

# Transmisión del Calor

El calor se transfiere básicamente por tres procesos distintos; *conducción*, *convección* y *radiación*. En la naturaleza, todos los mecanismos de transmisión intervienen simultáneamente con distintos grados de importancia. Desde luego, diseñando los experimentos adecuadamente, es posible lograr que sólo uno de ellos sea el dominante.

**Conducción.** Cuando se coloca una cucharita en una taza de café caliente, notamos que a través de la cucharita pronto el extremo frío se calienta. Esta observación demuestra que el calor se conduce a través de la cucharita. La propagación del calor a través de la conducción se caracteriza por:

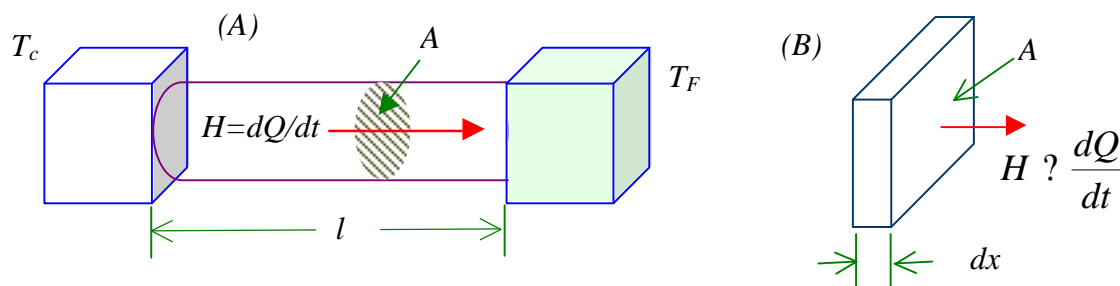
- ☒ Existe un *medio material* a través del cual se propaga el calor
- ☒ Se transmite el calor *sin transporte de materia*.

La conducción del calor en muchos materiales puede visualizarse como resultado de los choques moleculares, como en el caso de líquidos y gases, o movimiento de electrones o vibraciones de la red cristalina, como el caso de los sólidos. Al chocar las moléculas calientes (más rápidas) con sus vecinas frías, más lentas, les transfieren algo de su energía, y la velocidad de las vecinas aumenta también. Así, la energía asociada al movimiento térmico se propaga (conducción). Lo mismo puede decirse para los sólidos respecto del movimiento de los electrones o las vibraciones de la red cristalina (movimiento de fonones).

Como consecuencia del segundo principio de la termodinámica, calor siempre se propaga de la zona calientes a las zonas fría. Experimentalmente se observo que el flujo de calor,  $dQ/dt$ , es decir el calor que fluye por una barra de material de área transversal  $A$  en la unidad de tiempo, es proporcional a la diferencia de temperatura de sus extremos ( $T_C - T_F$ ), a el área transversal  $A$  e inversamente proporcional a la longitud  $l$  de la barra, es decir:

$$H = \frac{dQ}{dt} = k A \frac{T_C - T_F}{l} \quad (1)$$

donde  $k$  una constante de proporcionalidad, llamada conductividad térmica y característica del material (Ver Fig. 1). En general el subíndice  $F$  lo usaremos para designar el extremo frío y  $C$  para designar el extremo Caliente, lógicamente  $T_C > T_F$ .



**Figura 1.** (A) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, asilada por los lados laterales, de longitud  $l$  con un extremo caliente ( $T_C$ ) y el otro frío ( $T_F$ ). (B) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal  $dx$ .

El cociente  $(T_c - T_F)/l$  se denomina el gradiente térmico de la barra. En general el gradiente térmico en cada punto de la barra se define por  $dT/dx$ . El signo menos en (1) indica que el flujo siempre va de la fuente caliente a la fría, es decir opuesta el signo del gradiente térmico. Implícitamente suponemos que no hay pérdidas de calor en la barra por los lados laterales de la misma por otros mecanismos. Esta expresión también puede escribirse como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = - \frac{k A}{l} (T_C - T_F) = - \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Con siendo  $r_{ter}$  la *resistencia térmica* de la muestra, magnitud análoga a la resistencia eléctrica.

$$r_{ter} = \frac{l}{k A} \quad (3)$$

La ecuación (2) también es útil escribirla en forma diferencial, (Fig. 1.B) para un elemento de barra infinitesimal de longitud  $dx$  como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = - k A \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Los metales en general son buenos conductores del calor (en general los buenos conductores eléctricos son también buenos conductores térmicos, aunque existen notables y útiles excepciones como el acero inoxidable, la mica y el diamante). Para los metales, (que son buenos conductores eléctricos) existe una relación entre la conductividad eléctrica  $\sigma$  y la conductividad térmica  $k$  dada por la Ley de Widemann-Frank:

$$k \approx \frac{1}{3} \frac{k_B}{e} v_{dr}^2 \tau = L T \approx 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2} \quad (5)$$

$k_B$  es la constante de Boltzmann y  $e$  la carga del electrón. El valor de este producto, en el sistema SI vale dentro de 20% para los metales más comunes, pero no para semiconductores, grafito, diamante o aisladores .

La madera el plástico, el vidrio, el aire, tiene coeficientes de conducción térmica pequeños (son malos conductores del calor). Esto explica porque los pisos de madera o alfombra son más “cálidos” para caminar descalzos que unos de mosaico, este último es mejor conductor térmico que la alfombra o la madera.

Si tenemos dos medio, separando zonas que están a temperaturas  $T_1$  y  $T_2 (> T_2)$ , en serie como se ilustra en la figura 2.a, tenemos que por conservación de energía el flujo a través de la medio 1 , en el equilibrio, debe de ser igual al flujo a través del medio 2.

Sustancia	Conductividad térmica $k$	
	[Kcal/s.m.°C] $\times 10^4$	[W/m.k]
Plata	1000	420
Cobre	920	380
Aluminio	500	200
Acero	110	40
Vidrio (común)	2.0	0.84
Pared o Concreto	2.0	0.84
Agua	1.4	0.56
Asbesto	0.4	0.16
Madera	0.2-0.4	0.08-0.16
Aire	0.0055	0.023

**Tabla 1** – Conductividades térmicas

Si llamamos  $T_m$  la temperatura de la interfaces 1y 2. tenemos:

$$H_1 = H = k_1 A \frac{(T_2 - T_m)}{d_1} \quad \text{y} \quad H_2 = H = k_2 A \frac{(T_m - T_1)}{d_2} \quad (6)$$

despejando  $H$  y  $T_m$  de estas dos ecuaciones, obtenemos:

$$H = \frac{(T_2 - T_1)}{R_{12}} \quad (7)$$

con

$$R_{12} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (8)$$

Por un razonamiento similar, para el caso de dos medio en paralelo como en la Fig.2 b, tenemos que  $H=H_1+H_2$ , de donde obtenemos que:

$$H = \frac{(T_2 - T_1)}{R_{12}} \quad (9)$$

con

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (10)$$

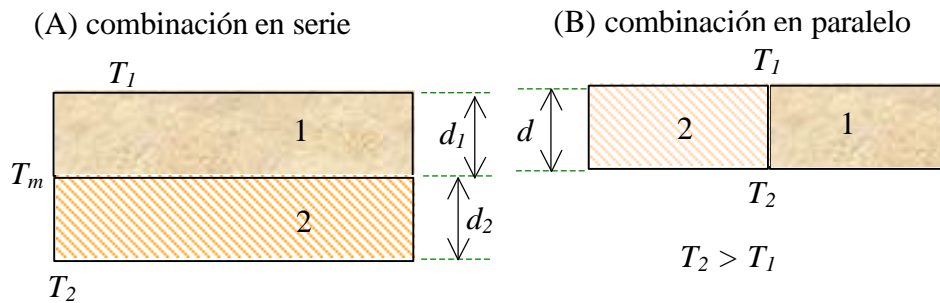
Este modo de combinar resistencia térmicas es similar a como se combinan las resistencias en serie y paralelo. De hecho todas las técnicas que se usan para el caso eléctrico pueden ser usadas para el caso térmico. Claramente, estas expresiones pueden generalizarse para combinaciones más complejas de medios en serie y paralelo.

En los edificios y casas, una de las mayores fuentes de pérdida de calor son la aberturas y ventanas. ). A propósito, si tenemos una habitación típica de 4mx4m y 2.5 m de altura, con paredes de espesor  $d_{\text{pared}}=30$  cm ( $A_{\text{pared}}=52\text{m}^2$ ) y dos aberturas de vidrio simple de 4 m<sup>2</sup>, y 3 mm de espesor; las perdidas a través de la pared y el vidrio están en la misma relación que la inversas de sus resistencias térmicas, esto es:

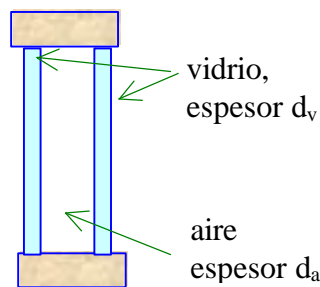
$$\frac{H_{pared}}{H_{vidrio}} = \frac{k_{pared}}{k_{vidrio}} \frac{A_{pared}}{A_{vidrio}} \frac{d_{vidrio}}{d_{pared}} \quad (11)$$

Por consiguiente, las pérdidas por las aberturas son tan importantes como las de toda una pared. Claramente, si se desea una buena aislación térmica en las paredes, es conveniente usar paredes dobles con algún buen aislante térmico en el medio como polietileno expandido (tergopol) o lana de vidrio. Para reducir este efecto a menudo se usan dos paneles con una cámara de aire en el medio, como se ilustra en la figura 3. En este caso, lo que tenemos es esencialmente tres medio en serie, por lo tanto la resistencia térmica efectiva será:

$$R_{12} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (12)$$



**Figura 2.** Conducción a través de combinación de medio en serie (izquierda) y en Paralelo (derecha)



**Figura 3.** Ventana de doble panel, dos vidrios y una cámara de aires en el medio.

o sea

$$R_{2vidrio} = \frac{1}{k_{vid}} \frac{d_{vid}}{A} + \frac{1}{k_{aire}} \frac{d_{aire}}{A} \quad (13)$$

Para estimar el rendimiento de aislación de una ventana de doble vidrio, respecto de una de panel simple, debemos dividir  $H_{2vidrio}/H_{1vidrio}$ , el resultado es:

$$\frac{H_{1\text{vidrio}}}{H_{2\text{vidrio}}} = \frac{2}{1} \frac{k_{\text{vidrio}} d_{\text{aire}}}{k_{\text{aire}} d_{\text{vidrio}}} \quad (14)$$

para una ventana típica, si tomamos  $d_{\text{aire}} = 2\text{cm}$  y  $d_{\text{vidrio}} = 3\text{mm}$ , el coeficiente de aislamiento será  $\approx 2426$  !!. Un problema con este tipo de ventanas es el mantenimiento del interior libre de hongos y humedad. Para lograrlo, se suele usar algún gas inerte en el interior, por ejemplo  $\text{N}_2$  o Ar a una ligera sobre presión y algún tipo de sílica para absorber la humedad (agua) y el gas neutro impide el crecimiento de hongos.

Las propiedades aislantes de la ropa proviene fundamentalmente de las propiedades aislantes del aire. Nuestro cuerpo calienta el aire en contacto con la piel y estos "paquetes" de aire dentro del tejido de la ropa nos aíslan el medio. Si corre viento, esta capa de aire caliente es remplazada por otra fría y sentimos este efecto. sentiríamos calor. La ropa nos mantiene calientes pues impide que el aire se mueva con facilidad. A propósito, es claro que la ropa no genera calor, lo hacemos nosotros a través de nuestro metabolismo.

**Convección:** Aunque los líquidos y los gases no suelen ser muy buenos conductores de calor, pueden transmitirlo eficientemente por convección. La propagación del calor a través de la convección se caracteriza por:

- ✗ Existe un *medio material fluido* a través del cual se propaga el calor
- ✗ La densidad del medio varía con la temperatura y la gravedad juega un rol importante, sin ella no hay convección.
- ✗ El calor se transmite *con transporte de materia*.

Mientras que la conducción implica moléculas y/o electrones que se mueven pequeñas distancias y chocan, en la convección interviene el movimiento de muchas moléculas a lo largo de distancias microscópicas. Dado que el enfoque matemático de este proceso resulta bastante complicado, sólo lo describiremos en forma cualitativa.

Un calentador de aire forzado, en el que el aire se calienta y luego se distribuye mediante un ventilador, es un ejemplo de convección forzada. La convección también ocurre, por ejemplo, en el aire caliente que se eleva. Al calentarse, el aire que descansa sobre un radiador o cualquier tipo de calentador se expande, por lo que disminuye su densidad; a causa de su menor densidad, se eleva. Las corrientes oceánicas, calientes o frías, como la corriente del Golfo, son un ejemplo de convección natural a gran escala. El viento es otro ejemplo de convección y el clima, por lo general, es el resultado de corrientes conectivas de aire. Cuando se calienta una olla con agua, se desatan corrientes de convección en la medida en que el agua caliente del fondo sube, debido a su menor densidad, y es sustituida por el agua más fría de la parte superior. Este principio se usa en muchos sistemas de calefacción, como el de los radiadores de agua caliente. Por lo general en los sistemas de calefacción por agua (radiadores), se coloca una caldera que calienta el agua en el sótano del un edificio, el agua caliente sube por los caños y circule por el sistema. Así el agua caliente entra a los radiadores; éstos transfieren el calor al aire por conducción, y el agua enfriada regresa al sótano y es calentada nuevamente.

**Radiación:** En la conducción y la convección es necesaria la presencia de la materia. Sin embargo, la vida sobre la Tierra depende de la transferencia de energía solar, y ésta llega a nuestro planeta atravesando el espacio. Esta forma de transferencia de energía es el calor - la temperatura del Sol es mucho mayor (6 000 K) que la de la Tierra- y se denomina radiación. El calor que recibimos de un hogar es principalmente energía radiante (la mayor parte del aire que se calienta en la chimenea sube por el tiro mediante convección y no llega hasta nosotros), lo mismo ocurre con el calor de una estufa eléctrica. La propagación del calor a través de la radiación se caracteriza por:

- ✗ No es necesario que exista un medio *material* para que se produzca la radiación.
- ✗ El calor se transmite *sin transporte de materia*.

La radiación consiste esencialmente en ondas electromagnéticas. La radiación del Sol se produce principalmente en la zona visible y en otras longitudes de onda a las que el ojo no es sensible, como la infrarroja, que es la principal responsable del calentamiento de la Tierra.

La tasa a la que un objeto irradia energía viene dada por la expresión de Stefan-Boltzmann:

$$P_{irr} = A \epsilon(T) \sigma_{SB} T^4 \quad (15)$$

aquí, A es el área de la superficie del objeto que irradia y que está a la temperatura absoluta T.  $\epsilon(T)$  es una propiedad característica de cada material y las condiciones de su superficie llamada la emisividad del material y que en general depende de la temperatura y longitud de onda  $\lambda$  tipo de radiación electromagnética (visible, infrarroja, etc)  $\sigma_{SB}$  es una constante universal llamada la constante de Stefan-Boltzmann, su valor es  $\sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m.K}^4$ . En equilibrio térmico un cuerpo absorbe tanto como irradia (Ley de Kirchoff), por lo tanto los buenos emisores son también buenos absorbentes. Las superficies negra tienen emisividades mayores que las claras o brillantes. Esto hace que los objetos negros y oscuros absorben casi toda la radiación que les llega y es la causa de que la ropa clara sea preferible a la oscura cuando el día es caluroso. Si un objeto de temperatura  $T_1$  esta en un medio a una temperatura  $T_2$  el objeto estará absorbiendo y emitiendo radiación, la potencia radiada neta será:

$$P_{irr\_neta} = A \epsilon(T) \sigma_{SB} (T_1^4 - T_2^4) \quad (16)$$

En equilibrio,  $P_{irr\_neta}=0$ , o sea  $T_1=T_2$ .