmente se deduce que la conductividad térmica decrece con el incremento del peso molecular. Los valores de la conductividad térmica están generalmente tabulados como una función de temperatura por el estado saturado de los líquidos.

Los metales líquidos son comúnmente usados en aplicaciones de flujo de alta temperatura, tal como ocurre en las plantas de energía nuclear. Note que los valores de la conductividad térmica de los líquidos metálicos son mucho más grande que los de los líquidos no metálicos [3].

Las unidades estándares empleadas para la conductividad térmica son las del Sistema Internacional que son $\text{watts/m}^{\circ}\text{C}$ ó $\text{watts/m}^{\circ}\text{K}$ y las del Sistema Inglés que son $\text{BTU in/h ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$. En esta investigación utilizaremos las unidades del Sistema Internacional ($\text{watts/m}^{\circ}\text{C}$), ya que son las unidades mas utilizadas en nuestra región y en los aparatos de medición que utilizamos para realizar el experimento.

En el apéndice A se proporcionan tablas de factores de conversión para la conductividad térmica para facilitar al lector el utilizar las unidades deseadas.

Tabla 2.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS MATERIALES [11].

DESCRIPCIÓN	DENSIDAD (Kg./m ³)	CONDUCTIVIDAD k (W/m ² °C)
1. Materiales aislantes.		
Asbesto pulverizado	130	0.046
Corcho, placas	145	0.042
Fibra de vidrio	80	0.035
Fibra de madera	600	0.110
Hule espuma	20	0.036
Lana mineral	180	0.042
Perlita	65	0.042
Poliestireno, placa	15	0.037
Poliuretano, placa rígida	30	0.020
Poliuretano, espuma	30	0.026
Vermiculita	100	0.065
2. Materiales para construcción.		
Asbesto-cemento, placa	1360	0.25
Asfalto	1600	0.43
Concreto	2300	1.80
Concreto ligero	1400	0.40
Mortero cemento-arena	2000	0.63

Mortero con vermiculita	500	0.18
Mortero con arcilla expandida	750	0.25
Tabique	2200	1.30
Tabique	1500	0.65
Ladrillo común	1920	0.72
Tabla roca (yeso-cartón)	950	0.16
Vermiculita, aplanado	640	0.20
Yeso, aplanado	1280	0.46
Encalado	1800	0.81
Cartón asfáltico	1100	0.14
Linóleo	1200	0.19
Cloruro de polivinilo	25	0.04
Plexiglás	1200	0.20
Vidrio sencillo	2200	0.93
Vidrio sencillo	2700	1.16
3. Metales.		
Acero	7830	58.0
Acero inoxidable	7800	46.5
Aluminio	2675	220.0
Hierro galvanizado	1500	46.5
Plomo		34.0
Zinc	6860	110.0
Cobre	8933	401.0
Plata	10500	429.0
Oro	19300	317.0
4. Piedras.		
Arenisca	2000	1.30
Caliza	2180	1.40
Granizo	2600	2.50
Mármol	2500	2.00
Pizarra	2700	2.00
5. Madera.		
Madera blanda	610	0.13
Madera dura	700	0.15
Triplay	530	0.14
Viruta prensada	400	0.16
6. Otros.		
Aire en reposo a 10°C	1.25	0.026
Agua	1.00	0.580

2.3.2. DESARROLLO MATEMÁTICO DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS EN LA LEY DE FOURIER PARA PAREDES PLANAS POR EL MÉTODO DE ESTADO ESTABLE UNIDIMENSIONAL.

La Ley de Fourier establece que

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

puesto que A y k son constantes, encontramos que la integración sobre todo el dominio de valores de x y T nos da:

$$\frac{Q}{A} dx = -k(dT) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

$$\frac{Q}{A} \int_{x_1}^{x_2} dx = -k \int_{T_1}^{T_2} dT \quad \text{Ec. (2.15)}$$

$$\frac{Q}{A} (x_2 - x_1) = -k(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. (2.16)}$$

si cambiamos de signo el lado derecho de la ecuación

$$\frac{Q}{A} (x_2 - x_1) = k(T_1 - T_2) \quad \text{Ec. (2.17)}$$

si sustituimos $(x_2 - x_1)$ que es el espesor del cuerpo por L y $(T_1 - T_2)$ por ΔT que es la diferencia de temperatura tenemos

$$\frac{Q}{A} L = k(\Delta T) \quad \text{Ec. (2.18)}$$

y regresando las incógnitas hacia el lado derecho de la ecuación tenemos como ecuación final

$$Q = kA \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

En el caso de nuestra investigación la incógnita es la conductividad térmica, por lo que es necesario despejarla de la ecuación anterior

$$k = \frac{Q L}{A \Delta T} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Con esta ecuación tenemos las unidades:

$$k = \frac{(\text{watts})(m)}{(m^2)(^{\circ}C)}$$

eliminando las unidades de metros tenemos finalmente las unidades para la ecuación de Fourier en el sistema métrico decimal:

$$k = \frac{(\text{watts})}{(m)(^{\circ}C)}$$

dado que Q se obtiene mediante las lecturas de el voltaje y el amperaje que recibe la resistencia como una constante en wats, el espesor (L) y el área (A) del espécimen son medidos en m. y m² respectivamente mediante un promedio de varias medidas sobre el mismo espécimen y la diferencia de temperatura es obtenida por las temperaturas censadas por los termopares mediante el sistema Campbell y dada en °C, por lo tanto la k esta en w/m°C. En seguida se hace un análisis de unidades para esta ecuación.