

TRANSFERENCIA DE CALOR

Se ha referido al calor como una forma de energía de tránsito. Siempre que exista una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos o entre dos porciones de un mismo cuerpo, se dice que el calor fluye en una dirección de mayor a menor temperatura. Hay tres métodos fundamentales median te los cuales ocurre este intercambio de calor:

Conducción, convección, y radiación.

Ejemplos de los tres métodos se muestran en la figura 19.1

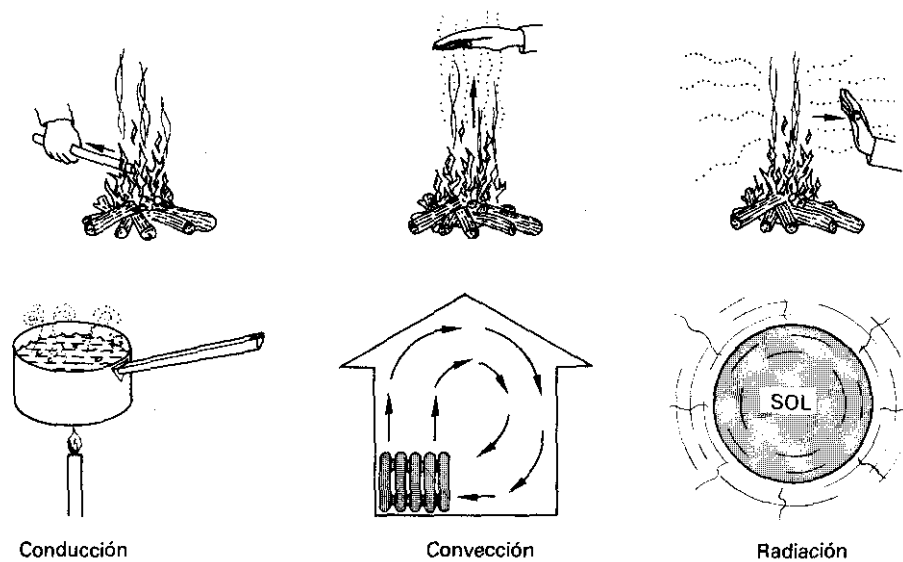


Fig. 19-1 Los tres principales métodos de transferencia de calor: a) conducción, b) convección, y c) radiación.

MÉTODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La mayor parte de lo que se ha estudiado incluye transferencia o transmisión de calor por conducción, es decir, mediante colisiones moleculares entre moléculas vecinas. Por ejemplo, si se sostiene un extremo de una barra de hierro sobre fuego, finalmente el calor alcanzará a transmitirse a la mano por medio del proceso de conducción. La actividad molecular incrementada en el extremo caliente se transmite de una molécula la otra hasta que alcanza la mano. El proceso continuará en tanto exista una diferencia de temperaturas a lo largo de la barra.

Conducción es el proceso en el que la energía térmica se transfiere por colisiones moleculares adyacentes a través del medio material. El medio en sí no se mueve.

Probablemente la aplicación más común del principio de conducción es cocinar.

Por otro lado, si se coloca la mano encima del fuego, como se muestra en la figura 19-1 b la transferencia de calor se puede sentir en el aire caliente que sube. Este proceso se llama convección, y difiere del proceso de conducción en el cual el material se mueve. El calor se transfiere al moverse las masas en lugar de pasar a lo largo del medio material mediante las moléculas vecinas.

Convección es el proceso en el cual el calor se transfiere mediante el movimiento real de un fluido.

Las corrientes de convección son la base del sistema de calefacción y enfriamiento de la mayoría de las casas.

Cuando se sostiene la mano cerca del fuego, la fuente primaria de calor es la radiación térmica. La radiación implica la emisión o absorción de ondas electromagnéticas que se originan a nivel atómico. Estas ondas se propagan con la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y no hay necesidad de un medio material para que se propaguen.

Radiación es el proceso por el cual el calor se transfiere en forma de ondas electromagnéticas.

La fuente de energía radiante más obvia es el Sol. Ni el proceso de conducción ni el de convección toman lugar en la transferencia de energía térmica a través del espacio hacia la Tierra.

La enorme energía térmica que se recibe en la Tierra se transfiere por radiación electromagnética. En donde se tiene un medio material, empero, la transferencia de calor debida a la radiación en general es muy pequeña si se compara con la transferencia por conducción y convección.

Desafortunadamente hay muchos factores que afectan la transferencia de energía térmica por los tres métodos. El cálculo de la cantidad de energía térmica que se transfiere en determinado proceso es muy complicado. Las relaciones que se estudian en las secciones siguientes se basan en observaciones empíricas y dependen de condiciones ideales. El grado con el cual estas condiciones se satisfagan, en general, determina la exactitud de sus predicciones.

19-2 CONDUCCIÓN

Cuando dos partes de un material se mantienen a diferentes temperaturas, la energía se transfiere mediante colisiones moleculares de las temperaturas más altas a las más bajas. En este proceso de conducción también participa el movimiento de los electrones libres dentro de la sustancia. Estos electrones se separan de sus átomos padres y que dan en libertad para moverse de átomo en átomo cuando se estimulan tanto eléctrica como térmicamente. La mayoría de los metales son buenos conductores de calor ya que tienen un número de electrones libres que pueden distribuirlo además del que se propaga por la agitación molecular. En general, un buen conductor de la electricidad también lo es del calor.

La ley fundamental de la conducción del calor es una generalización de los resultados experimentales en relación con el flujo del calor a través de un material en forma de placa. Considérese la placa que se muestra en la figura 19-2, de espesor L y área A . Una de las caras se mantiene a una temperatura t y la otra a una temperatura t' .

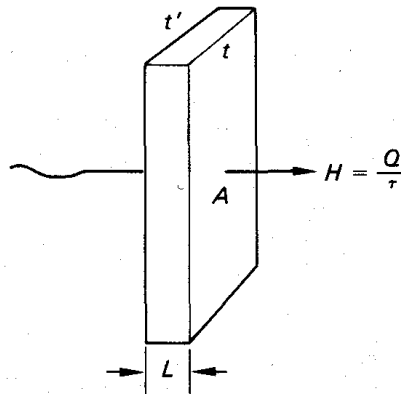


Fig. 19-2 Medición de la conductividad térmica.

A continuación se mide la cantidad de calor Q que fluye perpendicular a la cara durante un tiempo z . El experimento se repite para muchos materiales diferentes de distintos espesores y áreas de la cara; de estos experimentos pueden deducirse algunas observaciones generales en relación con el proceso de conducción de calor:

1. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas ($\Delta t = t' - t$) entre las dos caras.
2. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es directamente proporcional al área A de la placa.
3. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es inversamente proporcional al espesor L de la placa.

Estos resultados anteriores pueden expresarse en forma de ecuación al introducir una constante de proporcionalidad k . Que se escribe

$$H = \frac{Q}{\tau} = kA \frac{\Delta t}{L} \quad (19-1)$$

en donde H representa la velocidad con la cual se transfiere el calor. Aunque esta ecuación se estableció para un material en forma de placa, también se cumple para una barra de sección transversal A y longitud L .

La constante de proporcionalidad K es una propiedad del material que se llama conductividad térmica. De la ecuación, puede observarse que las sustancias con alta conductividad térmica son buenos conductores del calor, en tanto que las sustancias de baja conductividad son malos conductores o aisladores.

La conductividad térmica de una sustancia es una medida de su capacidad para conducir calor y se define mediante la relación

$$k = \frac{QL}{A\tau\Delta t}$$

En la tabla 19-1 se da una lista de las conductividades térmicas para diversos materiales.

Tabla 19-1 Conductividades térmicas

Sustancia	k	
	Btu·pulg/pie ² ·h·F°	kcal/m·s·C°
Aluminio	1451	5.0×10^{-2}
Latón	750	2.6×10^{-2}
Cobre	2660	9.2×10^{-2}
Plata	2870	9.9×10^{-2}
Acero	320	1.1×10^{-2}
Asbesto	4.0	1.4×10^{-4}
Ladrillo	5.0	1.7×10^{-4}
Concreto	12.0	4.1×10^{-4}
Corcho	0.3	1.0×10^{-5}
Vidrio	7.3	2.5×10^{-4}
Aire	0.16	5.3×10^{-6}
Agua	4.15	1.4×10^{-4}

Ejemplo 19-1 La pared exterior de un horno de ladrillos tiene un espesor de 3 pulg. La superficie interior está a una temperatura de 300 °F y la exterior está a 85 °F. ¿Cuánto calor se pierde a través de un área de 1 pie en una hora?

Solución De la ecuación (19-1), al resolverse para Q, se obtiene

$$\begin{aligned}
 Q &= kA\tau \frac{\Delta t}{L} \\
 &= (5 \text{ Btu.pulg/pie}^2 \cdot \text{h.F}^\circ) (1 \text{ pie}^2) (1 \text{ h}) \frac{300^\circ \text{F} - 85^\circ \text{F}}{3 \text{ pulg}} \\
 &= 358 \text{ Btu}
 \end{aligned}$$

Siempre es conveniente conservar las unidades de cada cantidad a lo largo de la resolución del problema. Esta práctica evitará muchos errores innecesarios. Por ejemplo, en algunas ocasiones es fácil olvidar que en las unidades del SI el espesor debe expresarse en pulgadas y el área en pies cuadrados. Si las unidades de la conductividad térmica se dan con su valor numérico en la ecuación, estos errores no ocurrirán.

Cuando dos materiales de diferentes conductividades térmicas y secciones transversales semejantes se ponen en contacto, la velocidad de conducción del calor a través de cada material debe ser constante. Si no hay ni fuentes ni sumideros de energía térmica dentro de los materiales, y los puntos extremos se mantienen a una temperatura constante, se logrará al final un flujo estacionario. El calor no puede “crearse” ni “destruirse” en cualquier punto.

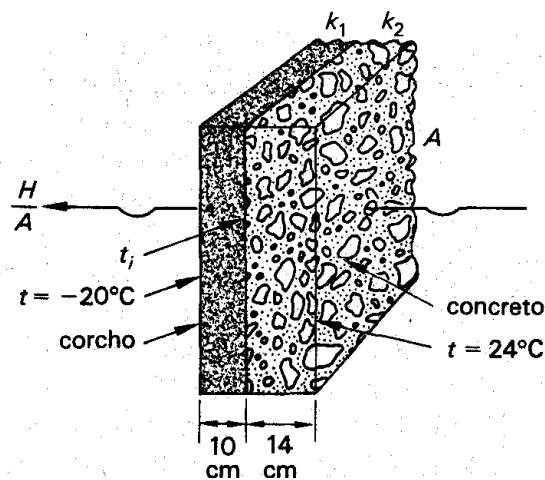


Fig. 19-3 Conducción de calor a través de una pared compuesta

Ejemplo 19-2 La pared de una planta congeladora se compone de 10 cm. de espesor de corcho y de 14 cm. de espesor de concreto sólido (Fig. 19-3).

a) Si la temperatura de la pared interna del panel de corcho es -20°C y de 24°C la externa, encuentre la temperatura de la entrecara corcho-concreto.

b) Calcular el flujo de calor en calorías por centímetro cuadrado por segundo.

Solución a)

Para un flujo estacionario, la velocidad del flujo de calor a través del corcho es igual a la velocidad del flujo de calor a través del concreto. Se usará el subíndice 1 para referirse al corcho y el subíndice 2 al concreto. Por tanto, si t es la temperatura en la entrecara, se tiene

$$\frac{H}{A}(\text{corcho}) = \frac{H}{A}(\text{concreto})$$
$$\frac{k_1[t_i - (-20^{\circ}\text{C})]}{L_1} = \frac{k_2(24^{\circ}\text{C} - t_i)}{l_2}$$
$$\frac{(1 \times 10^{-5})(t_i + 20)}{0.10} = \frac{(4.1 \times 10^{-4})(24 - t_i)}{0.14}$$

Si ahora se multiplica por 1.4×10 se obtiene

$$1.4 (t_i + 20) = 41 (24 - t_i)$$

$$1.4 t_i + 28 = 984 - 41 t_i$$

$$t_i = 22.5^{\circ}\text{C}$$

Solución b) El flujo de calor por unidad de área por unidad de tiempo puede obtenerse de:

$$\frac{H_1}{A_1} = \frac{k_1(t_i + 20^{\circ}\text{C})}{0.10} = \frac{(1 \times 10^{-5} \text{ kcal} / \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{\circ})(22.5 + 20)\text{C}^{\circ}}{0.10 \text{ m}} = 4.25 \times 10^{-3} \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

La misma velocidad a través del concreto podría ser calculada. Obsérvese que la diferencia de temperatura entre los puntos extremos del corcho es 42.5C° mientras que la diferencia entre las temperaturas en el concreto es únicamente 1.5C° . Esta marcada diferencia entre los intervalos de temperatura tiene su origen en las diferentes conductividades térmicas de las paredes.

19-3 CONVECCIÓN

La convección se definió como el proceso para transferir calor mediante un movimiento real de masas de un medio material.

Se llama *corriente de convección* a una corriente de líquido o de gas que absorbe energía térmica en un lugar y luego se mueve a otro sitio, donde libera el calor a la porción más fría del fluido. Una demostración de laboratorio de una corriente de convección se muestra en la figura 19-4.

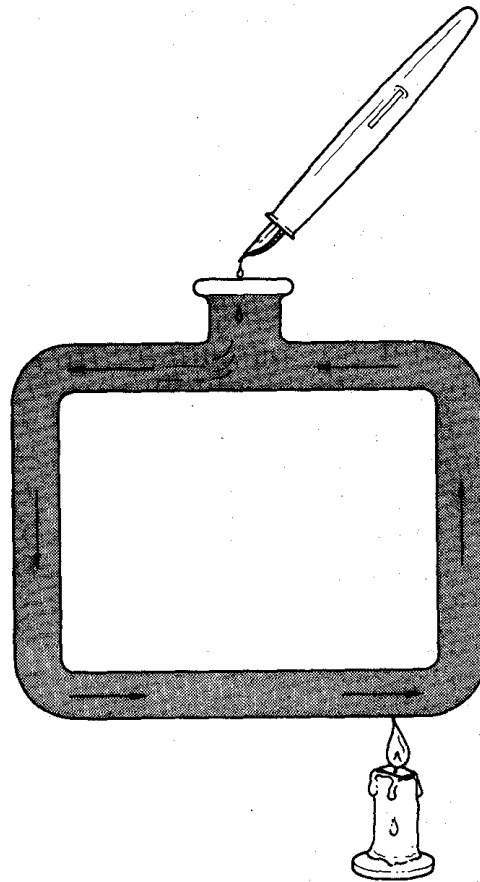


Fig. 19-4 Un ejemplo de convección natural

Una sección rectangular de tubo de vidrio se llena con agua y se calienta en una de sus esquinas inferiores. El agua que está cerca de la flama se calienta y se dilata, haciéndose menos densa que el agua más fría que está encima de ella. A medida que el agua caliente sube, es reemplazada por agua fría del tubo inferior. Este proceso continúa hasta que una corriente de convección con sentido contrario a las manecillas del reloj circula a través de la tubería. La existencia de una corriente tal puede visualizarse mejor al poner una gota de tinta en la abertura del extremo superior. La tinta se moverá por la corriente de convección hasta que regrese al extremo superior desde la sección de la derecha del tubo.

Si el movimiento de un fluido se origina por una diferencia en densidad que acompaña a un cambio en la temperatura, la corriente producida de esta manera se llama **convección natural**. El agua que fluye a través del tubo de vidrio, en el ejemplo anterior, representa una corriente de convección natural. Cuando un fluido es obligado a moverse por la acción de una bomba o ventilador, la corriente producida de esta manera se llama **convección forzada**. En muchos hogares se emplean ventiladores para forzar el aire caliente desde un horno hacia todas las habitaciones.

Para calentar una habitación mediante un radiador se hace uso de ambos procesos. (Fig. 19-5.)

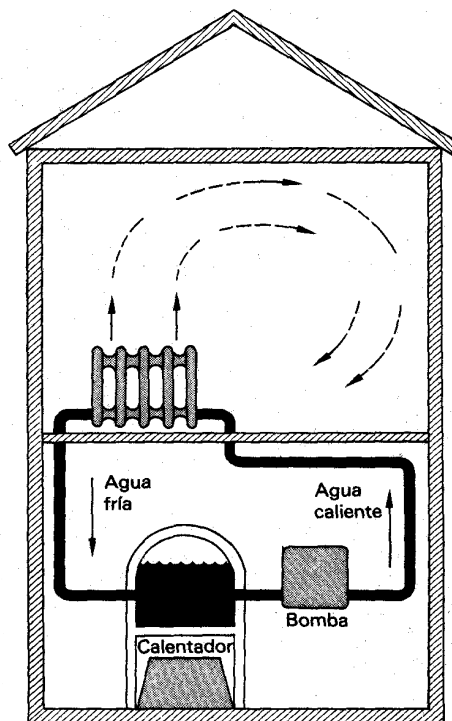


Fig. 19-5 Las corrientes de convección forzada hacen que circule el agua caliente y regrese al horno. La habitación se calienta mediante corrientes de convección natural en el aire.

Una bomba de agua fuerza a circular agua caliente desde los tubos hasta el radiador y de regreso al calentador u horno. Se conduce el calor por el agua a través de las paredes del radiador al aire en contacto con éste. El aire caliente se eleva y desplaza al aire más frío, de modo que se establece una corriente de convección natural en toda la habitación. Aunque ocurre algún calentamiento por el proceso de radiación, son más importantes los procesos de conducción y convección. El nombre de "radiador" es inadecuado.

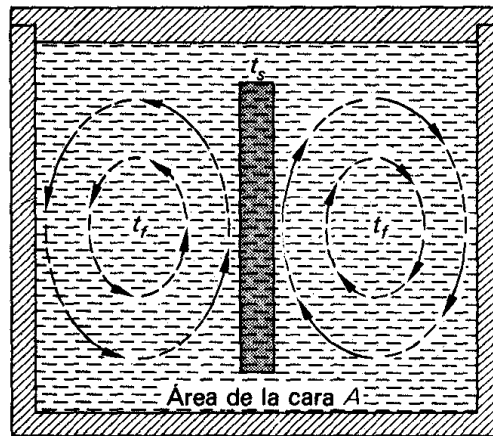


Fig. 19-6 Cuando una placa caliente se coloca en un fluido frío, las corrientes de convección transfieren calor hacia afuera de la placa con una rapidez proporcional a la diferencia en temperaturas y área de la placa.

Es una tarea sumamente difícil calcular el calor que se transfiere por convección, por lo que en muchas situaciones sólo se tiene o puede tener una estimación del proceso. A continuación se presentan relaciones de trabajo obtenidas mediante observaciones experimentales. Supóngase que se tiene una placa de material conductor de área A y temperatura t_s . Si la placa vertical se encuentra por completo sumergida dentro de un fluido más frío a una temperatura t_f , se establecerán corrientes por convección natural en el fluido, como se muestra en la figura 19-6. El fluido que llega a estar en contacto con las paredes se elevará y desplazará el aire más frío. La observación experimental demuestra que la velocidad H con la que el calor se transfiere por convección es proporcional al área A y a la diferencia de temperaturas Δt entre la pared y el fluido. Se escribe

$$H = \frac{Q}{\text{tiempo}} = h A \Delta t \quad (19.3)$$

en donde h es la constante de proporcionalidad y se llama **coeficiente de convección**.

A diferencia de la conductividad térmica, el coeficiente de convección no es una propiedad del sólido o del fluido sino que depende de muchos parámetros del sistema. Se sabe que varía con la geometría del sólido y del acabado de su superficie, la velocidad del fluido, la densidad del mismo y la conductividad térmica. Las diferencias en temperatura y presión del fluido también afectan el valor de h . En la tabla 19-2 se dan los coeficientes de convección para ciertas geometrías.

Algunas unidades comúnmente aceptadas para h son $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^\circ$ en el sistema métrico y $\text{Btu/h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{F}^\circ$ en el sistema británico gravitacional.

Tabla 19-2 Coeficientes de convección

Geometría	$h, \text{kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^\circ$
Placa vertical	$(4.24 \times 10^{-4}) \sqrt[4]{\Delta t}$
Placa horizontal, la cara hacia arriba	$(5.95 \times 10^{-4}) \sqrt[4]{\Delta t}$
La cara hacia abajo	$(3.14 \times 10^{-4}) \sqrt[4]{\Delta t}$
El diámetro D del tubo	$(1.0 \times 10^{-3}) \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{D}}$

Ejemplo 19-3 Una pared vertical plana de 6 m^2 de área se mantiene a una temperatura constante de 116°C , y el aire que la rodea sobre ambas caras está a 35°C . ¿Cuánto calor se pierde en ambos lados de la pared en 1 h por convección natural?

Solución. Primero debe calcularse h para una pared vertical. De la tabla 19-2 se tiene:

$$h = (4.24 \times 10^{-4}) \sqrt[4]{116 - 35}$$

$$h = (4.24 \times 10^{-4}) \sqrt[4]{81} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^\circ$$

$$h = (1.27 \times 10^{-3}) \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^\circ$$

La cantidad de calor que se transfiere desde cada pared puede encontrarse al resolver para Q la ecuación (19-3).

$$Q = h A t \Delta T$$

$$= (1.27 \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^\circ) (6 \text{ m}^2) (3600 \text{ seg}) (81 \text{ C}^\circ)$$

$$= 2.22 \times 10^3 \text{ kcal}$$

Puesto que hay dos paredes, la transferencia total de calor es:

$$Q = (2) (2.22 \times 10^3 \text{ kcal}) = 4.44 \times 10^3 \text{ kcal}$$

19-4 RADIACIÓN

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas que se originan a nivel atómico. Ejemplos de radiación electromagnética son: rayos gama, rayos X, ondas de luz, rayos infrarrojos, ondas de radio y ondas de radar; éstas sólo difieren en su longitud de onda. En esta parte se concentra la atención a la *radiación térmica*.

La radiación térmica consta de ondas electromagnéticas emitidas por un sólido, líquido o gas en virtud de su temperatura.

Todos los objetos emiten energía radiante en forma continua. A temperaturas bajas la rapidez de emisión es pequeña, y la radiación es predominantemente de longitudes de onda larga. A medida que la temperatura se incrementa la velocidad de emisión aumenta muy rápido, y la radiación predominante se corre hacia longitudes de onda más cortas. Si una barra de hierro se calienta continuamente, al final emitirá radiación en la región visible; de ahí los términos caliente al rojo y caliente al blanco.

Mediciones experimentales demuestran que la velocidad con la cual se irradia energía térmica desde una superficie *varía directamente con la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante*. Por tanto, si se duplica la temperatura de un objeto, la velocidad con la cual emite energía térmica se incrementará 16 veces.

Un factor adicional que debe considerarse al calcular la rapidez de transferencia de calor por radiación es la naturaleza de las superficies expuestas. Objetos que son buenos emisores de radiación térmica también resultan ser buenos absorbedores de radiación. Un objeto que absorbe toda la radiación incidente sobre su superficie se llama *absorbedor ideal*. Tal objeto también será un *radiador ideal*. En realidad no existe el objeto que sea un absorbedor ideal; pero, en general, las superficies más negras, serán las que mejor absorban energía térmica. Por ejemplo, una camisa negra absorbe más energía radiante del Sol que otra más clara. Puesto que la camisa también es un buen emisor, su temperatura externa será mayor que la temperatura del cuerpo, haciéndola incómoda.

Un absorbedor ideal o un radiador ideal es algunas veces conocido como *cuerpo negro*, por las razones que se mencionaron antes. A la radiación que emite el cuerpo negro se le llama *radiación de cuerpo negro*. Aunque tales cuerpos realmente no existen el concepto resulta muy útil como un patrón para comparar las capacidades de varias superficies para absorber o emitir energía térmica.

Absorbancia* e es una medida de la capacidad del cuerpo para absorber o emitir radiación térmica.

La Absorbancia es una cantidad adimensional, que tiene un valor numérico comprendido entre 0 y 1, dependiendo de la naturaleza de la superficie.

Para un cuerpo negro, la absorbancia es igual a la unidad; para una superficie de plata muy bien pulida, se aproxima a cero.

La rapidez de radiación R de un cuerpo se define formalmente como la energía radiante emitida por unidad de área por unidad de tiempo, es decir, la potencia por unidad de área. Simbólicamente,

$$R = \frac{E}{tA} = \frac{P}{A} \quad (19.4)$$

si la potencia radiante P se expresa en watts y el área de la superficie es A , en metros cuadrados, la rapidez de la radiación estará en watts por metro cuadrado. Como se estudió anteriormente esta velocidad depende de dos factores, la temperatura absoluta T y la absorbancia e del cuerpo radiante. El postulado formal de esta dependencia se conoce como la *ley de Stefan-Boltzmann* y puede escribirse como

$$R = \frac{P}{A} = e\sigma T^4 \quad (19-5)$$

La constante de proporcionalidad σ es una constante universal, por completo independiente de la naturaleza de la radiación. Si la potencia radiante se expresa en watts y la superficie en metros cuadrados, σ tiene el valor de $5.76 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

La Absorbancia e tiene valores de 0 a 1, dependiendo de la naturaleza de la superficie radiante. Una recopilación de los símbolos y sus definiciones se proporciona en la tabla 19-3.

Tabla 19-3 Definición de los símbolos de la ley de Stefan-Boltzmann ($R = e\sigma T^4$)

Símbolo	Definición	Observaciones
R	Energía radiada por unidad de tiempo por unidad de área	$\frac{E}{\tau A}$ o $\frac{P}{A}$
e	Absorbancia de la superficie	0-1
σ	Constante de Stefan	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
T^4	La cuarta potencia de la temperatura absoluta.	K^4

Ejemplo 19-4 ¿Qué potencia radiará una superficie esférica de plata de 10 cm de diámetro si su temperatura es 527°C? La absorbancia de la superficie es 0.04.

Solución. Primero debe calcularse el área de la superficie a partir del diámetro conocido de la esfera.

$$A = 4\pi R^2 = \pi D^2 = \pi(0.10)^2 = 0.0314 m^2$$

La temperatura absoluta es

$$T = 527 + 273 = 800 \text{ }^\circ\text{K}$$

Si se resuelve para P en la ecuación (19-5), se obtiene

$$P = e\sigma AT^4 = (0.04)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(0.0314 \text{ m}^2)(800 \text{ }^\circ\text{K})^4 = 29.2 \text{ W}$$

Se ha dicho que todos los objetos emiten radiación en forma continua independientemente de su temperatura. Si esto es cierto, ¿finalmente porqué todos los objetos no agotan su combustible? La respuesta es que ellos se agotarían si no se les suministrara energía. El filamento de un foco de luz eléctrica se enfría más a la temperatura ambiente cuando el suministro de energía eléctrica se interrumpe. No se enfría más ya que, en este punto, el filamento absorbe energía radiante con la misma rapidez que está emitiéndola. La ley que explica este fenómeno se conoce como la **ley de Prevost de intercambio de calor:**

Un cuerpo que está a la misma temperatura que sus alrededores irradia y absorbe calor con la misma rapidez.

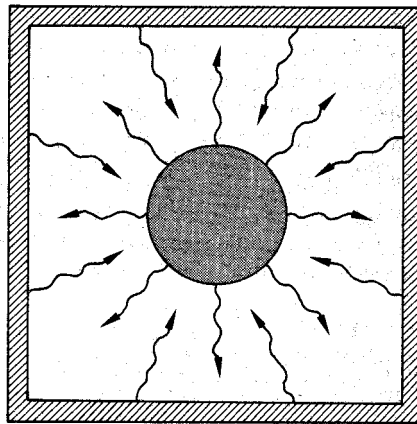


Fig. 19-7 Cuando un objeto y sus alrededores tienen la misma temperatura, la energía radiante emitida es la misma que la absorbida.

En la figura 19-7 se muestra un objeto aislado que está en equilibrio térmico con las paredes de su recipiente.

La rapidez con la que un cuerpo absorbe energía también puede obtenerse mediante la *ley de Stefan-Boltzmann* Ec. (19-5)]. De este modo puede describirse la transferencia neta de la energía radiante emitida por un objeto rodeado por paredes a temperaturas diferentes. Por ejemplo, considérese un filamento de alambre delgado de una lámpara que está cubierta con una envoltura, como se muestra en la figura 19-8. La temperatura del filamento se denota por T_1 la temperatura de la cubierta se denota por T_2 . La emisividad del filamento es e , y el único proceso que se considera es el de radiación. En este ejemplo, se observa que

Rapidez neta de radiación = rapidez de emisión de energía — rapidez de absorción de energía

$$R = e\sigma T_1^4 - e\sigma T_2^4$$

$$R = e\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (19-6)$$

La ecuación (19-6) puede aplicarse a cualquier sistema para calcular la energía neta emitida por un radiador a temperatura T_1 y la emisividad e en presencia de los alrededores a una temperatura T_2 .

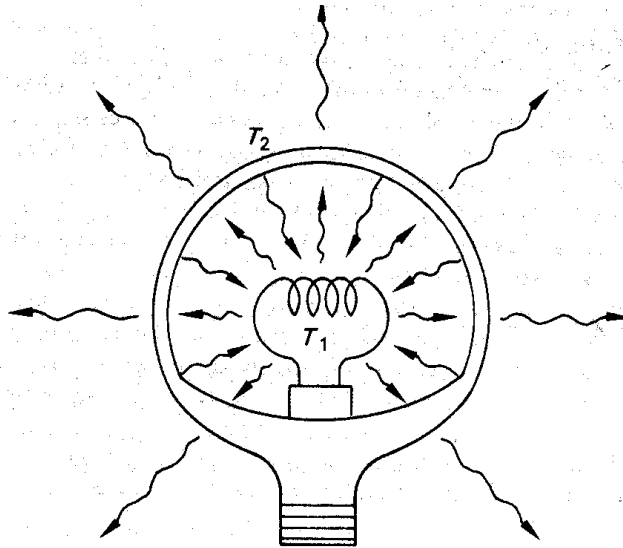


Fig. 19-8 La energía neta emitida por un radiador en alrededores de diferente temperatura.